

MEDIDAS DE ENERGIA NO ENSAIO SPT

EDGAR ODEBRECHT

Porto Alegre

Novembro, 2003

EDGAR ODEBRECHT

MEDIDAS DE ENERGIA NO ENSAIO SPT

Tese 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 Doutor em Engenharia

Porto Alegre

Novembro, 2003

EDGAR ODEBRECHT

O23m

Odebrecht, Edgar

Medidas de energia no ensaio do SPT / Edgar Odebrecht; orientador, Fernando Schnaid, Marcelo Maia Rocha; co-orientador, George de Paula Bernardes. – Porto Alegre, 2003.

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

1. Geotécnia – Ensaios. 2. Fundações – Ensaios I. Schnaid, Fernando, orient. II. Rocha, Marcelo Maia, orient. Bernardes, George de Paula, co-orient. III. Título.

CDU-624.1

MEDIDAS DE ENERGIA NO ENSAIO SPT

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA 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, 28 de novembro de 2003.

Prof. Fernando Schnaid
Ph.D. Oxford University, UK
Orientador

Prof. Marcelo Maia Rocha
Dr. Tecn. Universität Innsbruck
Orientador

Prof. George de Paula Bernardes
Dr. Norwegian Institute of Technology, NOR
Co-orientador

Prof. Américo Campos Filho
Coordenado do PPGE/UFGRS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Nelson Aoki (USP)

D.Sc. Escola de Eng. de São Carlos –
USP, BR

**Prof. Fernando Artur B. Danziger
(COPPE)**

D.Sc. Universidade Federal do Rio de Janeiro
COPPE / UFRJ, BR

Prof. Jarbas Milititsky (UFRGS)

Ph.D. University of Surrey, UK

A Constanza, Carolina e a memória de
Juliana, esposa e filhas.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Fernando Schnaid por sua firme orientação, dedicação e atenção indispensáveis para a elaboração deste trabalho.

Ao Professor Marcelo Maia Rocha pela orientação e indiscutível dedicação sem a qual este trabalho não teria alcançado seus objetivos.

Ao Professor George de Paula Bernardes que sempre esteve presente nos momentos de incertezas ocorridos ao longo do trabalho.

Ao colega Edson Fajardo Nunes da Silva que sempre apoiou o desenvolvimento do trabalho e em muito colaborou nas dúvidas e discussões ocorridas ao longo do desenvolvimento.

Ao Professor Antônio Belincanta pela sua colaboração no desenvolvimento deste trabalho e pelo seu incentivo.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao Programa de Pós-graduação, aos docentes e em especial ao Professor Gastão que sempre apoiou o trabalho, não podendo esquecer das funcionárias Liliani, Carmem, Rita, Bernadete, Elódia, Raquel e Elea que me acolheram com muito carinho.

À Universidade do Estado de Santa Catarina, em especial ao Professor Anselmo Fábio de Mores que sempre esteve ao meu lado dando suporte às necessidades para a realização do trabalho.

À CAPES pelo auxílio proporcionado com a bolsa de estudos que possibilitou minha total dedicação aos estudos.

Ao CNPq pelos recursos fornecidos para viabilizar a compra de equipamentos obtidos através de um projeto de pesquisa.

À Georforma Engenharia Ltda que não poupou esforços e recursos para viabilizar a execução dos ensaios e desenvolvimento de equipamentos.

Aos colegas de Pós-graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em especial Fernando Maria Mántaras, entre outros.

À minha mãe e a memória do meu pai dos quais aprendi o compromisso de lutar por aquilo que cremos e a minha irmã que sempre juntos estiveram.

A todos que de alguma forma participaram na realização deste trabalho.

RESUMO

ODEBRECHT, E. Medidas de Energia no Ensaio do SPT. (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O presente trabalho apresenta um estudo detalhado da monitoração de energia durante a cravação do amostrador no ensaio SPT, bem como da identificação dos fatores que influenciam estas medidas. Para tanto foi desenvolvido um equipamento para a aquisição dos sinais de força e de aceleração que consta de uma célula de carga, amplificadores e condicionadores de sinais de força e aceleração, sistema de aquisição de sinal e tratamento numérico dos registros. Paralelamente foi implementado um programa embasado na técnica de diferenças finitas que simula numericamente o ensaio, inclusive o balanço das distintas energias ao longo do processo. De posse dessas ferramentas e tecnologia efetuou-se uma extensa campanha de ensaios totalmente controlados. Os resultados da campanha experimental, associados aos fundamentos e princípios básicos da física, permitiram o entendimento do processo de cravação do amostrador no solo com a determinação das perdas (eficiências) ocorridas ao longo do processo e a proposição de uma nova abordagem de interpretação fundamentada no trabalho efetivamente consumido na cravação do amostrador no solo. O conhecimento deste trabalho abre uma gama de alternativas para a estimativa de propriedades de comportamento de solos com base em resultados de medidas de SPT. Exemplos da aplicação destas alternativas são apresentados.

Ao longo do trabalho verificou-se que: O intervalo de integração utilizado na apropriação da energia deve ser tal que leva em consideração os golpes subsequentes mesmo em se tratando de hastes longas; A energia assim determinada é dependente da resistência do solo; Existem perdas de energia ao longo das hastes; Estas perdas são diretamente proporcionais ao comprimento das hastes; O ensaio é um fenômeno de grandes deslocamentos e, portanto, deve ser interpretado com a adoção de um referencial fixo e fora do sistema; A variação da energia potencial das hastes deve ser considerada no computo da energia consumida na cravação do amostrador no solo e esta variação da energia é diretamente proporcional à massa das hastes.

Palavras-chaves: geotecnia, fundações, investigação geotécnica, sondagem.

ABSTRACT

ODEBRECHT, E. Medidas de Energia no Ensaio do SPT. (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O presente trabalho apresenta um estudo detalhado da monitoração de energia durante a cravação do amostrador no ensaio SPT, bem como da identificação dos fatores que influenciam estas medidas. Para tanto foi desenvolvido um equipamento para a aquisição dos sinais de força e de aceleração objetivando a correta determinação da energia efetivamente transferida às hastes. Este equipamento consta do desenvolvimento da célula de carga, amplificadores e condicionadores de sinais de força e aceleração, sistema de aquisição de sinal e tratamento numérico dos registros. É a primeira experiência brasileira de desenvolvimento de tecnologia nesta área, combinando aquisição de sinais de força e aceleração com interpretação de registros através de *software* aberto. Assim o estudo compreende o desenvolvimento de um programa embasado na técnica de diferenças finitas que simula numericamente o ensaio, inclusive a mecânica de transferência de energia às hastes. De posse dessas ferramentas e tecnologia efetuou-se uma extensa campanha de ensaios totalmente controlados em câmara de calibração. Os resultados da campanha experimental, associados aos fundamentos e princípios básicos da física e dinâmica, permitiram uma análise racional do ensaio e a proposição de uma nova abordagem de interpretação. Os valores das eficiências inerentes ao ensaio nesta nova abordagem são determinados e apresentados.

Esta nova abordagem de interpretação do ensaio não visa somente à determinação da energia contida na onda que percorre a haste gerada pela ação do golpe, mas a determinação da energia efetivamente entregue ao solo e com isso o conhecimento do valor da força resultante de reação do solo que atua contra o amostrador. O conhecimento desta força abre uma gama de alternativas para a estimativa de propriedades de comportamento de solos com base em resultados de medidas de SPT. Exemplos da aplicação à prática da engenharia são apresentados.

Key-words: geotecnia, foundations, site investigation, *in-situ* testing.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	p.14
LISTA DE TABELAS	p.19
LISTA DE FOTOS	p.20
LISTA DE SÍMBOLOS	p.21
1 – INTRODUÇÃO	p.25
1.1 - DEFINIÇÕES	p.27
1.1.1 – Golpe, Impacto e Pulso	p.27
1.1.2 – Ondas de Compressão Incidentes	p.27
1.2 – ORGANIZAÇÃO DA TESE	p.29
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	p.30
2.1 – INTRODUÇÃO	p.30
2.1.1 - História do SPT	p.30
2.1.2 - História do SPT no Brasil	p.34
2.1.3 - História da Padronização	p.36
2.2 - EQUIPAMENTOS	p.38
2.2.1 - Tipos de martelos	p.38
2.2.2 - Sistemas de elevação do martelo	p.39
2.2.3 - Tipos de Hastes	p.42
2.2.4 - Tipos de Amostradores	p.43
2.2.5 - Sistemas de liberação do Martelo	p.43
2.3 – PADRONIZAÇÃO	p.44
2.3.1 – Equipamentos e Métodos de Perfuração	p.44
2.3.2 – Procedimento do Ensaio	p.47
2.3.3 – Apresentação dos Resultados	p.48
2.4 – MEDIDAS DE ENERGIA	p.51
2.4.1 – Introdução	p.51

2.4.2 - Instrumentação para determinar a energia cinética do martelo, no instante do impacto	p.53
2.4.2.1- Instrumentação utilizada por Kovacs	p.53
2.4.2.2 - Filmadora de alta velocidade	p.53
2.4.2.3 – Sistema utilizado por Matsumoto et al (1992)	p.53
2.4.2.4 – Sistema utilizado pela PDI	p.54
2.4.3 - Instrumentação utilizada para a determinação da energia na haste ..	p.55
2.4.3.1 - Instrumentação utilizada por Kovacs	p.55
2.4.3.2 - Instrumentação utilizada por Schmertmann e Placios	p.56
2.4.3.3 - Instrumentação utilizada pela “Binary instuments”	p.57
2.4.3.4 - Instrumentação utilizada no IPT	p.57
2.4.3.4.1 - <i>Instrumentação utilizada antes de 1982</i>	p.57
2.4.3.4.2 - <i>Instrumentação utilizada posterior a 1982</i>	p.58
2.4.3.4.3 - <i>Instrumentação utilizada posterior a 1982 com instrumentação importada e de fabricação no IPT</i>	p.60
2.4.3.4.4 - <i>Sistema Portátil desenvolvido no IPT</i>	p.60
2.4.3.5 - Instrumentação utilizada pela universidade Estadual Paulista – Ilha solteira ...	p.62
2.4.3.6 – Sistema utilizado por Matsumoto et al. (1992)	p.63
2.4.3.7 – Instrumentação utilizada por Cavalcante (2002) e comercializado pela PDI .	p.64
2.4.4 – Comentários finais	p.65
3 – TEORIA DA ONDA UNIDIMENSIONAL	p.66
3.1 – INTRODUÇÃO	p.66
3.2 - DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DA ONDA	p.66
3.3 - INFLUÊNCIAS DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO	p.72
3.3.1 – Extremidade da haste	p.72
3.3.1.1 – Extremidade da Haste Livre	p.73
3.3.1.2 – Extremidade da Haste Engastada	p.73
3.3.1.3 - Haste com Extremidade Semi-Engastada	p.75
3.3.2 - Atrito lateral na Haste	p.75
3.3.2 – Mudança de Impedância na Haste	p.77

3.4 - IMPACTO DO MARTELO SOBRE O CONJUNTO DE HASTES ..	p.80
3.4.1 – Impacto do Martelo Rígido Sobre o Conjunto de Haste	p.80
3.4.2 – Impacto do Martelo Elástico Sobre o Conjunto de Haste	p.82
3.4.3 – Impacto do Martelo Rígido com Coxim Elástico Sobre o Conjunto de Haste	p.91
3.4.3.1 – Coxim Macio em que $\beta^2 > \alpha^2$ e $k < 4Z_h^2/M_p$	p.92
3.4.3.2 – Coxim Macio em que $\beta^2 < \alpha^2$ e $k > 4Z_h^2/M_p$	p.94
3.5 - ENERGIA DE UMA ONDA LONGITUDINAL DE COMPRESSÃO	p.96
3.5.1 - Determinação de K_1	p.100
3.5.1.1 - Coeficiente de Correção K_1 conforme a Referência Internacional do SPT	p.100
3.5.1.2 - Coeficiente de Correção K_1 conforme Schmertmann e Palacios (1979)	p.101
3.5.2 – Determinação de K_2	p.104
3.5.2.1 - Coeficiente de Correção K_2 conforme a Referência Internacional do SPT	p.104
3.5.2.2 - Coeficiente de Correção K_2 conforme Schmertmann e Palacios (1979)	p.105
3.5.3 - Determinação de K_c	p.105
3.6 – PENETRAÇÃO DO AMOSTRADOR NO SOLO	p.106
4 – DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO	p.108
4.1 – INTRODUÇÃO	p.108
4.2 – CÉLULA DE CARGA	p.108
4.2.1 – Material da Célula de carga	p.109
4.3 – EXTENSÔMETROS	p.111
4.4 – ACELERÔMETROS	p.111
4.4.1 – Fixação dos Acelerômetros	p.111
4.5 – CIRCUITO ELÉTRICO UTILIZADO NA CÉLULA DE CARGA ..	p.113
4.6 – AMPLIFICADOR E CONDICIONADOR DE SINAL	p.114
4.6.1 –Da Célula de Carga	p.114
4.6.2 –Dos Acelerômetros	p.115

4.7 – PLACA CONVERSORA ANALÓGICA DIGITAL	p.116
4.8 – OSCILOSCÓPIO	p.117
4.9 – PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE SINAL	p.118
4.10 – CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA E DOS ACELERÔMETROS	p.120
4.11 – TRATAMENTO DOS SINAIS	p.120
5 – IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA	p.125
5.1 – DESENVOLVIMENTO TEÓRICO	p.125
5.2 – DISCRETIZAÇÃO	p.126
5.3 – MODELO CONSTITUTIVO DO SEGMENTO DAS HASTES	p.129
5.4 – CONDIÇÃO DE CONTORNO NO CONTATO DO CHOQUE ENTRE O MARTELO E A HASTE	p.129
5.5 – MODELO DE SMITH	p.130
5.6 – CONTROLE DE ENERGIA NO MÉTODO DE INTEGRAÇÃO EXPLÍCITA	p.130
6 – ANÁLISE TEÓRICA	p.134
6.1 – INTRODUÇÃO	p.134
6.2 – ENERGIA POTENCIAL GRAVITACIONAL DO SISTEMA	p.136
6.2.1 – Energia Contida no Martelo e na Haste ao longo do tempo devido à aplicação de um golpe	p.142
6.3 – TRABALHO EXERCIDO SOBRE O SOLO	p.146
6.4 – ANÁLISES COMPLEMENTARES	p.148
6.4.1 – Influência da Variação da Seção da Haste no Valor da Energia Entregue ao Solo	p.148
6.4.2 – Análise da Rigidez do Martelo	p.149
6.5 – ANÁLISE DA EQUAÇÃO DE ENERGIA	p.150

6.5.1 – Análise da velocidade da partícula	p.151
6.5.2 – Análise do valor da energia obtido com o auxílio da instrumentação	p.153
6.5.3 – Correção do valor da energia quando a leitura inicial da célula de carga foi zerada	p.158
6.6 – COMENTÁRIOS FINAIS	p.159
7 – ANÁLISE EXPERIMENTAL	p.161
7.1 – INTRODUÇÃO	P.161
7.2 – METODOLOGIA	p.161
7.2.1 – Montagem do Equipamento	p.161
7.2.2 – Equipamento	p.162
7.2.3 – Solo	p.165
7.2.4 – Ensaios	p.166
7.3- Resultados	p.169
7.3.1 – Sinais de Força e Velocidade	p.169
7.4 – ANÁLISE DOS RESULTADO	p.181
7.4.1 – Instrumentação Posicionada Junto a Cabeça de Bater	p.181
7.4.1.1 – Instrumentação Posicionada Junto a Cabeça de Bater – Re- análise dos Resultados de Cavalcante(2002)	p.187
7.4.2 – Instrumentação Posicionada Junto ao Amostrador	p.190
7.4.2.1 – Instrumentação Posicionada Junto ao Amostrador – Re-análise dos Resultados de Cavalcanti (2002)	p.196
7.5 – COMENTÁRIOS FINAIS.....	p.199
8 – APLICAÇÕES À PRÁTICA DE ENGENHARIA.....	p.201
8.1 – INTRODUÇÃO	p.201
8.2 – EXEMPLOS EM ARGILA	p.201

8.2.1 – Argilas Moles de Porto Alegre – Aeroporto Salgado Filho	p.205
8.2.2 – Argilas Moles de Recife – Clube Internacional do Recife	p.208
8.2.3 – Aterro Experimental de Sarapuí	p.210
8.3 – EXEMPLO EM AREIAS	p.213
8.4 – COMENTÁRIOS FINAIS	p.218
9 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	p.219
9.1 – CONCLUSÕES	p.219
9.1.1 - Instrumentação	p.219
9.1.2 - Tratamento do sinal	p.219
9.1.3 - Interpretação de sinais	p.220
9.2 – SUGESTÃO PARA FUTURAS PESQUISAS	p.222
9.2.1 – Quanto ao equipamento	p.222
9.2.2 – Quanto ao programa de simulação numérica	p.223
9.2.3 – Quanto à continuidade do programa experimental	p.223
9.3 – QUANTO A NBR 6484 DE 2001	p.224
10 - BIBLIOGRAFIA	p.225

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	- Simulação numérica de golpe de martelo sobre uma haste	p.29
Figura 2.1	- Tipos de martelo usados no SPT (denominações na Tabela 2.1)	p.40
Figura 2.2	- Esquema de levantamento do martelo com “cathead” (Kovacs e Salomone, 1982)	p.41
Figura 2.3	- Gatilhos Manuais. (A) Sistema Argentino (Ireland, 1966); (B) Sistema Japones (Clayton, 1993); (C) Sistema de Furnas (Belincanta, 1998)	p.44
Figura 2.4	- Amostrador padrão segundo Referência Internacional (IRTR / ISSMFE, 1988)	p.45
Figura 2.5	Exemplo de resultado de um ensaio típico	p.50
Figura 2.6	- Sistema de medida de velocidade de queda de martelo por Matsumoto et al (1992)	p.54
Figura 2.7	- Sistema de radar para determinar a velocidade de queda do martelo da PDI	p.55
Figura 2.8	- Esquema da instrumentação (Palacios, 1977)	p.56
Figura 2.9	- Esquema da instrumentação utilizada no IPT antes de 1982. (Belincanta, 1985)	p.58
Figura 2.10	- Esquema de instrumentação utilizada em trabalhos no IPT, quando do uso de instrumentação importada. (Belincanta, 1985)	p.59
Figura 2.11	- Esquema de instrumentação utilizada em trabalhos no IPT, quando do uso de instrumentação importada e célula de carga IPT. (Belincanta, 1985)	p.60
Figura 2.12	- Sistema portátil de aquisição de dados do tipo IPT. (Belincanta, 1998)	p.61
Figura 2.13	- Esquema dos dispositivos de medição e funcionamento do sensor de deslocamento (Menezes & Sobrinho, 1994)	p.63
Figura 3.1	- Formação da Onda Longitudinal de Tensão	p.67
Figura 3.2	- Representação esquemática da propagação de uma onda de tensão em uma haste de sondagem.	p.69
Figura 3.3	- Comportamento das ondas no instante t (Gonçalves et. Al. , 2000)	p.71
Figura 3.4	- Comportamento das ondas no instante t+dt. (Gonçalves et. Al., 2000)	p.71
Figura 3.5	- Condição de contorno na ponta da haste. (Gonçalves et. al., 2000)	p.73
Figura 3.6	- Reflexão das ondas de força e Velocidade na ponta da haste. (Gonçalves et. al., 2000)	p.74
Figura 3.7	- Onda gerada num ponto intermediário da haste – Atrito Lateral (Gonçalves	

	et. al., 2000)	p.76
Figura 3.8	- Propagação da onda de tensão em um ponto de descontinuidade. (Bernardes, 1989)	p.77
Figura 3.9	- Onda de impacto para um martelo rígido e um conjunto de hastes elásticas. (Bernardes, 1989)	p.80
Figura 3.10	- Esquema do impacto do martelo no conjunto de hastes.	p.83
Figura 3.11	- Esquema de geração de impulsos de tensão.	p.85
Figura 3.12	- Esquema do mecanismo de propagação de ondas longitudinais de tensão no interior da haste. (Schmertmann ePalacios, 1979)	p.90
Figura 3.13	- Sistema martelo, coxim e haste. (Bernardes, 1989)	p.91
Figura 3.14	- Influência da rigidez do coxim na onda de força.	p.95
Figura 3.15	- Cálculo da energia de deformação	p.96
Figura 3.16	- Coeficiente de Correção K_1 (IRTP / ISSMFE, 1988)	p.100
Figura 3.17	- Comparação entre uma curva real de força e uma teórica ao longo do tempo. (Schmertmann e Palacios, 1979)	p.101
Figura 3.18	- Coeficiente de correção K_2 (IRTP / ISSMFE 1988)	p.105
Figura 3.19	- Curva Força, Pulsos e Penetração do Amostrador no Solo (Schmertmenn e Palacios 1979)	p.107
Figura 4.1	- Projeto Geométrico da Célula de Carga	p.109
Figura 4.2	- Gráfico de revenimento	p.110
Figura 4.3	- Detalhe da Fixação dos Acelerômetros	p.112
Figura 4.4	- Detalhe da Ponte de Wheastone	p.113
Figura 4.5	- Detalhe das ligações dos “ <i>strain gages</i> ”	p.114
Figura 4.6	- Tela do Programa de aquisição de Sinal	p.119
Figura 4.7	- Sinal de força e aceleração visualizado no campo – Haste 35 metros	p.120
Figura 4.8	- Curva de calibração da célula de carga	p.121
Figura 4.9	- Sinal de aceleração com necessidade de correção. (eliminação dos picos indesejáveis)	p.122
Figura 4.10	- Sinal de aceleração com necessidade de correção (Rebatimento do sinal através da subtração de uma reta)	p.123
Figura 4.11	- Sinal de aceleração plotado em freqüência	p.124
Figura 5.1	- A) Discretização da haste e do Martelo; B) Modelo de Smith	p.127
Figura 5.2	- Exemplo de simulação numérica de haste com impedância constante	p.132

Figura 5.3	- Exemplo de simulação numérica de haste com impedância variável devido à presença de luvas e do amostrador	p.133
Figura 6.1	- Simulação numérica de um Golpe em haste de 12,6m.	p.135
Figura 6.2	- Definições para o cálculo das energias potenciais gravitacionais do martelo e da haste	p.136
Figura 6.3	- Fairhurst (1961) – Sistema básico de percussão empregado para desmonte de rocha	p.138
Figura 6.4	- Dados do Exemplo	p.143
Figura 6.5	- Gráfico de energia do martelo. A) Energia potencial gravitacional e energia cinética; B) Energia elástica e energia de amortecimento dinâmico ..	p.144
Figura 6.6	- Gráfico de energia de haste. A) Energia potencial gravitacional e energia cinética; B) Energia elástica e energia de amortecimento dinâmico	p.145
Figura 6.7	- Energia entregue para o solo ao longo do tempo	p.146
Figura 6.8	- Gráfico de velocidade $V = -c.\varepsilon$ e $V = (u_{3i} + u_{3i+1}) / \Delta t$	p.152
Figura 6.9	- Velocidade de corpo rígido de uma haste	p.153
Figura 6.10	- Sinal de força e de $F=VZh$ junto a cabeça de bater	p.156
Figura 6.11	- Evolução do valor de energia ao longo do tempo obtido para as três posições	p.157
Figura 6.12	- Evolução da penetração ao longo do tempo obtido para as três posições	p.157
Figura 6.13	- Esquema das forças atuantes em um ponto qualquer de uma haste	p.158
Figura 7.1	- Esquema de montagem dos ensaios	p.163
Figura 7.2	- Composição de haste utilizada nos ensaios com haste de 5,80 metros	p.164
Figura 7.3	- Composição de haste utilizada nos ensaios com haste de 11,80 metros	p.164
Figura 7.4	- Composição de haste utilizada nos ensaios com haste de 18,80 metros	p.165
Figura 7.5	- Composição de haste utilizada nos ensaios com haste de 35,80 metros	p.167
Figura 7.6	- Sinais com instrumentação instalada junto à cabeça de bater – haste de 5,8m	p.170
Figura 7.7	- Sinais com instrumentação instalada junto ao amostrador – Haste de 5,8m ..	p.171
Figura 7.8	- Sinais com instrumentação instalada junto à cabeça de bater – Haste de 11,8m	p.172
Figura 7.9	- Sinais com instrumentação instalada no centro da haste – Haste de 11,8m ..	p.173
Figura 7.10	- Sinais com instrumentação instalada junto ao amostrador – Haste de 11,8m ..	p.174
Figura 7.11	- Sinais com instrumentação instalada junto à cabeça de bater – Haste de	

	18,8m	p.175
Figura 7.12	- Sinais com instrumentação instalada no centro da haste – Haste de 18,8m ..	p.176
Figura 7.13	- Sinais com instrumentação instalada junto ao amostrador – Haste de 18,8m	p.177
Figura 7.14	- Sinais com instrumentação instalada junto à cabeça de bater – Haste de 35,8m	p.178
Figura 7.15	- Sinais com instrumentação instalada no centro da haste – Haste de 35,8m ..	p.179
Figura 7.16	- Sinais com instrumentação instalada junto ao amostrador – Haste de 35,8m	p.180
Figura 7.17	- Resultados para haste de 5,8m	p.183
Figura 7.18	- Resultados para haste de 11,8m	p.183
Figura 7.19	- Resultados para haste de 18,8m	p.184
Figura 7.20	- Resultados para haste de 35,8m	p.185
Figura 7.21	- Energias versus penetração	p.186
Figura 7.22	- Eficiência η_1 em função do comprimento da haste	p.187
Figura 7.23	- Energias versus penetração – Dados de Cavalcante (2002)	p.189
Figura 7.24	- Eficiência η_1 em função do comprimento da haste. Cavalcante (2002)	p.190
Figura 7.25	- Energia versus penetração – Haste de 5,80m	p.192
Figura 7.26	- Energia versus penetração – Haste de 11,80m	p.192
Figura 7.27	- Energia versus penetração – Haste de 18,80m	p.193
Figura 7.28	- Energia versus penetração – Haste de 35,80m	p.193
Figura 7.29	- Erro na estimativa da energia entregue ao solo versus comprimento da haste e penetração	p.197
Figura 7.30	- Energia versus penetração – Comprimento de haste variável – Dados de Cavalcante (2002)	p.198
Figura 7.31	- Erro na estimativa da energia entregue ao solo versus comprimento da haste e penetração, dados de Cavalcante (2002)	p.199
Figura 8.1	- Relação entre o coeficiente de adesão para estacas cravadas e a resistência não drenada das argilas, segundo Tomilson (1969). (a partir de Simons & Menzies, 1981)	p.204
Figura 8.2	- Relação entre o coeficiente de adesão para estacas cravadas e a resistência não drenada das argilas, segundo Flaate (1968). (a partir de Simons & Menzies, 1981)	p.205
Figura 8.3	- Perfil de sondagem SPT – Aeroporto Salgado Filho (adaptado do livro Aeroporto)	p.206

Figura 8.4	- Compilação de resultados de Su obtidos por ensaios UU e CPTU e a partir da presente proposta	p.207
Figura 8.5	- Perfil de sondagem SPT – Clube Internacional do Recife (adaptado de Coutinho et al., 2000)	p.208
Figura 8.6	- Compilação de resultados de Su obtidos por ensaios UU e Vane e a partir da presente proposta	p.209
Figura 8.7	- Perfil de sondagem SPT – Aterro experimental de Sarapuí, (Ortigão, 1980)	p.210
Figura 8.8	- Compilação de resultados de Su obtidos por ensaios de vane e a partir da presente proposta	p.211
Figura 8.9	- Ângulo de atrito versus N_{spt} , (de Mello, 1971)	p.214
Figura 8.10	- Resultado para Areias Finas com coesão igual a zero	p.217
Figura 8.11	- Resultado para Areias (Conjunto) com coesão de 24 kPa	p.217

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Resultados dos estudos de Casagrande & Casagrade (Kovacs et al., 1977)	p.33
Tabela 2.2	- Características dos martelos apresentados na Figura (2.2)	p.38
Tabela 2.3	- Comparativo da variação da energia ER_r par sistemas “cathead” (Kovacs e Salomone, 1982)	p.41
Tabela 2.4	- Características das hastes de sondagem	p.46
Tabela 2.5	- Fórmulas para o cálculo da eficiência	p.52
Tabela 3.1	- Ondas Refletidas pela descontinuidade da haste. (Bernardes, 1989)	p.79
Tabela 6.1	- Relação de energia $\Delta EPG_{m+h} / E^*$ para haste não submersa	p.140
Tabela 6.2	- Relação de energia $\Delta EPG_{m+h} / E^*$ para haste submersa	p.141
Tabela 7.1	- Resumo dos resultados da instrumentação posicionada junto à cabeça de bater	p.182
Tabela 7.2	- Dados experimentais de Cavalcante (2002) – instrumentação posicionada junto à cabeça de bater	p.188
Tabela 7.3	- Resumo dos resultados da instrumentação posicionada junto ao amostrador	p.191
Tabela 7.4	- Dados experimentais de Cavalcante (2002) – instrumentação posicionada junto ao amostrador	p.198
Tabela 8.1	- Fatores de incremento de carga. (Hermansson e Grävare, 1978; citados por Bernardes et al 2000)	p.202
Tabela 8.2	- Cálculo de S_u a partir do SPT–Aeroporto Salgado Filho–Porto Alegre	p.207
Tabela 8.3	- Cálculo de S_u a partir do SPT – Clube Internacional do Recife	p.209
Tabela 8.4	- Cálculo de S_u a partir do SPT – Aterro experimental de Sarapuí – S1 ..	p.211
Tabela 8.5	- Cálculo de S_u a partir do SPT – Aterro experimental de Sarapuí – S2 ..	p.212
Tabela 8.6	- Cálculo de S_u a partir do SPT – Aterro experimental de Sarapuí – S3 ..	p.212
Tabela 8.7	- Fatores de capacidade de carga N_c e N_σ segundo Vesic. (fonte Velloso & Lopes, 2002)	p.216

LISTA DE FOTOS

Foto 2.1	- a)Segmento de 1 m de haste instrumentada com strain-gauges, mostrando os locais para fixação de acelerômetros; b) conjunto de acelerômetros e unidade de aquisição de dados, SPT Analyzer. (Cavalcante et. Al - 2002)	p.64
Foto 4.1	- Detalhe de fixação dos acelerômetros	p.112
Foto 4.2	- Detalhe da célula de carga	p.114
Foto 4.3	- Amplificador e Condicionador de Sinal	p.116
Foto 4.4	- Célula de carga, acelerômetros, amplificador, osciloscópio e micro computador	p.117
Foto 4.5	- Tela do osciloscópio	p.118
Foto 7.1	- Prédios utilizados na campanha experimental	p.161
Foto 7.2	- Seqüência de montagem da câmara de areia	p.168

LISTA DE SÍMBOLOS

α	- Coeficiente de adesão;
γ	- Peso específico do solo;
η_1	- Eficiência devido ao golpe do martelo;
η_2	- Eficiência devido ao comprimento da haste;
η_3	-
ρ	- Massa específica do aço ($\rho = 7810 \text{ kg/m}^3$)
σ	- Tensão;
ξ	- Energia;
Δl	- Distância entre a cabeça de bater e a instrumentação;
$\Delta\rho$	- Penetração do amostrador no solo;
$\Delta EPG_{m+h}^{\text{sistema}}$	- Variação da Energia do sistema;
A	- Área da seção transversal da haste;
A_p	- Área da seção transversal do martelo;
A_b	- Área da base do amostrador;
A_s	- Área lateral do amostrador;
a_c	- Aceleração da partícula;
c	- Velocidade de propagação da onda (no caso de hastes metálicas $c = 5120 \text{ m/s}$);
c	- Coeficiente de amortecimento dinâmico;
D	- Diâmetro do amostrador;
E	- Energia;
E	- Módulo de elasticidade do aço ($E = 210 \text{ Gpa}$);

E^*	- Energia potencial gravitacional de referência, segundo procedimento internacional;
E^\bullet	- Energia potencial gravitacional teórica segundo NBR 6484
E_{PG}	- Energia potencial gravitacional;
E_{PE}	- Energia potencial gravitacional elástica;
E_C	- Energia cinética;
E_D	- Energia dissipada pelo critério de amortecimento;
E_S	- Energia entregue ao solo;
E_{TOT}	- Energia total;
E_{hi}	- Energia cinética do martelo no instante do impacto estimada através de V_{hi} ;
E_r	- energia transferida à haste referente à primeira onda de compressão incidente;
ER_{hi}	- Eficiência da energia cinética disponível no martelo no instante do impacto;
ER_i	- Eficiência da energia cinética transferida à haste na primeira onda longitudinal de compressão incidente
ER_r	- Eficiência de energia transferida à haste referente à primeira onda longitudinal de compressão incidente;
ER_v	- Eficiência da energia cinética do martelo no instante do impacto;
E_v	- Energia cinética do martelo no instante do impacto;
F	- Força ;
F_{hn}	- N-ésimo impulso de Força transferida à haste ;
$f_i(t)$	- Força inercial da massa;
$f_D(t)$	- Força de amortecimento dinâmico;
$f_s(t)$	- Força elástica;
g	- Aceleração da gravidade ($g = 980,6 \text{ cm/s}^2$);
h	- Altura de queda do martelo;
k	- Constante de rigidez do coxim do martelo;
K_1	- Coeficiente de correção que leva em consideração a posição da instrumentação;
K_2	- Coeficiente de correção teórico que leva em consideração o comprimento da haste;

K_c	- Coeficiente de correção que leva em consideração velocidade de propagação da onda no aço;
L	- Altura do martelo;
L_o	- Comprimento Equivalente da Haste;
ℓ	- Comprimento da haste;
M_h	- Massa da Haste;
$M_p = M_m$	- Massa do Martelo;
m	- Massa do nó;
N_c	- Coeficiente de capacidade de carga;
N_q	- Coeficiente de capacidade de carga;
N_σ	- Coeficiente de capacidade de carga;
n	- Número de pulsos transferidos para a haste;
$n\ell$	- Eficiência de energias;
r	- Razão de impedâncias;
R_p	- Resistência na ponta da haste;
S_u	- Resistência não drenada da argila;
t	- Tempo;
u	- Deslocamento;
u'	- Velocidade da partícula;
u''	- Aceleração da partícula;
V	- Velocidade da partícula animada durante a passagem da onda;
V_{hi}	- Velocidade de queda do martelo imediatamente antes do impacto, estimada através da força de impacto;
V	- Velocidade de queda do martelo imediatamente antes do impacto;
V_o	- Velocidade inicial do martelo;
V_p	- Velocidade da onda na ponta da haste;
W_p	- Massa do martelo;
W	- Atrito Lateral na haste;
y	- Deslocamento do martelo;
y''	- Aceleração do martelo;
Z	- Impedância;

Z_h	- Impedância da haste;
Z_p	- Impedância do Martelo;
$\downarrow f$	- Representação da função qualquer de uma onda longitudinal descendente;
$\uparrow f$	- Representação da função qualquer de uma onda longitudinal ascendente;
$\downarrow v$	- Velocidade da partícula no sentido descendente;
$\uparrow v$	- Velocidade da partícula no sentido ascendente;
$\downarrow F$	- Força de compressão no sentido descendente;
$\uparrow F$	- Força de compressão no sentido ascendente;
$-\downarrow F$	- Força de tração no sentido descendente;
$-\uparrow F$	- Força de tração no sentido ascendente;
F_p	- Força no martelo devido à propagação da onda de tensão;
F_h	- Força na haste devido a propagação da onda de tensão;
W_{nc}	- Trabalho efetuado por forças não conservativas;

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O SPT (Standart Penetration Test) é sem dúvida o sistema de investigação mais utilizado no Brasil e no mundo pela engenharia geotécnica e pela engenharia de fundações. A sua simplicidade e robustez, aliadas ao baixo custo do equipamento e a experiência empírica acumulada na execução do ensaio e sua interpretação fazem desta sondagem uma ferramenta indispensável à prática de engenharia.

Embora de uso corrente, o ensaio tem sido objeto freqüente de críticas da comunidade acadêmica, que abrangem aspectos relacionados à dispersão de resultados, dependência do operador e diversidade de equipamentos e procedimentos. Estas limitações motivaram o desenvolvimento de estudos a partir da década de 70 de medição de energia visando a padronização do ensaio, sendo inúmeras as contribuições nesta área (e.g. Schmertmann & Palácios, 1979; Belincanta, 1985,1998; Kovacs, 1979,1980,1981; Cavalcante, 2002). Estes estudos procuraram identificar a influência na medida de penetração N_{spt} de fatores associados às divergências encontradas nas especificações geométricas dos componentes mecânicos utilizados nos ensaios bem como 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. A uniformização dos resultados tem sido direcionada à correção do valor do N_{spt} para um valor único de energia, sendo o valor de energia de referência adotado segundo o consenso internacional de 60% da energia teórica produzida pela queda do martelo (IRTP/ISSMFE (1988); Skempton, 1986).

Para a determinação da energia transferida às hastes recomenda-se uma instrumentação composta por uma célula de carga e um par de acelerômetros (e.g Farrar, 1988; Butler et al, 1998). Esta instrumentação registra a passagem da onda longitudinal de compressão gerada pela ação de um golpe do martelo e através da integração do produto da força e velocidade ao longo do tempo determina-se a energia contida nessa onda. A energia contida na onda longitudinal de compressão, decorrente do golpe do martelo, é utilizada na correção do valor do N_{spt} para o valor de energia de referência internacional (N_{60}), Skempton (1986).

O presente trabalho apresenta um estudo detalhado da monitoração de energia durante a cravação do amostrador no ensaio SPT, bem como da identificação dos fatores que influenciam estas medidas. Para tanto foi desenvolvido o equipamento para a aquisição dos sinais de força e de aceleração objetivando a correta determinação da energia efetivamente transferida às hastes. Este equipamento consta do desenvolvimento da célula de carga, amplificadores e condicionadores de sinais de força e aceleração, sistema de aquisição de sinal e tratamento numérico dos registros. Esta é uma experiência brasileira de desenvolvimento de tecnologia nesta área, combinando aquisição de sinais com interpretação de registros através de *software* aberto. Assim o estudo compreende o desenvolvimento de um programa embasado na técnica de diferenças finitas que simula numericamente o ensaio, inclusive a mecânica de transferência de energia às hastes. De posse dessa ferramenta e tecnologia efetuou-se uma extensa campanha de ensaios totalmente controlados em um tanque de areia com densidade relativa constante. Os resultados da campanha experimental, associado aos fundamentos e princípios básicos da física, permitiram uma análise racional do ensaio e a proposição de uma nova abordagem de interpretação.

Esta nova abordagem de interpretação do ensaio não visa somente à determinação da energia contida na onda que percorre a haste gerada pela ação do golpe, mas a determinação da energia efetivamente entregue ao solo e com isso o conhecimento do valor da força resultante de reação do solo que atua contra o amostrador. O conhecimento desta força abre uma gama de alternativas para a estimativa de propriedades de comportamento de solos com base em resultados de medidas de SPT.

É importante ressaltar que todos os resultados desta pesquisa, bem como as abordagens de interpretação propostas, se referem a ensaios realizados rigorosamente de acordo com as recomendações da Norma Brasileira e das especificações e procedimentos descritos no padrão internacional (IRTP/ISSMFE, 1988). Os métodos distintos àqueles normatizados, que coexistem na prática, e suas possíveis influências nas medidas de penetração não são objeto deste estudo.

A seguir são apresentadas algumas definições importantes para a correta interpretação do trabalho.

1.1 - DEFINIÇÕES

1.1.1 - Golpe, Impacto e Pulso.

Quando o martelo entra em contato com a haste, surgem imediatamente duas ondas longitudinais de tensão que se propagam em sentidos opostos: uma onda ascendente no martelo, e outra descendente na haste com velocidade de propagação c . No tempo $t = L/c$, onde L é igual ao comprimento do martelo, a onda de tensão gerada no instante do impacto do martelo com a haste é refletida na parte superior do martelo atingindo novamente o ponto de contato do martelo com a haste no tempo $t = 2L/c$. Como houve uma desaceleração no martelo e a velocidade das partículas da haste ainda é mesma há um desequilíbrio de velocidades. Este equilíbrio é restabelecido com a introdução de um novo pulso de tensão na haste, este de menor intensidade, gerando um novo pulso ascendente no martelo e um pulso descendente na haste. Este processo é repetido sucessivamente até o amortecimento final do martelo ou a chegada da onda longitudinal de tensão refletida na extremidade inferior da haste, separando momentaneamente o martelo da composição de hastes. Esse processo é retomado quando do novo impacto do martelo sobre a haste.

Portanto, um *golpe* de martelo é formado por vários *impactos* e cada impacto é formado por vários *pulsos*. A duração de cada pulso é função da altura do martelo ($t = 2L/c$). A duração do impacto é função do comprimento da haste ($t = 2l/c$). O tempo de duração entre cada impacto é função do tipo de solo, ou seja, quanto menor a resistência do solo maior a penetração e maior o tempo entre impactos. A quantidade de impactos em um mesmo golpe é função do solo e do comprimento da haste. Um golpe em hastes curtas é formado por vários impactos representativos, já em hastes longas um golpe pode ser formado por um único impacto representativo.

1.1.2 - Ondas de Compressão Incidentes

A Figura 1.1 apresenta o resultado de uma simulação numérica de um golpe de martelo. Esta figura é interessante, na medida em que fornece uma ilustração da transferência de energia às

hastes incluindo as diversas ondas que percorrem a composição e a sua influência na penetração do amostrador devido à aplicação de um golpe do martelo.

O exemplo refere-se a um golpe de um martelo de 65kg com 75cm de altura de queda inicial caindo sobre uma haste de 12,6 metros (ver Figura 6.4). Os parâmetros adotados neste exemplo procuram simular o mais próximo possível um golpe de martelo e, portanto, todos os parâmetros estão rigorosamente em acordo com a NBR 6484.

Nas curvas que representam as trajetórias da base inferior do martelo e do topo da cabeça de bater é possível identificar os diversos impactos; na figura, os intervalos entre os pontos 1 e 2 correspondem ao primeiro impacto; 3 e 4 ao segundo impacto; 5 e 6 ao terceiro impacto; 7 e 8 ao quarto impacto. No sinal de força e velocidade é possível verificar também os pontos do impacto, ou seja, de A a B; de E a G; de K a L representa-se respectivamente o primeiro, segundo, terceiro impacto. O primeiro impacto introduz na haste a primeira onda de compressão incidente, do ponto A até B. A onda refletida na parte superior da haste retorna em direção do amostrador dando início a segunda onda de compressão incidente, referente ainda ao primeiro impacto, do ponto B até C. Do ponto C a D tem-se a terceira onda de compressão incidente. A quarta onda de compressão, referente ao primeiro impacto que vai do ponto D a F, é perturbada pelo segundo impacto. A partir desse instante tem-se a onda gerada pelo primeiro e segundo impacto. Os impactos subseqüentes geram novas ondas que vão se sobrepondo tornando a interpretação do sinal cada vez mais complexa.

A penetração do amostrador no solo devido à aplicação de um golpe só se inicia após a chegada da primeira onda de compressão incidente (ponto a) que ocorre a um tempo $t = \ell/c$ do instante início do primeiro impacto. A chegada da segunda e terceira onda de compressão é percebida na cravação do amostrador nos pontos b e c respectivamente. É visível nesse gráfico (Figura 1.1) que a segunda e terceira onda de compressão tem uma contribuição significativa na cravação do amostrador. Esse fato também é percebido quando da chegada do segundo impacto, ponto que sem dúvida contribui na cravação do amostrador. Já os demais impactos não são tão significativos no que diz respeito à cravação do amostrador no solo.

A importância das ondas de compressão incidentes, subseqüentes ao primeiro impacto, na cravação do amostrador é função da resistência do solo e do comprimento da haste. Sua

importância na interpretação do ensaio é discutida neste trabalho, indicando-se a influência do comprimento da composição de hastes na energia efetivamente transferida ao amostrador.

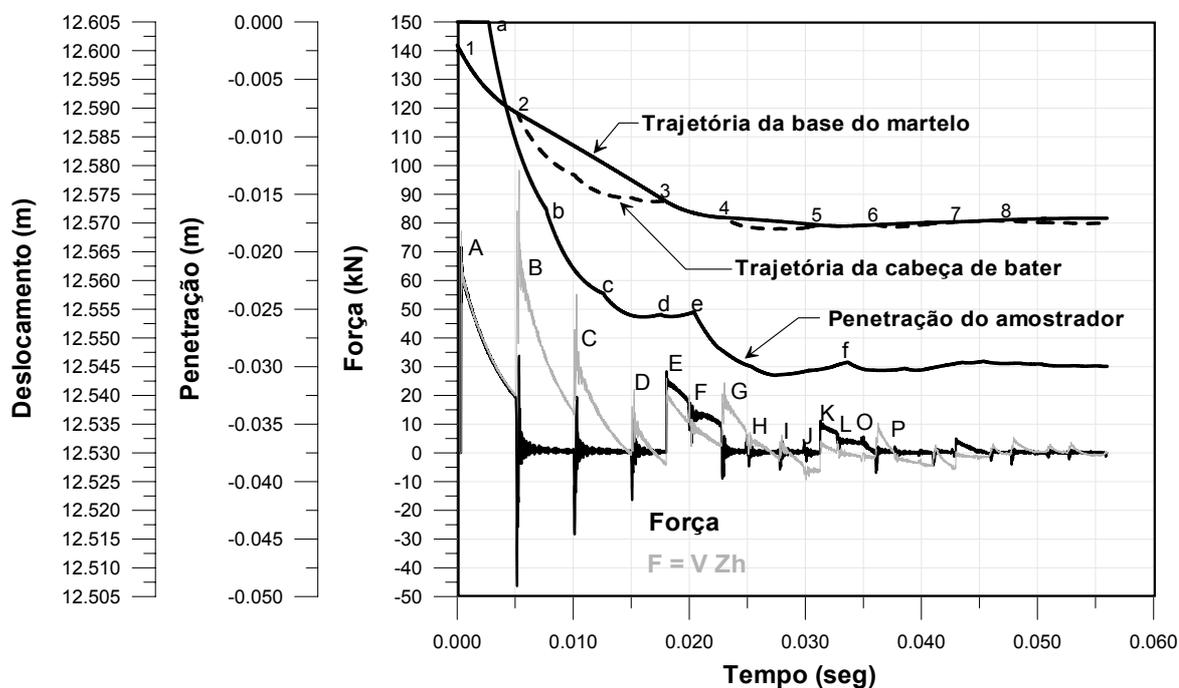


Figura 1.1 – Simulação numérica de golpe de martelo sobre uma haste.

1.2 - ORGANIZAÇÃO DA TESE

O presente trabalho está basicamente dividido em 3 partes distintas. A primeira composta pelos Capítulos 2 e 3 refere-se a uma revisão bibliográfica da história do SPT, destacando-se os estudos que levaram à padronização do ensaio, tipos de equipamentos utilizados na sondagem, equipamentos utilizados nas medidas de energia e sua evolução (Capítulo 2), além de uma completa revisão na teoria matemática contida não só interpretação da equação da onda, mas também nas distintas propostas de correção dos valores de energia obtidos (Capítulo 3). A segunda parte se refere às ferramentas desenvolvidas no presente trabalho, sistema de aquisição do sinal gerado pela passagem da onda longitudinal de tensão por um ponto da haste (Capítulo 4) e o desenvolvimento de um programa de simulação numérica para a interpretação do ensaio (Capítulo 5). A terceira parte deste trabalho é composta por uma análise teórica (Capítulo 6), análise experimental (Capítulo 7) e uma tentativa de aplicação prática da nova proposta de interpretação do ensaio (Capítulo 8). Acrescido a estes capítulos é apresentado o Capítulo 9 de conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - INTRODUÇÃO

A história do ensaio SPT (“Standart Penetration Test”) tem sido relatada tanto na literatura internacional (Fletcher, 1965; Kovacs et al, 1981; Broms e Flodin, 1988; entre outros) como nacional (Vargas, 1989; Teixeira, 1993 e Belincanta, 1994). A sondagem SPT, segundo os autores citados, data do início do século, passando por uma fase de grande desenvolvimento até o final da década de 50, quando houve a primeira tentativa de normalização. Na década de 60, verifica-se um período de descrédito do SPT, após a publicação do trabalho de Casagrande e Casagrande (1968). Entretanto, na década de 70 inicia-se uma nova fase, na qual é reconhecida a importância da energia existente no martelo no instante do impacto, bem como sua transferência à haste e desta ao amostrador com os trabalhos de Kovacs (1977, 1979, 1981), Palacios (1977), Schmertmann e Palacios (1979), Belincanta (1985). Estes trabalhos demonstraram que o valor de N_{spt} está diretamente associado às características do equipamento utilizado, principalmente no que diz respeito à forma de liberação do martelo, e levaram Seed et al. (1985) e Skempton (1986) a propor um fator de correção no valor do N_{spt} que leva em consideração a energia efetivamente transferida à haste. A importância desta correção é hoje reconhecida e tem sido gradativamente incorporada à prática de engenharia (e.g. Clayton 1993)

Este capítulo apresenta uma breve revisão histórica do ensaio SPT, uma descrição dos equipamentos utilizados na prática da execução do ensaio, cita as recomendações de padronização e apresenta alguns equipamentos e metodologias utilizadas ao longo da história no que diz respeito a medidas de energia. Esta revisão é baseada nos trabalhos de Belincanta (1985) e Belincanta (1998).

2.1.1 - História do SPT

O primeiro relato do ensaio do SPT data de 1902, quando o Coronel Charles R. Gow desenvolveu um amostrador de 25 mm de diâmetro, cravado dinamicamente com auxílio de um peso de 50 kg de massa, no fundo do furo de sondagem. Com este amostrador foi possível a obtenção de amostras chamadas de “Dry Sample”, que permitiam uma melhor descrição do tipo do solo e de suas propriedades do que às obtidas anteriormente extraídas da água de circulação utilizada na perfuração do furo de sondagem.

Em 1927, Harry A. Mohr gerente da The Gow Company, subsidiária da Raymond Concrete Pile Company e G.F.A Fletcher, desenvolveram o amostrador composto de três partes (cabeça, corpo e sapata biselada) com 51mm de diâmetro externo, denominado amostrador tipo Raymond. Nesta época um amostrador semelhante foi desenvolvido pela empresa Sprague & Henwood de Scranton.

Em 1930 Mohr e Fletcher apresentaram as primeiras especificações da sondagem, passando a ser interpretada como um ensaio, onde o resultado era o número de golpes necessários para cravar o amostrador, em um segmento de 305 mm, dentro do solo, com auxílio de um martelo de 63,5 kg, caindo de uma altura de 762 mm. A massa do martelo de 63,5 kg foi adotada por Mohr, a partir da média das massas dos martelos utilizados para cravar o amostrador usado na região de Boston, na década de 20, sendo estes passíveis de levantamento manual com auxílio de uma corda, passando por uma roldana, por dois auxiliares de sondagem. A geometria do martelo, inicialmente de concreto, era de forma prismática, contendo um coxim de madeira dura e um pino-guia, similar ao utilizado até hoje no Brasil. A este martelo é dado o nome de “pin guided hammer”.

Com o intenso uso da sondagem/ensaio nas investigações geotécnicas, e com a sua crescente mecanização, verificou-se que as hastes usadas de 25,4 mm de diâmetro nominal interno, pesando 3,2 kg/m, eram frágeis e por volta de 1945 passaram a ser substituídas por haste de maior rigidez, como as do tipo A usadas em de sondagem rotativa.

Terzaghi e Peck em 1948 publicam, em seu livro, o procedimento de execução da sondagem com perfuração por circulação de água, utilizando um revestimento de 63,5 mm de diâmetro, hastes de 25,4 mm e amostrador do tipo Raymond de 51 mm e 35 mm de diâmetro externo e interno respectivamente. Neste livro, os autores, ressaltam que uma maneira simples de se

estimar o grau de compactidade *in situ* do solo seria o de contar o número de golpes necessários para cravar o amostrador 305mm, após um assentamento inicial de 152mm. A este procedimento foi dado o nome de Standart Penetration Test (SPT). Como o procedimento inicial utilizava o amostrador Raymond o mesmo passou a ser também conhecido como amostrador tipo Terzaghi & Peck.

Apesar da publicação de Terzaghi e Peck, no final da década de quarenta, Hvorslev (1949) ressaltou a falta de padronização como a principal restrição ao ensaio SPT. Na região da Nova Inglaterra e mesmo na “Gow Division” da própria Raymond Concrete Pile Company” usavam-se amostradores de 25,4mm de diâmetro interno e revestimento de 51mm de diâmetro nominal, ao invés do amostrador Raymond. Outro problema de normalização era referente a contagem do número de golpes, que iniciava a partir do ponto de apoio do amostrador e não a partir de cravação de 152mm iniciais.

Em 1954, Parson propõe o registro do número de golpes para cada um dos três intervalos de 152 mm de penetração do amostrador, sendo a resistência à penetração dada pela soma mínima dos golpes de dois intervalos. Sua intenção era a de minimizar as perturbações no valor de N_{spt} provenientes principalmente da presença de pedregulhos. Segundo Kovacs et al. (1981), com base na proposta de Parson e no início da fase de normalização do ensaio, fica estabelecido, em meados da década de 50, a definição da resistência à penetração como sendo o número de golpes necessários para cravar 305 mm do amostrador após seu assentamento inicial de 152 mm.

Em 1958 é publicada a primeira norma D1586-58T da ASTM (American Society for Testing and Materials). Esta norma especifica a cravação do amostrador com o assentamento inicial de 152 mm, mas não define claramente o que é a resistência à penetração; determina somente que se registre os golpes necessários à cravação dos segundo e terceiro segmentos 152 mm. Já a norma D1586-63 T, que sucede a de 1958, define com clareza a resistência à penetração, como sendo a soma dos números de golpes para cravação dos segundo e terceiro 152 mm. Em 1967 a D1586-67 passa a ter *status* de norma definitiva.

Fletcher (1965) publica o trabalho intitulado “Standart Penetration Test: Its uses and Abuses”. Neste trabalho o autor lista uma série de fatores intervenientes no SPT, que é complementada

por Mohr em 1966. Nesta época surgem perguntas tais como: O SPT é suficientemente confiável? As experiências anteriores seriam consideradas suficientes para a garantia do uso presente e futuro do SPT? Somada a essas dúvidas, surgem os primeiros martelos automáticos como o “pilcon”, do qual não se tinha conhecimento de desempenho, dividindo as opiniões quanto a seu uso.

Em 1968, Casagrande e Casagrande convidaram duas empresas tradicionais atuantes no ramo de sondagem, a Raymond e a Sprague-Henwood, para realizarem uma campanha de furos de sondagem em uma área relativamente pequena, em um mesmo depósito de areia. Nesta campanha foram utilizados procedimentos e equipamentos comuns à época sendo os resultados apresentados na Tabela 2.1. Não há maiores detalhes quanto à localização no nível d’água, porém sabe-se que a sondagem do tipo original da Raymond foi executada com circulação de água e com acionamento manual do martelo. As discrepâncias nos resultados corroboram ao descrédito do SPT.

Tabela 2.1 – Resultados dos estudos de Casagrande & Casagrande (Kovacs et al.1977).

Tipo de equipamento	“Original Raymond”	“Flyght Auger Raymond”	“Rotary Equipment Sprague-Henwwod	“Hollow Stem Flyght Auger”
Acionamento do martelo	Manual	Corda com tambor (cathead)	Guincho com cabo de aço	Corda com tambor (cathead)
Numero de golpes/305mm (N)	10	15	45	10

Em 1971 Victor de Mello apresenta no 4º Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, em Porto Rico, o “State of the Art: Standard Penetration Test”. Neste trabalho Victor de Mello dá um enfoque de ensaio ao SPT e defende a utilização de correlações entre o N_{spt} e o ângulo de atrito interno das areias. Neste trabalho também é apresentado um estudo da energia transferida às hastes com base na teoria newtoniana.

Na segunda metade da década de 70, e início da década de 80 surgem os primeiros trabalhos de determinação da energia transferida ao amostrador. Dentre os trabalho destacam-se

Palacios (1977), Schertmann e Palacios (1979), Kovacs et al. (1977, 1981, 1982), Kovacs (1979). Estes estudos demonstram que diferenças consideráveis no valor do N_{spt} podem ser atribuídas ao tipo do equipamento, estado de conservação, forma de utilização, tipo do martelo, forma de liberação do martelo, geometria do amostrador, o uso do “liner”, etc..

As medidas de energia de cravação do amostrador SPT parecem explicar as dispersões normalmente atribuídas aos resultados de ensaios. Segue-se a partir destes estudos a normalização do ensaio em relação a uma medida de energia de referência, possibilitando assim a transposição de experiências regionais.

Os estudos de determinação da transferência de energia, para os equipamentos utilizados nos Estados Unidos, apontam como energia média transferida à haste o valor de 55% em comparação com a energia nominal (massa do martelo 63,5 kg caindo de uma altura de queda de 762 mm). Segundo Seed et al. (1985), o valor de 60% é mais adequado visto que a maioria dos martelos em utilização nos Estados Unidos é o “Safety Hammer”, que transfere uma energia média em relação a nominal de 60%. Além disto, a energia média transferida à haste com martelos utilizados em outras regiões do mundo é também de 60% da energia teórica. Com base nesta observação sugere-se a correção do valor medido de N_{spt} em um valor de referência N_{60} . Esta recomendação é adotada e apresentada no clássico trabalho de Skeptonn (1986), a partir do qual a correção de N para N_{60} passa a ser recomendada à prática da engenharia geotécnica mundial.

Após 1986 são apresentados vários trabalhos enfocando a necessidade da medida de energia no SPT, equipamentos de medida utilizados, evolução das medidas de energia com utilização de acelerômetros, similares aos utilizados em ensaios de carga dinâmica em estacas. Reconhecendo-se que nem os equipamentos nem os procedimentos de execução são completamente padronizados (e. g. Ireland et al., 1970; Clayton, 1993) o controle de energia durante a cravação passa a constituir-se em elemento indispensável à correta interpretação do resultado do ensaio.

2.1.2 - História do SPT no Brasil

O início da sondagem no Brasil data da década de 30, juntamente com a criação da Seção de Estruturas e Fundações do IPT e da volta do Eng. Odair Grillo da visita de estudos realizada à

Universidade de Harvard, em 1936. É sem dúvida, o Eng. Grillo o idealizador e iniciador da medida de resistência à penetração no Brasil. Até esta data as características do solo eram determinadas apenas por exame tátil-visual. Em 1943 iniciam-se as medidas de penetração, inicialmente de forma experimental, e em 1944 de forma sistemática. O diâmetro do tubo de revestimento utilizado era de 51 mm e o amostrador foi confeccionado com um tubo, compatível ao diâmetro do revestimento, disponível na época (Segunda Guerra Mundial). Este amostrador, denominado amostrador tipo IPT possui 38 mm e 46 mm de diâmetro interno e externo, respectivamente.

Outros detalhes do sistema de sondagem utilizado pelo IPT são: a) hastes de aproximadamente 3,2 kg/m; b) utilização de cabeça de bater; d) martelo cilíndrico vazado, acionado manualmente através de corda de sisal e roldana fixa; e) frequência média de 15 golpes por minuto; f) perfuração a trado até o nível d'água e por circulação de água abaixo do mesmo.

Em 1944, a Geotécnica começa a utilizar um amostrador trazido pelo engenheiro Mohr quando da sua visita ao Brasil. Este amostrador, denominado de amostrador Mohr-Geotécnica, tinha dimensões de 41,2mm e 25mm de diâmetro externo e interno, respectivamente. Em 1947 a Geotécnica adotou o amostrador Raymond nas suas sondagens passando o revestimento a ter um diâmetro de 63,5 mm.

Em 1956, o professor Costa Nunes chama a atenção à falta de normalização das sondagens à percussão no Brasil. Teixeira (1977) relata que na década de 70 a sondagem era realizada de forma artesanal com uso de diversos procedimentos e equipamentos distintos. Gerger (1974) discute que para se interpretar os resultados de uma sondagem havia necessidade de se conhecer a empresa executora.

Todos estes fatores levaram, em 1974, no 5º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, a ser apresentada uma proposta de Método de Execução de Sondagem de Simples Reconhecimento dos Solos. Este assunto é apresentado com maior detalhe no item padronização e normalização da sondagem no Brasil.

No início da década de 80 iniciam-se as medidas de energia no SPT, sendo pioneiro o trabalho desenvolvido no IPT. Em 1985 este trabalho é concretizado na dissertação de mestrado intitulada “Energia Dinâmica no SPT – Resultados de uma Investigação Teórico Experimental” de autoria de Antônio Belincanta (1985). Este autor, em 1998, dando continuidade ao seu trabalho efetua uma abrangente pesquisa nos fatores intervenientes no índice de resistência à penetração do SPT.

Em 2002 resultados de estudos recentes na determinação da energia no ensaio SPT são publicado na tese de doutorado de autoria de Erinaldo Hilário Cavalcante, intitulada “Investigação Teórico-Experimental sobre o SPT”, Cavalcante (2002). Em seu trabalho, Cavalcante apresenta os resultados de uma análise teórico experimental de vários aspectos associados à transferência de energia no SPT, dando ênfase ao comprimento da composição das hastes e conclui que a energia transferida ao topo da composição das hastes independe do seu comprimento e da resistência do solo. Adicionalmente observou que há diferença entre a energia medida no topo das hastes e a que atinge o amostrador.

2.1.3 – História da Padronização

A normalização e padronização da sondagem teve sua evolução histórica iniciada no IV Congresso Internacional da ISSMFE (International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering), realizada em Londres, em 1957, onde foi formado um subcomitê técnico com o objetivo de estudar os ensaios penetrométricos, estáticos e dinâmicos, com vistas à normalização.

A primeira tentativa de norma foi norte americana, D1586-58T, em 1958, da ASTM (American Society for Testing and Materials), sendo sua publicação definitiva datada de 1967, com a numeração D1586-67.

O sub-comitê criado no congresso de Londres foi dissolvido, e decidindo-se pela criação de dois grupos de trabalhos, um americano e outro europeu. Apesar de avanços nos estudos não houve um começo entre os grupos que também foram dissolvidos. Entretanto, mesmo com a dissolução, o grupo europeu continuou trabalhando e em 1977 apresentou normas regionais sobre o ensaio, para o Comitê Executivo da ISSMFE, que foram aprovadas. Em 1982 foi

criado um comitê novamente a nível internacional que apresentou, na primeira conferência ISOPT I, realizada em Orlando, 1988, as primeiras propostas de referência de ensaios. Em 1989, no Congresso Internacional do Rio de Janeiro, foi publicado, em caráter oficial, o “Reference Test Procedure”.

No Brasil, o engenheiro Alberto Henrique Teixeira apresentou no V Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, realizado em São Paulo, 1974, a proposta de normalização do Método de Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos. Esta proposta de norma, após discutida em eventos técnicos e por vários usuários e pesquisadores, foi enviado em 1977 à ABNT, para discussão e aprovação, tornando-se oficialmente a primeira norma brasileira de sondagem SPT, em 1979, denominada ‘Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos’, MB 1211/79, com mudança posterior na numeração para NBR 6484/80.

Muitos países, tais como Venezuela, Itália, México, entre outros, adotam a norma dos Estados Unidos ASTM D1586-67 como padrão, já o Brasil, Austrália, Canada, Japão, entre outros, possuem norma própria. Entretanto, é consenso mundial a necessidade de seguir a referência internacional “Reference Test Procedure”.

Chama-se atenção que, apesar da Referência Internacional, alguns países, regiões e empresas não a adotam na sua íntegra, e cuidados são necessários quando da extrapolação de experiências. Por exemplo, no oeste do Paraná a sondagem é efetuada com a penetração contínua do amostrador (Belincata 1998), no Uruguai não é usual a execução de sondagens do tipo SPT, na Argentina, além da adoção de norma americana, o padrão local é o uso do amostrador de “Moreto” (Moreto, 1963).

Recentemente, houve mais um avanço no sentido de melhorar a qualidade do serviço de sondagem com o lançamento do Manual de Especificações da Associação Brasileira de Empresas de Fundação e Geotécnica (ABEF, 1999), onde além da obediência a NBR 6484, são especificados procedimentos quanto ao aspecto trabalhista, bem estar do funcionário, frequência e procedimentos a serem obedecidos na aferição dos equipamentos, padronização dos processos, especificação das características da equipe de sondagem e do supervisor.

Em 2000 a Norma Brasileira NBR 6484 é revisada e publicada, tem apresentadas poucas modificações em relação da norma de 1980, entretanto é clara no sentido de que empresas que possuem equipamentos fora das especificações da norma deve apresentar o valor médio da energia transferida à haste quando da aplicação do golpe do martelo. Esta especificação mostra a importância da correção do valor do número de golpes do ensaio SPT.

É fundamental para boa prática da engenharia, no que se refere à execução de sondagem SPT, a adoção das recomendações da Norma Brasileira e da Referência Internacional.

2.2 – EQUIPAMENTOS

A seguir são apresentados os equipamentos utilizados no ensaio SPT, mais precisamente os tipos de martelo, sistema de elevação do martelo, tipos de haste, tipos de amostradores e sistemas de liberação do martelo.

2.2.1 – Tipos de martelos.

Encontra-se na literatura uma série de diferentes tipos de martelos utilizados para a cravação do amostrador. A Figura 2.1 apresenta alguns destes martelos e a Tabela 2.2 cita as suas características.

Tabela 2.2 – Características dos martelos apresentados na Figura 2.1.

Figura	Nome	País	Massa (kg)	Massa do conjunto (kg)	Massa da cabeça de bater (kg)	Fabricante	Elevação do Martelo	Liberação do Martelo	Coxim de Madeira
A	Com Pino Guia	Brasil	65,0	-	3.8	-	Manual	Manual	Sim
B	Martelo Cilindro Vazado	Brasil	65,0	-	3.8	-	Manual	Manual	Sim
C	Donut Hammer	USA / outros	63,5	-		-	Mecanizada	Manual / Cathead	Não
D	Safe T-Driver	USA / outros	63,5	-			Mecanizada	Manual / Cathead	Não
E	Safety Hammer	USA / outros		-			Mecanizada	Manual / Cathead	Não
F	Booros Co. Ltda darp Hammer	USA / outros	63,5			Booroe Co. Ltda Drap Hammer	Mecanizada	Gatilho Mecânico	Não
G	Pilcon Trip Monkey	USA / outros	63,5			Pilcon	Mecanizada	Gatilho Mecânico	Não
H		Ingraterra	63,5	114,70	32.2		Mecanizada	Gatilho Mecânico	Não
I		Japão	63,5				Mecanizada	Gatilho Mecânico	Não

2.2.2 – Sistemas de elevação do Martelo

Os sistemas de elevação do martelo podem ser divididos basicamente em dois grupos: o manual e o mecanizado. O manual é o sistema mais freqüentemente utilizado na prática brasileira, onde dois auxiliares de sondagem levantam o peso, com auxílio de uma corda, que passa por uma roldana fixa posicionada na parte superior do tripé de sondagem. O sistema mecanizado geralmente utiliza uma polia (tambor) que gira continuamente, a uma determinada velocidade, na qual é enrolado o cabo, que após passar pela roldana fixa na parte superior do tripé, está conectada ao martelo. O operador ao puxar a corda, enrolada na polia, aumenta o atrito da corda com a polia, e com isso eleva o martelo; ao soltar a corda o atrito é reduzido e o martelo cai. É fácil de compreender que há um atrito significativo entre a corda e a polia (tambor), mesmo após a liberação da corda pelo operador, o que impede que o martelo caia em queda livre. A velocidade de rotação da polia (tambor), o seu diâmetro, o sentido da rotação (horário ou anti-horário), o estado de conservação da corda, diâmetro da corda e principalmente o número de voltas da corda em redor da polia são fatores que afetam diretamente a energia cinética do martelo no instante do impacto com a cabeça de bater. Não se pode esquecer que a forma de liberação é outro fator determinante na energia cinética contida no martelo, no instante do impacto com a cabeça de bater, sendo este sistema altamente dependente do operador. A Figura 2.2 apresenta um croquí de um sistema de elevação do martelo com auxílio de um tambor giratório (“cathead”). Na Tabela 2.3 são apresentados resultados dos valores de energia obtidos para composições distintas, nas quais há variações no tipo da corda, velocidade de rotação do tambor, estado da corda e número de voltas da corda no tambor.

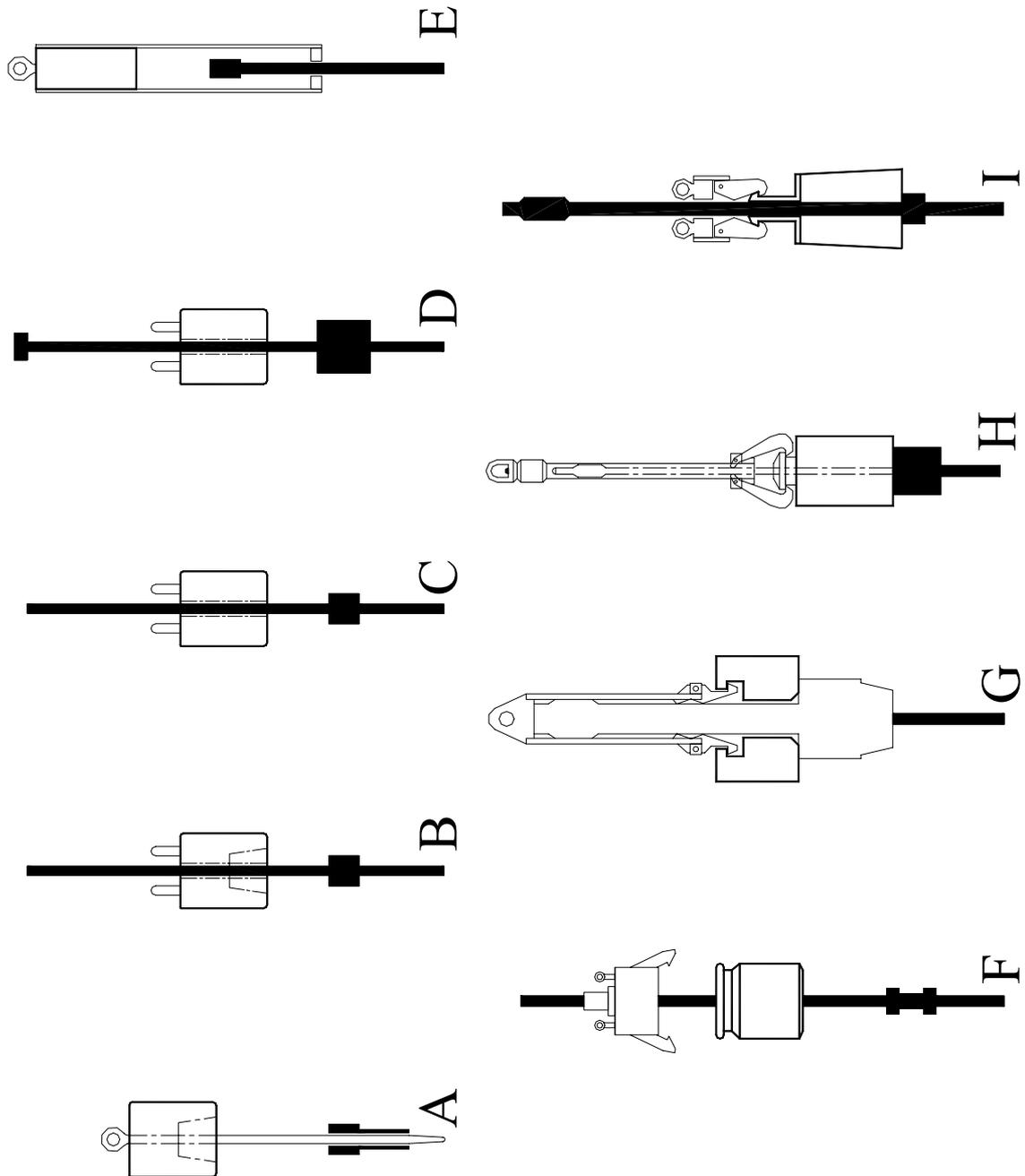


Figura 2.1 – Tipos de martelo usados no SPT (denominações na Tabela 2.1).

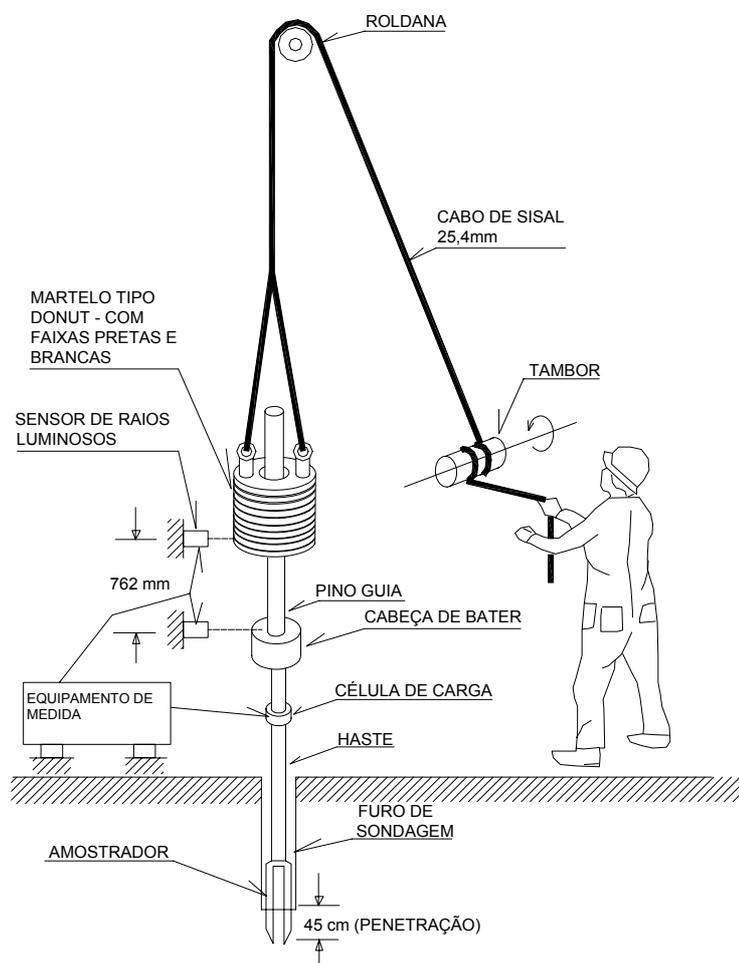


Figura 2.2 – Esquema de levantamento do martelo com “cathead” (Kovacs e Salomone, 1982).

Tabela 2.3 – Comparativo da variação da energia para o sistema “cathead”. (Kovacs e Salomone, 1982).

Fabricante do Equipamento	Série do ensaio	Número de dados por ensaio	Numero de voltas do cabo no tambor	Média da altura de queda (polegadas)	Velocidade de rotação do tambor (pés/min)	Diâmetro da corda e estado (polegadas)	Tipo de martelo	Sentido de rotação do tambor	Energia ER _r (%)
CNE-55	2	10	1	30,48	540	¾ usada	Safety	Horário	80,5
	3	10	2	30,40	540	¾ usada	Safety	Horário	69,2
	4	10	3	29,15	540	¾ usada	Safety	Horário	49,7
	10	10	1	29,94	468	1 nova	Safety	Horário	78,5
	11	11	2	30,59	468	1 nova	Safety	Horário	75,7
	12	10	3	29,69	468	1 nova	Safety	Horário	64,6
CNE-55	28	31	2	31,15	180	¾ usada	Donut	Horário	61,7
	29	3	3	32,23	180	¾ usada	Donut	Horário	37,1
	30	6	1	31,93	180	¾ usada	Donut	Horário	68,6
	31	5	2	31,20	180	¾ usada	Donut	Horário	58,9

A análise dos dados da Tabela 2.3 identifica claramente a influência de vários fatores no valor da energia transmitida ao amostrador, o que afeta diretamente o número de golpes do SPT. A energia transmitida através do sistema manual de elevação, produz níveis de variabilidade de medidas com dispersões similares da Tabela 2.3.

Os martelos levantados com auxílio do tambor giratório (“cathead”), mas providos de sistema de gatilho para liberar o martelo em queda livre são menos influenciados pelos fatores acima citados. Entretanto, a velocidade de aplicação dos golpes imposta pelo operador pode também afetar a energia cinética do martelo no instante do impacto com a cabeça de bater. Foi observado por Kovacs (1981) que, para frequências de golpes maiores que 15 golpes por minutos, o martelo possui uma energia cinética ascendente, no instante de liberação, que provoca uma sobre elevação da altura de queda em relação a padrão.

Belincanta (1998) ressalta que essa sobre elevação, na altura de queda padrão, também ocorre no sistema manual, utilizando o martelo do tipo com pino guia, onde o operador só libera o martelo em queda livre após o aparecimento da marca no pino que indica a altura de queda de 75 centímetros. Nesse instante o operador ainda não liberou a corda e como o martelo possui uma determinada energia cinética ascendente, sempre ocorre um pequena sobre elevação em relação a altura de queda padrão.

2.2.3 – Tipos de Hastes

A norma brasileira é clara e rigorosa quanto ao tipo de haste a ser utilizada na sondagem SPT. A haste deve ser um tubo de aço de uma polegada de diâmetro nominal com uma massa de 3,23 Kg/m. Já nos Estados Unidos, as hastes devem possuir rigidez maior ou igual à haste do tipo A (41,2mm) ou AW com 43,6 mm de diâmetro. Segundo Muromachi et al (1974), as hastes no Japão devem ter diâmetros entre 40,5 e 42,0 mm. Hastes pouco rígidas ou muito longas produzem N_{spt} baixos devido às perdas de energia decorrentes do efeito de flambagem das hastes (Clayton 1993). Estudos efetuados por Matsumoto e Matsubara (1982) indicam que não há diferenças significativas entre os valores de N_{spt} quando são usadas hastes com diâmetros variando entre 40 e 60 mm e massa entre 4,34 e 9,14 kg/m, e comprimentos de até 47 metros no que diz respeito a flambagem da composição.

2.2.4 – Tipos de Amostradores

A geometria dos amostradores varia de um país para outro. Nos Estados Unidos os amostradores possuem um diâmetro interno ligeiramente maior que o diâmetro interno da sapata cortante. Este aumento no diâmetro interno tem como objetivo a colocação de um “liner” para facilitar a coleta e manuseio da amostra. O diâmetro interno maior facilita a entrada da amostra, diminuindo o número de golpes necessários para cravar o amostrador, entretanto, o uso de “liner” não é generalizado. Em outros países, tais como África do Sul, Japão, Brasil, Irã, Venezuela e Austrália, o amostrador descrito pela ASTM é acrescido de uma válvula de esfera (Clayton, 1993). Em Israel o amostrador é acrescido de uma mola para ajudar a coleta da amostra. Esta mola dificulta a penetração do amostrador, aumentando o número de golpes (Clayton, 1993). Ainda deve ser observado que a geometria proposta pela ASTM é ligeiramente diferente da apresentada pelo amostrador Raymond e citado no livro de Terzaghi e Peck (1948). Já na Argentina são utilizadas sapatas cortantes distintas, para diferentes tipos de solo, objetivando uma amostra de melhor qualidade e amostradores distintos do padrão internacional (Moreto 1963).

2.2.5 – Sistemas de liberação do Martelo.

Os sistemas de liberação do martelo para permitir a queda livre podem ser divididos em três grupos. O primeiro, com disparador automático, já foi apresentado no item 2.1. (Figuras 2.1 de F a I). O segundo grupo, com disparador manual, esta apresentada na Figura 2.3. Nos equipamentos com disparador manual/mecânico, o martelo é elevado por dois auxiliares de sondagem, com auxílio de uma corda que passa por uma roldana fixa posicionada na parte superior do tripé, até a altura de queda padrão. O terceiro membro da equipe ao puxar uma corda, conforme indicado na Figura 2.3, libera o martelo.

Os sistemas apresentados na Figura 2.3 A e B são utilizados na Argentina (Ireland et al., 1966) e no Japão (Clayton, 1993) e são de uso correntemente.

A Figura 2.3 C apresenta um gatilho de concepção simples utilizado de forma experimental no Brasil, desenvolvido por Furnas-Centrals Elétricas S. A. (Belincanta - 1998).

No terceiro grupo o martelo é liberado pelo simples ato de soltar o cabo ao qual está fixo o martelo e que foi utilizado para a sua elevação.

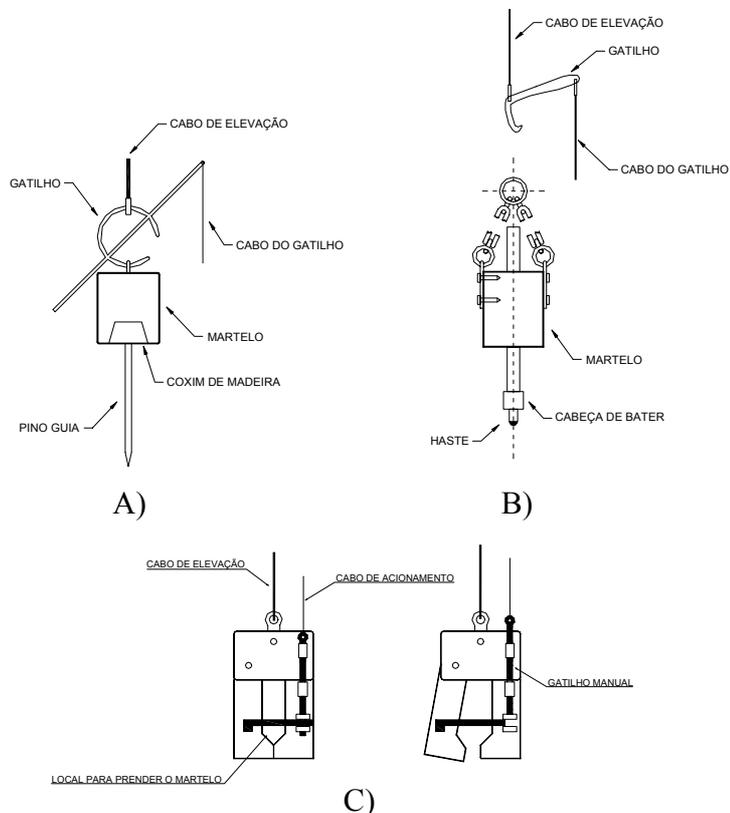


Figura 2.3 – Gatilhos Manuais. (A) Sistema Argentino (Ireland, 1966); (B) Sistema Japonês (Clayton, 1993); (C) Sistema de Furnas (Belincanta, 1998)

2.3 – PADRONIZAÇÃO

No Congresso Internacional da ISSMFE, realizado no Rio de Janeiro, em 1989, foi publicado a Referência Internacional do Procedimento do Ensaio SPT, com o objetivo de possibilitar uma comparação entre medidas obtidas em diferentes regiões e países, mantendo a simplicidade do ensaio.

A seguir apresentam-se de forma resumida as principais recomendações e especificações da Referência Internacional, enfatizando-se eventuais divergências com a NBR 6484/1980.

2.3.1 – Equipamento e Métodos de Perfuração

(i) Equipamentos de Perfuração

O equipamento de perfuração deve, ao final da escavação, possibilitar a perfeita limpeza do fundo do furo de sondagem e evitar o amolgamento do solo a ser ensaiado. Quando for utilizado o sistema de circulação de água, o jato deverá ser lateral e não frontal. Para sustentar a parede do furo de sondagem, quando necessário, é permitida a utilização de revestimento metálico ou lama estabilizante. O diâmetro do furo de sondagem deve possuir dimensões entre 63,5 e 150 mm. A norma Brasileira permite somente a utilização de tubos de revestimento com diâmetros interno de 67 e 73mm.

(ii) Amostrador

O amostrador é composto por três partes distintas a saber: sapata cortante, corpo e cabeça. O corpo do amostrador deverá 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 51mm (± 1 mm) e o interno de 35 mm (± 1 mm). Seu comprimento deverá ter no mínimo 457 mm.

A parte inferior do amostrador, denominada sapata cortante, 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 (conforme indicado na Figura 2.4), e ser confeccionado com o mesmo material do corpo do amostrador. A sapata cortante deve ser substituída sempre que estiver gasta ou danificada.

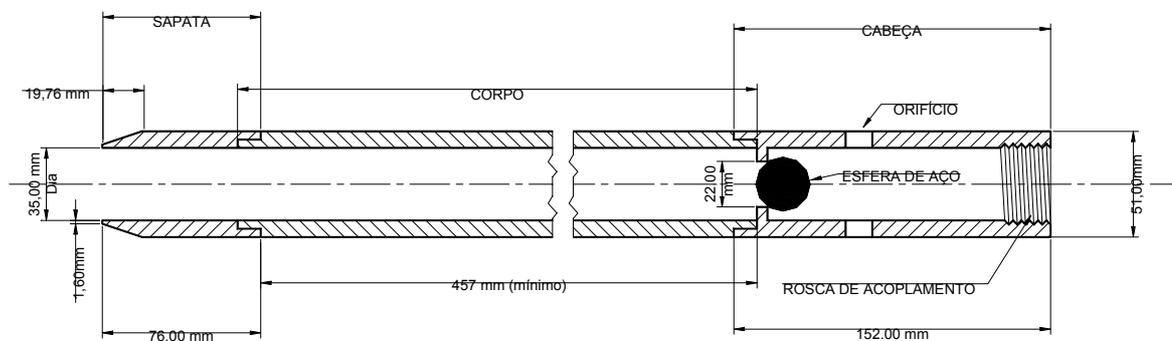


Figura 2.4 – Amostrador Padrão Segundo a Referência Internacional (IRTP/ISSMFE, 1988).

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 como indicado na Figura 2.4, 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 amostrador.

(iii) Hastes

A haste que promove a ligação do amostrador ao martelo deve possuir uma rigidez mínima, conforme tabela abaixo.

Tabela 2.4 – Características das hastes de sondagem.

Diâmetro da Haste (mm)	Módulo da seção ($\times 10^{-6} \text{m}^3$)	Peso da haste (kg/m)
40,5	4,28	4,33
50	8,59	7,23
60	12,95	10,03

OBS: Hastes com peso maior que 10,03 kg/m não são permitidas.

A norma brasileira utiliza haste de menor rigidez das permitidas pela referência internacional. O peso da haste especificada pela norma brasileira é de 323 kN/m² (3,23 kgf/cm²). Somente poderão ser usadas hastes perfeitamente retas, sendo que o conjunto não deve possuir uma deflexão maior que 1 em 1000. As hastes deverão ser unidas por juntas rosqueáveis.

(iv) Martelo

O conjunto do martelo deve compreender:

- Uma cabeça de bater de aço atarraxada na parte superior da haste;
- Um martelo de aço com 63,5 kg ($\pm 0,5$ kg);
- Um sistema de liberação do martelo que garanta a sua queda livre de uma altura de 760 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 115kg.

A referência internacional não fixa dimensões para o martelo e para a cabeça de bater.

A norma brasileira especifica uma altura de queda de 75cm e o peso do Martelo é de 65 kg cujas dimensões são rígidas e claramente especificadas. Obriga a existência de um coxim de madeira dura na parte inferior do martelo que deve ser periodicamente substituído. Com relação a cabeça de bater a norma é de mesma forma rígida, impondo as dimensões de 83 mm de diâmetro e 90mm de altura.

As dimensões do martelo e da cabeça de bater afetam diretamente a onda de compressão gerada pela ação do golpe sobre a composição da haste conforme será discutido posteriormente neste trabalho. De mesmo modo o estado de conservação do coxim, tempo de uso, tipo da madeira afetam a onda de compressão.

2.3.2 – Procedimento do Ensaio

(i) Preparação do furo de sondagem

O furo de sondagem deve ser cuidadosamente limpo antes da realização do ensaio e o equipamento utilizado deverá garantir que o fundo do furo não seja amolgado (esta recomendação é subjetiva, de difícil obtenção). O nível d'água ou de lama de estabilização, dentro do furo de sondagem, deverá ser mantido em condições que garantam o equilíbrio hidráulico na cota da realização do ensaio. Quando do uso de revestimento, o mesmo não deve ser cravado abaixo da cota de ensaio.

O equipamento de corte ou abertura do furo de sondagem deve ser retirado cuidadosamente para evitar o amolgamento do solo.

(ii) Ensaio

O conjunto amostrador, haste e martelo devem ser cuidadosamente instalados no furo de sondagem. A penetração inicial do amostrador sob esta condição de carga deve ser registrada. Quando essa penetração exceder 450 mm o ensaio não será realizado e o número “N” é considerado igual a zero.

A cada profundidade deve ser registrado o número de golpes necessários à penetração de cada segmento de 150mm. Os primeiros 150 mm são referentes ao assentamento do amostrador.

A soma dos golpes necessários à penetração do segundo e terceiro segmentos de 150 mm é denominado de número de golpes do SPT, “ N_{spt} ”. Caso o amostrador não penetre 300 mm no solo após 100 golpes o ensaio pode ser interrompido. Quando o amostrador não penetrar os 300 mm, a penetração correspondente a 50 golpes deve ser registrada. A frequência dos golpes não deve ser maior que 30 golpes por minuto.

(iii) Coleta da amostra e identificação

Ao final do ensaio o amostrador deverá ser aberto cuidadosamente e uma amostra representativa deve ser coletada e acondicionada em um recipiente hermético. O recipiente deverá ser identificado através de um etiqueta contendo as seguintes informações: local, número do furo de sondagem, número da amostra, profundidade da coleta, comprimento da recuperação, data e o número de golpes SPT.

2.3.3 – Apresentação dos Resultados

O exemplo de resultado de um ensaio típico é apresentado na Figura 2.5, com o objetivo de ilustrar o procedimento. As seguintes informações deverão ser reportadas no relatório de sondagem:

- 1) Local;
- 2) Cota do furo;
- 3) Data e hora do início e fim do furo;
- 4) Número do Furo de Sondagem;
- 5) Método de abertura do furo e dimensões do revestimento utilizado;
- 6) Dimensões e peso das hastes utilizadas no ensaio;
- 7) Tipo do martelo e sistema de liberação em queda;
- 8) Altura de queda livre;
- 9) Profundidade do fundo do furo antes do início do ensaio;
- 10) Profundidade do revestimento;
- 11) Informações do nível d’água do sub-solo e do nível d’água ou da lamas de estabilização no interior de cada furo de sondagem antes do início de cada ensaio;

- 12) A profundidade da penetração inicial e a profundidade entre os pontos de medida do número de golpes;
- 13) Número de golpes;
- 14) A descrição do solo pelo sondador;
- 15) Observações concernentes a estabilidade da camada perfurada ou obstruções encontradas durante o ensaio, etc., que irão ajudar a interpretação dos resultados;
- 16) Resultados de calibração do equipamento se disponível.

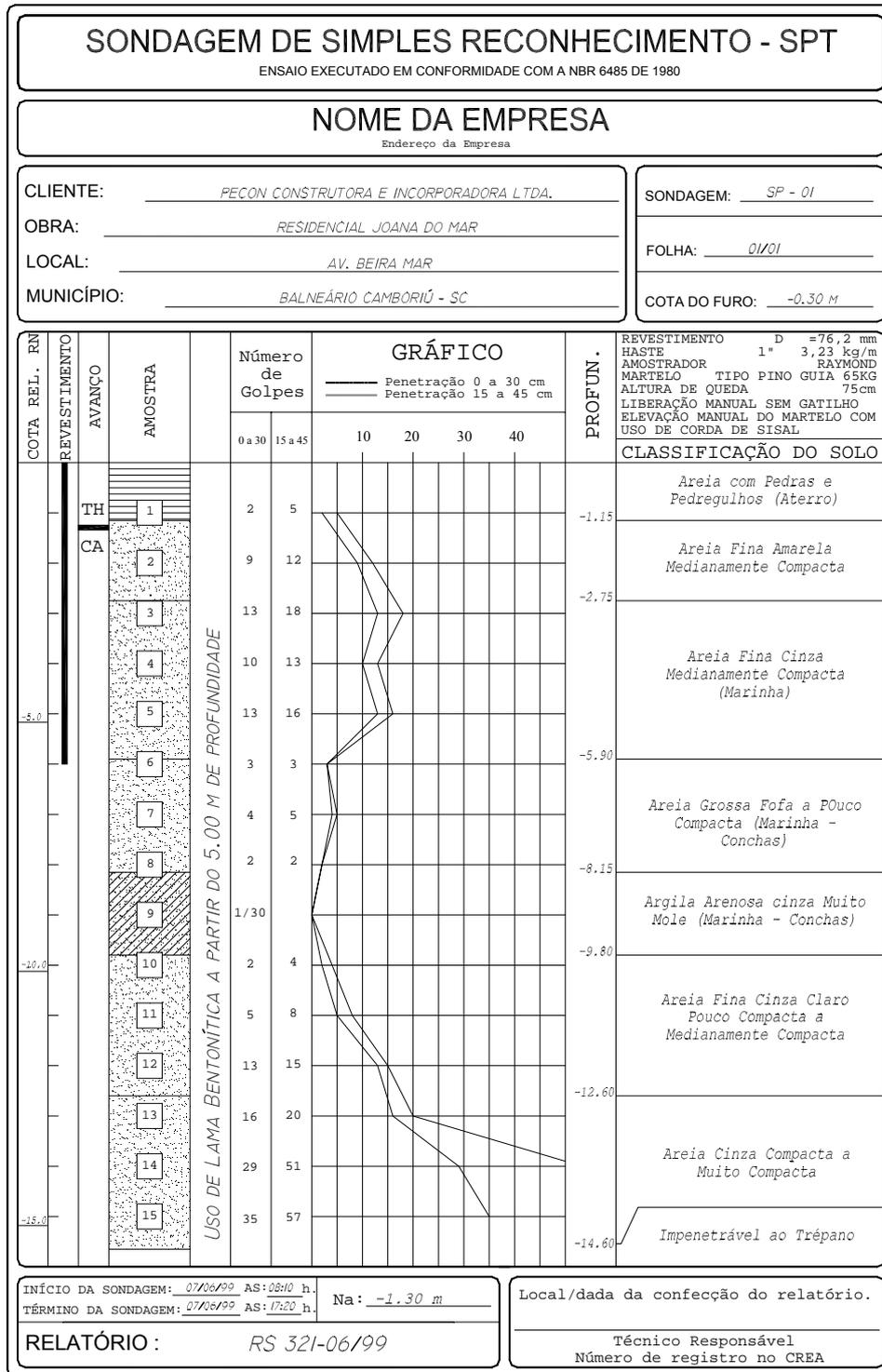


Figura 2.5 – Exemplo de resultado um ensaio típico.

2.4- MEDIDAS DE ENERGIA

2.4.1 – Introdução

O martelo utilizado na sondagem SPT, quando posicionado a uma altura determinada, possui uma energia potencial que é transformada em energia cinética quando liberado em queda livre. Entretanto, no SPT a energia potencial não é totalmente transformada em energia cinética devido às perdas por atrito nas cordas e roldanas. Quando atinge a extremidade superior da haste, a energia cinética do martelo transforma-se em energia cinética e elástica, que percorre a haste na forma de onda longitudinal de compressão, e em energia térmica, sonora entre outras que são perdidas. De forma análoga, pode-se afirmar que a energia cinética disponível no instante do impacto não é totalmente transformada em energia cinética e elástica contida na onda de compressão, devido as perdas durante o impacto ocasionado pelo mau contato das superfícies, desalinhamento entre as superfícies, reflexões nas luvas, etc..

A relação entre a energia cinética com a energia potencial corresponde à eficiência do sistema. Existem na literatura duas maneiras diferentes de se considerar a energia potencial: uma com base na altura medida do martelo antes da queda e outra com base na altura teórica prescrita em norma. Essa segunda maneira tem se demonstrado mais atraente, pois as diferentes energias determinadas são comparadas a uma única energia teórica de referência. A energia cinética pode também ser determinada de duas formas distintas, uma com base na velocidade de queda do martelo no instante do impacto e outra onde a velocidade é determinada com base na força de impacto, no instante do impacto.

Vários estudos foram realizados para determinar a eficiência do golpe do martelo sobre a haste de sondagem, dos quais destacam-se os trabalhos realizados por Palacios (1977); Kovacs (1977); Schertmann e Palacios (1979) e Kovacs, (1981 e 1982). O quadro abaixo resume as formas utilizadas na estimativa da eficiência do sistema.

Tabela 2.5 – Sumário das definições de eficiências (Kovacs & Salomone, 1982).

<i>Baseado em:</i>	<i>Altura de queda medida (h)</i>	<i>Altura de queda teórica assumida (30''= 760mm)</i>
<i>Eficiência calculada com base na velocidade imediatamente anterior ao impacto</i>	$ER_v = \frac{E_v}{Wh} \quad (2.1)$	$ER_{hi} = \frac{E_{hi}}{E^*} \quad (2.3)$
<i>Eficiência calculada com base na integração ao longo do tempo da curva força x tempo</i>	$ER_r = \frac{E_r}{Wh} \quad (2.2)$	$ER_i = \frac{E_i}{E^*} \quad (2.4)$

Onde:

h = altura de queda efetivamente medida;

W = peso do martelo;

V_i = velocidade de queda do martelo medida imediatamente antes do impacto;

V_{hi} = velocidade de queda do martelo imediatamente antes do impacto, estimada através da força de impacto;

Energia

$E_v = \frac{1}{2} W V_i^2$, Energia cinética do martelo no instante do impacto;

$E_{hi} = \frac{1}{2} W V_{hi}^2$, Energia cinética do martelo no instante do impacto estimada através de V_{hi} ;

E^* = energia potencial nominal de um martelo padrão de 63,5 Kg caindo de uma altura de 760mm (473,4 Joules (Nm));

$$E_r = E_i = \frac{1}{A\sqrt{E\rho}} \frac{K}{Kl} \int_0^{\Delta t} [F(t)]^2 dt \quad (\text{denominada por Schmertmann e Palacios}$$

(1979) por ENTHRU).

Onde: A = área da haste; E = módulo de elasticidade do aço; ρ = massa específica do aço das hastes; K = fator de correção que leva em

consideração a posição da instrumentação; Kl = fator de correção que leva em consideração o comprimento da haste descrita por Schmertmann e Palacios (1979);

Eficiência

ER_v = Eficiência de energia cinética do martelo no instante do impacto;

ER_r = Eficiência de energia transferida à haste referente à primeira onda longitudinal de compressão incidente;

ER_{hi} = Eficiência de energia cinética disponível no martelo no instante do impacto;

ER_i = Eficiência da energia transferida à haste na primeira onda longitudinal de compressão incidente.

OBS: equações (2.1) e (2.2) – Kovacs et al. (1982); equações (2.3) e (2.4) – Schertmann & Palacios (1979);

Vários equipamentos tem sido utilizados na medida da energia durante o ensaio SPT. A seguir descrevem-se algumas experiências relatadas na literatura. A revisão objetiva determinar a instrumentação mais adequada à medição, destacando vantagens e limitações de cada procedimento.

2.4.2 – Instrumentação para Determinar a Energia Cinética do Martelo, no Instante do Impacto.

2.4.2.1 – Instrumentação utilizada por Kovacs

A determinação da velocidade do martelo no instante do impacto foi determinada com auxílio de dois sensores luminosos (emissores e receptores), posicionados adequadamente, fixos em uma referência externa, de modo a registrar a passagem do martelo. Para sensibilizar os sensores luminosos, foi confeccionado um papel com faixas pretas e brancas, de 3,1mm de espessura cada, sendo este colado sobre o martelo. Quando o martelo passa, os raios luminosos refletidos variam de intensidade a cada mudança de faixa. Ao receber estes raios refletidos, os sensores os convertem em sinais que após condicionados, são registrados em um gravador.

Como a distância entre as faixas é conhecida e também o tempo entre dois registros, a velocidade do martelo pode ser calculada em qualquer instante. Devido à posição adequada dos sensores é possível também determinar a altura máxima do martelo, previamente à liberação em queda livre.

2.4.2.2 – Filmadora de Alta velocidade

Outro processo para determinar a altura de queda do martelo, e a sua velocidade no instante do impacto, refere-se ao emprego de uma filmadora de alta velocidade. Existem no mercado filmadoras que podem fornecer 10000 imagens por segundo.

2.4.2.3 – Sistema utilizado por Matsumoto et al. (1992)

Para a determinação da velocidade de queda no instante do impacto do martelo sobre a cabeça de bater, Matsumoto et al. (1992) desenvolveram um sistema muito simples composto de três cabos elétricos afastados um do outro de uma distância de 20mm. Cada cabo consistia em um circuito elétrico alimentado por um gerador de pulsos (Figura 2.6). O sinal gerado pelos três circuitos era simultaneamente adquirido em um micro computador. Com a passagem do martelo o circuito era aberto cessando o registro dos pulsos. O tempo entre a término do registro dos pulsos dos três cabos é determinado e com base na distância entre os cabos computa-se a velocidade de queda do martelo.

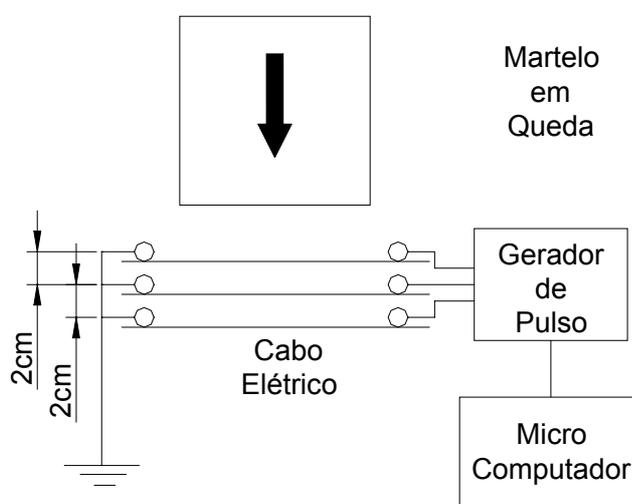


Figura 2.6 – Sistema de medição de velocidade de queda do martelo proposto por Matsumoto et al (1992).

2.4.2.4 – Sistema utilizado pela PDI

A PDI (Pile Dynamics Incorporation) desenvolveu mais recentemente um equipamento que utiliza a tecnologia de radar para monitorar a queda de martelos empregados na cravação de estacas. O sistema pode ser utilizado igualmente para monitorar o martelo utilizado no SPT e permite a determinação da velocidade máxima, velocidade de impacto, energia cinética e a energia potencial para qualquer tipo de martelo. O sistema denominado comercialmente de HPA (Hammer Performace Analyser) é composto por basicamente três componentes a saber: antena, condicionador de sinal e software de aquisição e interpretação dos resultados. A figura 2.7 apresenta o esquema do equipamento.

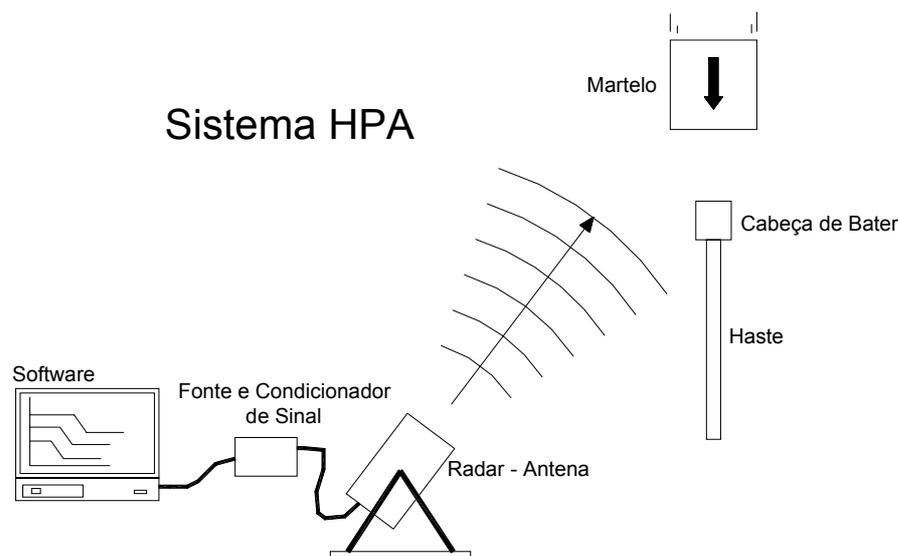


Figura 2.7 – Sistema de radar para determinar a velocidade de queda do martelo da PDI.

2.4.3 – Instrumentação Utilizada para a Determinação da Energia na Haste.

2.4.3.1 – Instrumentação utilizada por Kovacs

Kovacs, além dos sensores luminosos, utilizou uma célula de carga elétrica com capacidade para 178 kN, calibrada estaticamente, posicionada na haste a uma distância de no mínimo dez vezes o diâmetro da própria haste, abaixo da cabeça de bater. A célula de carga confeccionada possuía um diâmetro externo maior que o diâmetro da haste.

No campo, os dados lidos pelos sensores luminosos (superior e inferior) descrito no item 4.1.1, os dados da célula de carga e mais um registro de voz para comentários durante o ensaio e um sistema de precisão para marcações de tempo na fita magnética eram armazenados em um gravador de fita magnética. Os dados eram analisados a partir da fita magnética que descarregava as informações registradas dos sensores luminosos em um oscilógrafo, e os dados tanto dos sensores luminosos como da célula de carga em um osciloscópio com micro processador digital.

2.4.3.2 – Instrumentação utilizada por Schmertmann & Palacios (1979).

A instrumentação utilizada por Schmertmann e Palacios (1979) era constituída por duas células de carga uma de 89 kN e outra de 179 kN calibradas estaticamente. Estas células de carga foram confeccionadas com diâmetro externo de 7,62 centímetros, diâmetro interno de 3,175 centímetros e com uma altura de 6,35 centímetros. Para permitir o seu uso em diferentes hastes foi necessário o uso de adaptadores.

As células de carga foram instaladas uma junto a cabeça de bater e a outra junto ao amostrador. Os sinais vindo das células e do condicionador eram levados ao osciloscópio, armazenados na sua memória e exposto na tela. Da tela o sinal era fotografado com câmara polaróide. Os dados fotografados eram então digitalizados à mão, tomando-se 8 pontos por milissegundo, para os cálculos de energia em computador.

Foi utilizado um dispositivo de disparo externo ao osciloscópio, bem como um de espera para permitir que o martelo fosse levantado sem perturbar o sinal retido na tela. O esquema utilizado é apresentado na Figura 2.8.

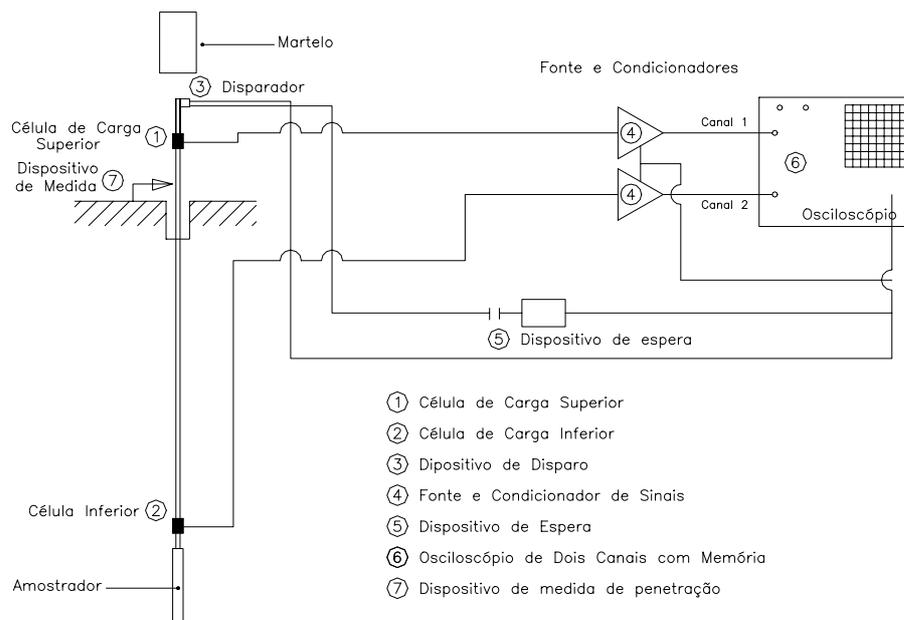


Figura 2.8 – Esquema da instrumentação. (Palacios, 1977).

2.4.3.3 – Instrumentação utilizada pela “Binary Instruments”.

A “Binary Instruments” desenvolveu um calibrador SPT, composto de uma célula de carga com capacidade de 178 kN. O sistema consta de uma fonte, um condicionador de sinal, um microprocessador, terminais para osciloscópio e um “display” digital. O equipamento fornece diretamente a energia transferida à haste contida na primeira onda de compressão incidente e a força máxima. A energia é calculada com base na equação (3.43) e dispõem de um dispositivo interno para permitir os ajustes possibilitando sua utilização para diferentes hastes, tais como do tipo A, AW, N e NW.

2.4.3.4 – Instrumentação utilizada no IPT

No Brasil, a determinação da energia transferida à haste de sondagem tem como pioneiro o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) tendo a sua frente o Eng. Antônio Belincanta. As primeiras medidas de energia no STP datam de 1982 (Belincanta, 1985). Os equipamentos utilizados pelo IPT para a determinação da energia tiveram uma evolução cronológica passando inicialmente por um sistema desenvolvido pelo próprio IPT (medidas de energia anteriores a 1982), utilização de equipamentos importados e utilização de equipamentos mistos com componentes desenvolvidos no IPT e importados (posterior a 1982). Finalmente a confecção de um sistema portátil para medidas de campo datada no início da década de 90.

2.4.3.4.1 – Instrumentação utilizada antes de 1982.

A determinação da energia transferida à haste foi calculada a partir de registros das curvas de força em função do tempo obtido através de um sistema composto de uma célula de carga elétrica instalada junto à extremidade superior da haste, uma fonte com condicionador de sinal e um osciloscópio. A Figura 2.9 apresenta o esquema de montagem do ensaio.

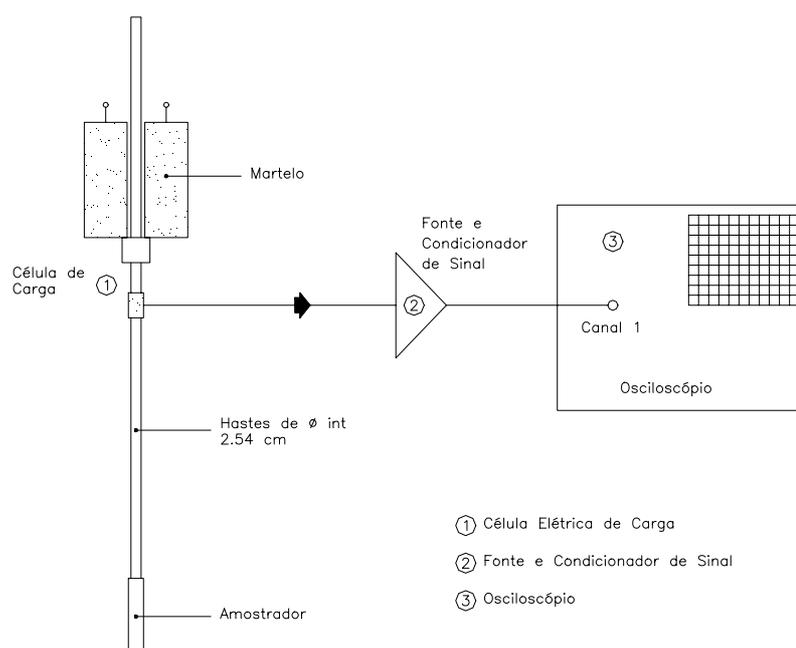


Figura 2.9 – Esquema da instrumentação utilizada no IPT antes de 1982. (Belincanta, 1985)

As células de carga foram montadas com extensômetros elétricos variáveis, tipo folha da Kyowa, e colocado em segmentos da própria haste. As células de carga foram calibradas estaticamente através de vários ciclos, sendo que a constante foi obtida através da média dos ciclos.

A fonte e condicionador de sinal foi a de modelo CDA 110, da Kyowa, e o osciloscópio utilizado foi um TEKTRONIX T-912 de 10Mhz que possui memória para dois canais. Os resultados dos ensaios realizados até 1982 não apresentaram consistência, indicando a necessidade de novos ensaios com outra instrumentação. Não são apresentados claramente os motivos que levaram a esta inconsistência nos resultados.

2.4.3.4.2 – Instrumentação utilizada posterior a 1982

A instrumentação realizada nestes ensaios consta de dois transdutores de deformação específica desenvolvidos pela “Pile Dynamics Inc” instalados junto à extremidade superior da haste, dois acelerômetros piezoelétricos da “PCB-Piezotronics Inc”, apresentando fundo de escala de 5.000 a 10.000 g’s (lineares a 5% acima de 10KHz), também instalados na extremidade superior da haste, conforme Figura 2.10.

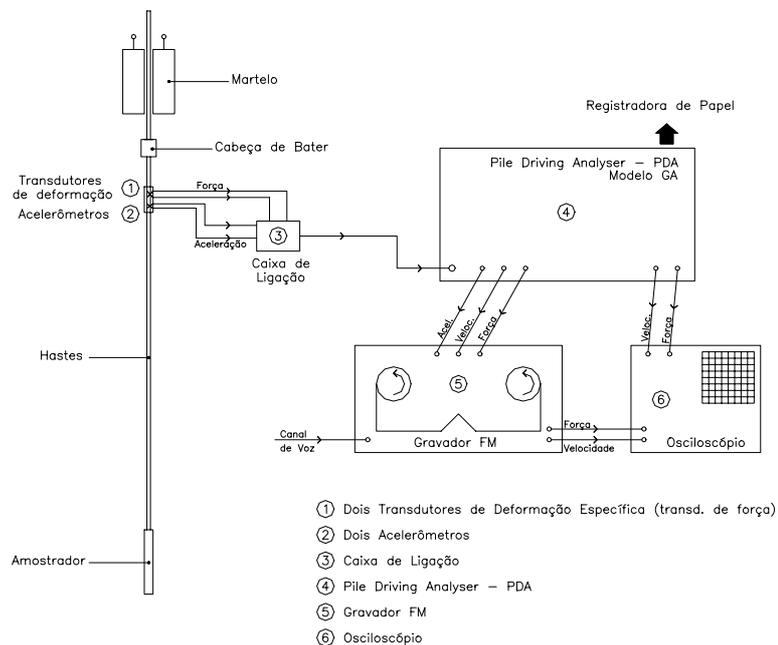


Figura 2.10 – Esquema de instrumentação utilizada em trabalhos no IPT, quando do uso de instrumentação importada. (Belincanta, 1985).

Os transdutores de deformação e os acelerômetros foram conectados a um analisador de sinais de estadas (PDA – da Pile Dynamics) que gravava os sinais em um gravador da HP modelo 3968. Os sinais podiam ser visualizados em um osciloscópio Tektronix, modelo T-912 de 10MHz.

Dificuldades foram encontradas com esta instrumentação principalmente com respeito aos acelerômetros. Uma série de modificações no sistema de fixação foi efetuada, sem sucesso, visto que os acelerômetros foram inicialmente desenvolvidos para monitoração de estacas. Foi observado que decorrido um intervalo de tempo de $2l/c$ (l igual ao comprimento da haste), a curva de velocidade apresentava irregularidades, demonstrando a saturação do sistema, causados por um desvio de zero dos acelerômetros. Varias alternativa para corrigir este problema foram tentadas, até mesmo a utilização de hastes mais rígidas com A e AW, mas sem sucesso.

2.4.3.4.3 – Instrumentação utilizada posterior a 1982 com instrumentação importada e de Fabricação no IPT

Para permitir a obtenção das curvas de força ao longo do tempo, na extremidade superior e inferior da haste, foi utilizada a instrumentação acima (item D.2) adicionada de duas células de carga confeccionadas pelo IPT, disposta uma em cada extremidade da haste, conforme Figura 2.11. Nestes ensaios não houve uma preocupação com a determinação do número de golpes do SPT, mas sim, na determinação da energia transferida para as hastes.

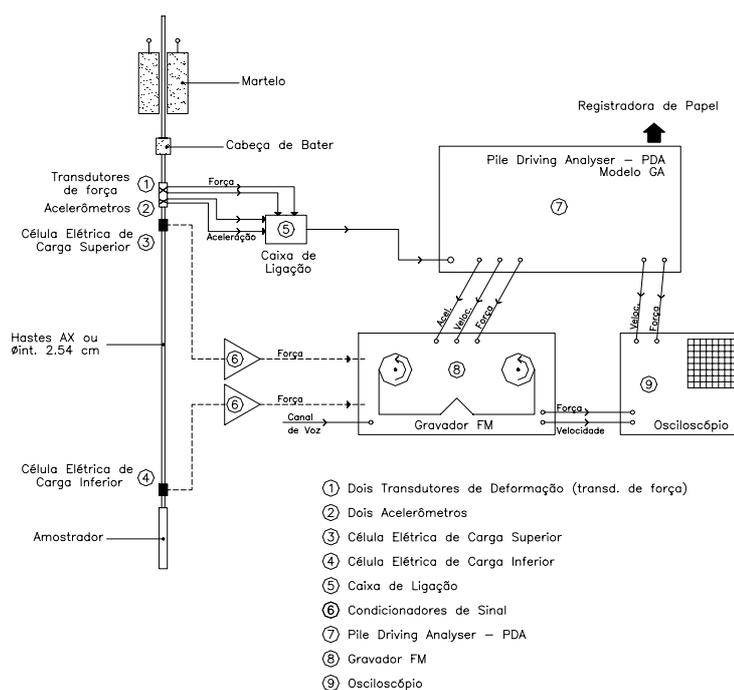


Figura 2.11 - Esquema de instrumentação utilizada em trabalhos no IPT, quando do uso de instrumentação importada e células de carga IPT. (Belincanta, 1985).

2.4.3.4.4 – Sistema Portátil desenvolvido no IPT

O IPT desenvolveu um sistema portátil constituído de “hardware” e “software” necessários à captação e armazenamento de sinais no campo, manuseio, interpretação e cálculo em escritório.

O sistema consta de duas células de carga, posicionadas na extremidade superior e outra na extremidade inferior da haste, um módulo de tratamento e condicionamento de sinal, uma placa conversora A/D e um microcomputador portátil. Figura 2.12.

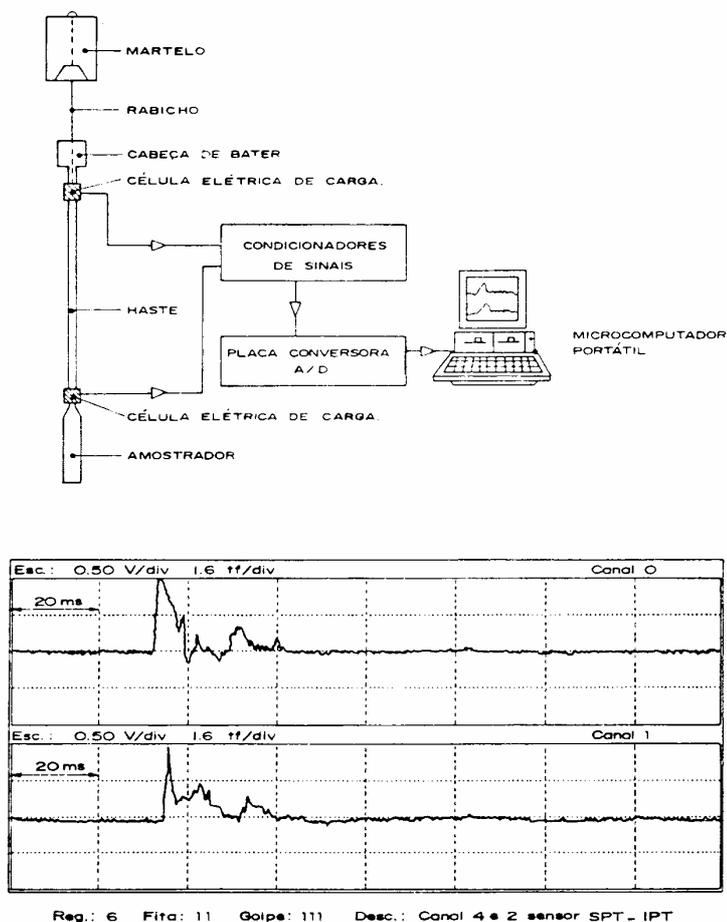


Figura 2.12 – Sistema portátil de aquisição de dados do tipo IPT (Belincanta 1998).

As células de cargas, para uso em haste de 25,4 milímetros de diâmetro nominal interno e de massa de 3,23 kg/m, foram confeccionadas em segmentos de 30 centímetros, de modo a manter a mesma impedância da haste. A superfície externa da célula de carga foi devidamente preparada para receber dois pares de extensômetros elétricos dispostos em oposição diametral.

Os quatro extensômetros foram ligados numa configuração de ponte de “Wheatstone” completa. A célula de carga foi calibrada estaticamente.

O módulo de tratamento e condicionamento de sinais possui dois canais, sendo cada um deles constituído por uma fonte de alimentação para os elementos sensores um amplificador de sinais e uma unidade de filtro. A placa conversora A/D é constituída por uma seção de processamento analógico, um conversor analógico/digital e um sistema de controle e de interface digital para microcomputador. O micro computador utilizado foi um “Notebook”, PC 486, DX 33 com 4MB de RAM e 240MB de disco rígido, com “slots” de expansão.

O “software” desenvolvido em linguagem Pascal com rotinas em Assembly, permite a aquisição do sinal, armazenamento em arquivo para posterior análise, dispõem de facilidades tais como o gráfico de força versus tempo, calcula o valor da força seccional máxima e a energia transferida a haste. Para o cálculo da energia, o “software” permite definir o intervalo (ponto inicial e final do sinal de força) de integração e calcula ainda a eficiência do sistema em relação à energia nominal de 474J. O programa desenvolvido permite a entrada de dados como a constante de calibração da célula de carga, fator de ampliação do sinal, massa por unidade de comprimento da haste, área da seção transversal da haste, massa do martelo e altura de queda, velocidade de propagação de impulsos de tensão, intervalo de tempo de exibição na tela e fundo de escala. Permite ainda a estimativa da energia absorvida pelo amostrador. Estes dados e gráficos podem ser impressos e o programa apresenta-os em forma de relatório. A Figura 2.10 também apresenta um gráfico das curvas de força ao longo do tempo apresentado na tela do computador ou no relatório impresso.

O sistema utilizado por Belincanta (1998), em sua tese de doutoramento, é o apresentado acima, utilizando porém somente a célula de carga superior.

2.4.3.5 – Instrumentação utilizada Pela Universidade Estadual Paulista – Ilha Solteira.

O sistema de determinação da energia desenvolvido na Universidade Estadual Paulista de Ilha Solteira consta de duas células de carga construídas em forma de colunas com capacidade de 100 kN, um medidor de deslocamentos baseado na variação da intensidade de luz sobre um foto transistor, colocado na célula superior, um condicionador de sinais e um conversor

analógico digital e um micro computador, (Menezes & Sobrinho, 1994). O esquema da disposição dos aparelhos de medição da energia e do funcionamento do sensor de deslocamento é apresentado na Figura 2.13.

O condicionador de sinais foi construído especialmente para o trabalho e consta basicamente de uma fonte e de um amplificador. O conversor analógico/digital utilizado foi fabricado pela MULTLAB, modelo PCL-711, instalado em “slot” livre do micro computador, possui 8 canais de entrada analógica para sinais com terra comum, além de portas digitais de entrada e saída, ambas de 8 bits. Um programa em linguagem C foi desenvolvido para realizar os cálculos.

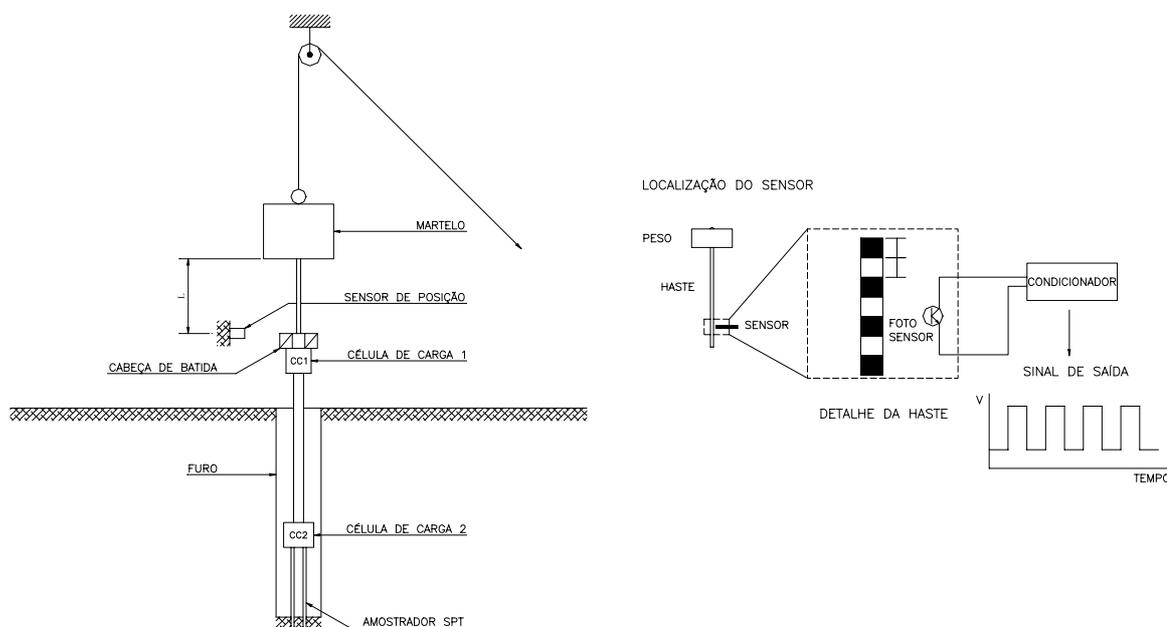


Figura 2.13 – Esquema dos aparelhos de medição e funcionamento do sensor de deslocamento (Menezes & Sobrinho, 1994).

2.4.3.6 – Sistema Utilizado por Matsumoto et al. (1992).

Para determinar a energia contida na onda de compressão gerada pela ação do golpe do martelo Matsumoto et al (1992), utilizaram o sistema denominado de *Two-point Strain Measurement*. O sistema consiste na instalação de *strain gauges* em dois pontos distintos da haste. Através de um sistema de equações baseado na teoria unidimensional de propagação de

onda. Estas equações, conforme citado pelos autores, são originárias do trabalho de Lundberg e Henchoz (1977).

2.4.3.7 – Sistema Utilizado por Cavalcante (2002) e Comercializado pela PDI.

Cavalcante (2002) utilizou para a realização de sua pesquisa um sistema dedicado exclusivamente para a determinação da energia transferida à composição das hastes pela aplicação de um golpe do martelo. O sistema é fabricado pela PDI (Pile Dynamics Incorporation) e é denominado comercialmente de SPT ANALYSER. O equipamento, que é relativamente compacto e de fácil mobilização, é constituído de uma unidade de aquisição de dados provida de um pequeno monitor, e é alimentado por uma bateria recarregável. Cabos e engates conectam o sistema a um segmento de haste de um metro de comprimento provido de instrumentação eletrônica que é composta de duas células de carga e dois acelerômetros piezoelétricos com capacidade de registrar acelerações de até 5000g. A Foto 2.01 apresenta o sistema de aquisição de sinal e o segmento de haste instrumentada. Os dados coletados no campo podem ser facilmente transferidos a um micro computador para análises futuras utilizando software específico ou planilhas eletrônicas.

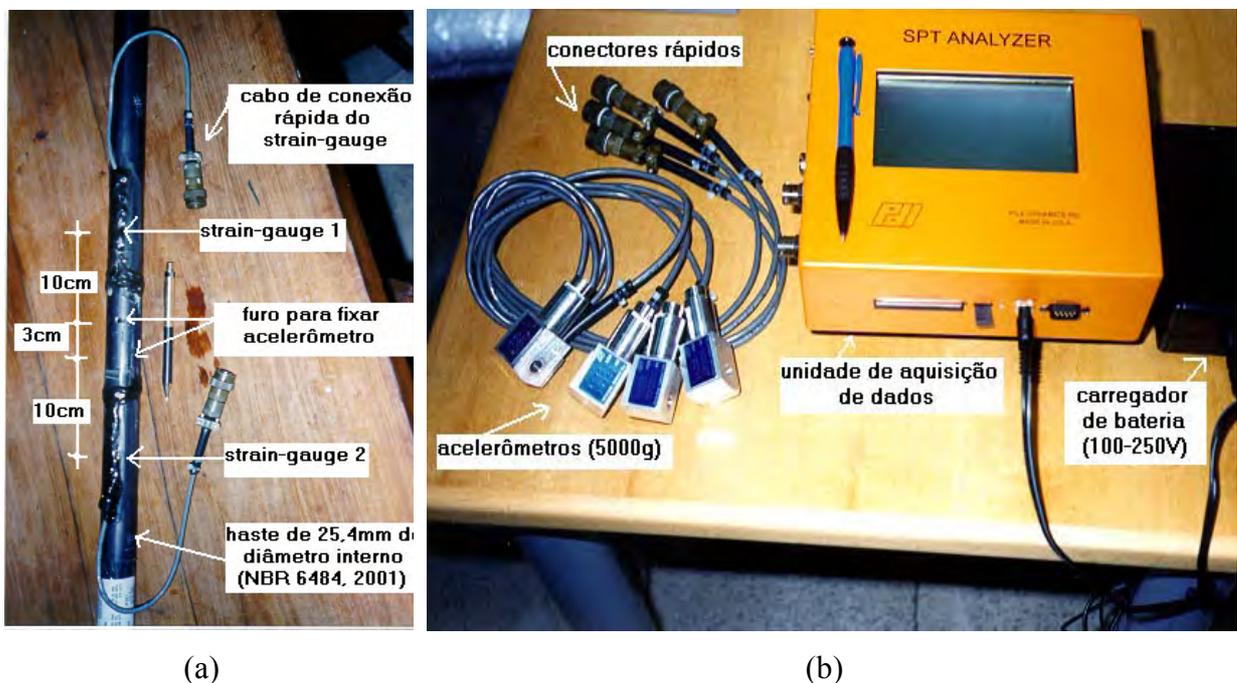


Foto 2.01. - a) Segmento de 1m de haste instrumentada com strain-gauges, mostrando os locais para fixação de acelerômetros; b) conjunto de acelerômetros e unidade de aquisição de dados, SPT Analyzer (Cavalcante et al – 2002).

2.4.4 Comentários Finais

Os equipamentos disponíveis no mercado para a determinação da energia contida na onda longitudinal de compressão que percorre a haste devido à aplicação de um golpe do martelo são fornecidos basicamente pela PDI (*Pile Dynamics Incorporation*), empresa norte americana que comercializa o equipamento denominado de *SPT Analyzer*. O equipamento é constituído por um par de extensômetros de deformação para determinar a força e um par de acelerômetros para determinar a velocidade da onda de compressão. Acompanham os sistemas um amplificador e condicionador de sinal, baterias, sistemas de armazenagem de sinal e um software de processamento dos sinais. Este pacote é fechado e dispõe de poucas variáveis introduzidas pelo operador o que os torna um tanto quanto limitados, principalmente quando se objetiva desenvolvimento de conhecimento técnico e pesquisas.

A necessidade da utilização de uma instrumentação constituída de uma célula de carga associada a um par de acelerômetros é consenso mundial quando se objetiva a determinação da energia contida na onda longitudinal de tensão que percorre a haste devido à aplicação de um golpe do martelo. Adicionalmente é de consenso que a energia deve ser obtida pela integração do produto dos sinais de força e de velocidade ao longo do tempo em intervalo de integração suficiente para que todas as energias (cinéticas e potenciais elásticas) tenham sido dissipadas.

De forma não comercial há o desenvolvimento de vários equipamentos com os mesmos objetivos dos acima apresentados citados na literatura. Estes equipamentos são menos sofisticados, mas, apresentam um carácter académico permitindo o total domínio sobre o equipamento e sobre o sinal adquirido facilitando o desenvolvimento de pesquisas. Entre estes equipamentos pode-se citar o desenvolvido na Universidade Estadual Paulista de Ilha Solteira (Menezes & Sobrinho, 1994), o apresentado por Matsumoto et al (1992) e citado por Fujita (2000). Ambos equipamentos não utilizam acelerômetros para a determinação da velocidade a partir da integração dos sinais de aceleração.

CAPÍTULO 3

TEORIA DA EQUAÇÃO DA ONDA

3.1 - INTRODUÇÃO

Quando uma força é aplicada dinamicamente em um corpo elástico, sua ação não é transmitida instantaneamente a todas as partes do corpo que recebe esta força. Ondas de tensões e de deformações são irradiadas e propagadas com velocidades finitas no interior desse corpo. No caso específico de uma força aplicada a uma barra elástica, há a formação de uma onda longitudinal de tensão que se propaga ao longo da barra, transmitindo a força. A equação que descreve esse fenômeno é encontrada na literatura (Timoshenko & Goodier, 1970).

A aplicação do problema de propagação de ondas de tensão em estacas e haste de sondagem é abordada por diversos autores (e.g. Smith, 1960; Skov, 1982; Bernardes, 1989; Belincanta, 1985). O enfoque dado por Skov é de especial interesse, pois uma haste de sondagem sujeita a uma força bruscamente aplicada é um caso particular de uma estaca onde somente a resistência de ponta é mobilizada.

A seguir é apresentada e deduzida a equação da onda que propaga em uma barra, a solução analítica é deduzida e as condições de contorno são demonstradas. O fenômeno do impacto de um martelo sobre uma barra é discutido e tratado matematicamente. O mecanismo de transferência de energia ao amostrador é apresentado, bem como as equações para a determinação da energia contida em uma onda longitudinal.

3.2 – DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DA ONDA

A Figura 3.1 apresenta esquematicamente o fenômeno que ocorre quando um martelo com uma massa “ M_p ” que cai de uma altura “ h ” e aplica uma força (golpe) em uma das extremidades de uma barra elástica com módulo “ E ” e área transversal “ A ”. O termo barra será denominado de haste ou composição de hastes de sondagem, por ser mais apropriado ao

presente trabalho, mas poderá ser referido simplesmente por barra ou estaca, como for mais conveniente, já que a dedução que segue se aplica perfeitamente a estes casos.

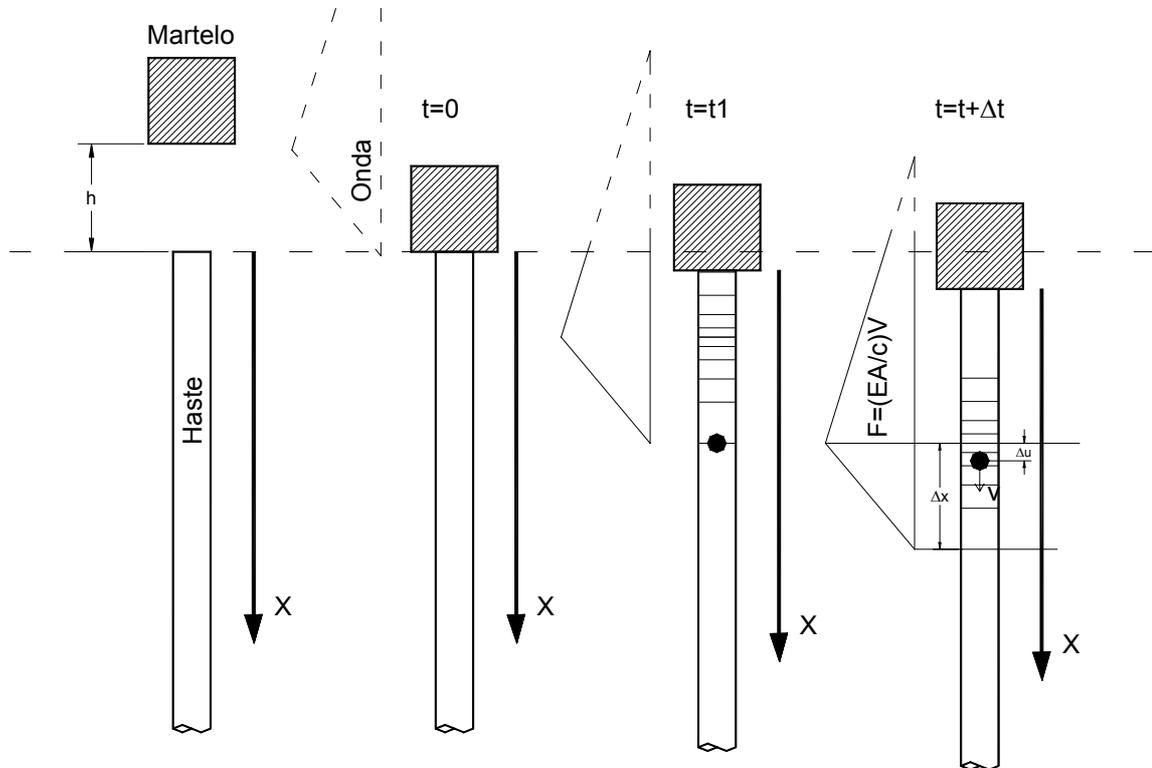


Figura 3.1 – Formação da Onda Longitudinal de Tensão (Skov,1982).

Para esta dedução são adotadas hipóteses simplificadoras, tais como:

- 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 nas hastes são desprezíveis;
- f) a onda longitudinal de compressão se propaga nas hastes com velocidade “c” constante que depende, exclusivamente, das características do material constituinte das hastes (densidade e

módulo de elasticidade);

g) as hastes são constituídas por material elástico linear.

A partir da lei de Hooke tem-se:

$$\sigma = E\varepsilon$$

$$\frac{F}{A} = E \frac{\Delta u}{\Delta x} \quad (3.1)$$

$$\frac{F}{A} = E \frac{\Delta u}{\Delta t} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (3.2)$$

Como:

$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3.3)$$

$$V = \frac{\Delta u}{\Delta t} \quad (3.4)$$

$$a_c = \frac{V}{\Delta t} \quad (3.5)$$

Tem-se

$$F = \frac{EA}{c} V \quad (3.6)$$

Onde : c = velocidade de propagação da onda (no caso de hastes metálicas c = 5120m/s);

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 = 210,0 GPa);

a_c = aceleração da partícula;

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;

Pode-se observar 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 (impedância da haste).

$$Z_h = \frac{EA}{c} \tag{3.7}$$

A lei de Newton pode ser utilizada para a mesma seção Δx ;

$$F = ma_c \tag{3.8}$$

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

ρ = massa específica da haste (ρ = massa específica do aço = 7810 kg/m^3)

$$F = \rho A \Delta x \frac{V}{\Delta t} \tag{3.9}$$

Reescrevendo a equação (3.9) tem-se:

$$F = \rho A \frac{\Delta x}{\Delta t} V = \rho A c V \tag{3.10}$$

Das equações (3.6) e (3.10), tem-se:

$$F = \frac{EA}{c} V = \rho A c V \quad \Rightarrow \quad c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{3.11}$$

A equação da onda de tensão pode ser derivada utilizando a lei de Newton ($F = ma_c$) e a de Hooke ($F = EA\Delta u/\ell$ onde u = deslocamento).

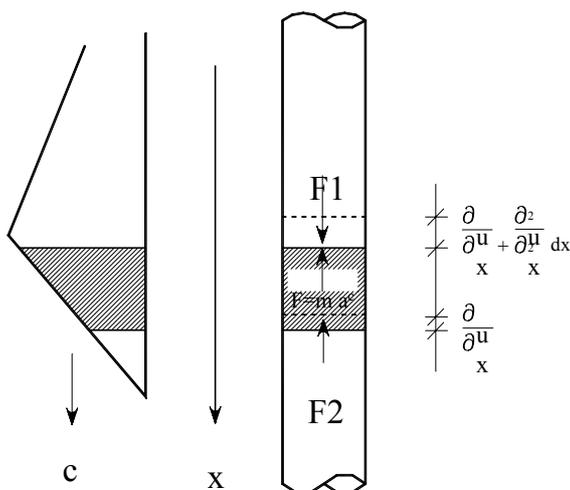


Figura 3.2 – Representação esquemática da propagação de uma onda de tensão em uma haste de sondagem (Skov, 1982).

$$F_1 = F_2 + ma_c \quad (3.12)$$

Assim:

$$EA \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx \right) - EA \frac{\partial u}{\partial x} - \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (3.13)$$

Rearranjando a equação (3.13) tem-se:

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

Finalmente se obtém a equação (3.14) que é a equação geral que descreve a propagação longitudinal de tensão, (equação do movimento) no interior da haste, na condição particular onde é desprezado o atrito lateral ao longo da haste.

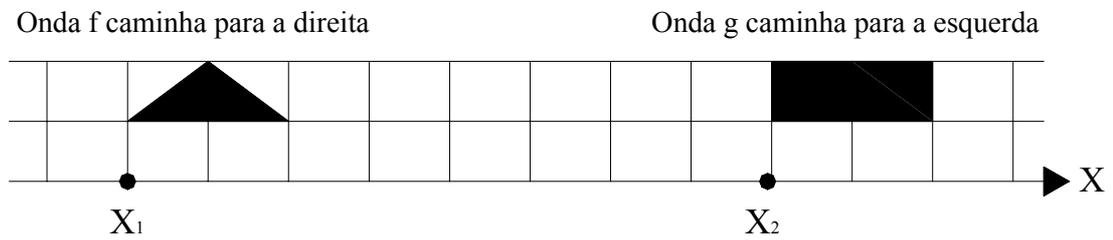
$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3.14)$$

A solução da equação (3.14), que é uma equação diferencial parcial de 2° ordem e que representa o deslocamento u de uma partícula, situada a uma distância x do topo da estaca, após decorrido um tempo t da aplicação do golpe do martelo é dada pela expressão abaixo.

$$u(x,t) = f(x-ct) + g(x+ct) \quad (3.15)$$

As duas funções f e g arbitradas, correspondem a duas ondas se propagando com a mesma velocidade c mas em direções contrárias, Figura 3.3 e 3.4.

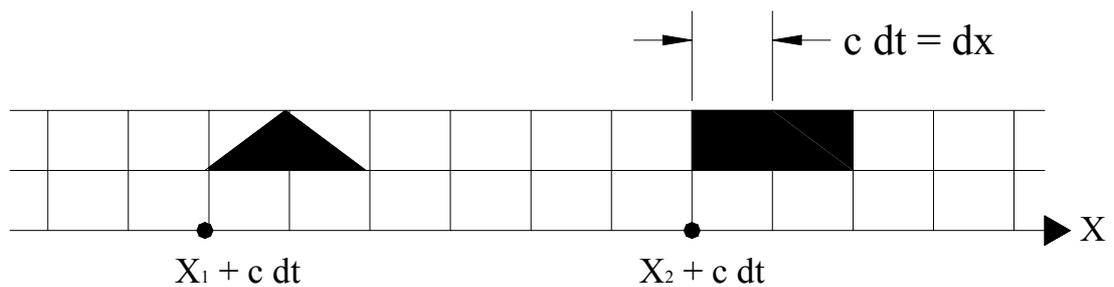
No tempo t



$$u(x,t) = f(x_1-ct) + g(x_2+ct)$$

Figura 3.3 – Comportamento das ondas no instante t. (Timoshenko & Goodier,1970)

No tempo t+dt (posterior)



$$u(x,t) = f((x_1 + dx) - c(t + dt)) + g((x_2 - dx) + c(t+dt))$$

$$u(x,t) = f(x_1 - ct + dx - cdt) + g(x_2 - ct - dx + cdt)$$

$$u(x,t) = f(x_1 - ct) + g(x_2+ct)$$

Figura 3.4 – Comportamento das ondas no instante t+dt. (Timoshenko & Goodier,1970).

Observa-se que as ondas somente se deslocam em sentido ao longo do tempo sem que haja mudanças em sua forma. Para facilitar a compreensão e o estudo da propagação destas ondas ao longo de uma barra, autores como Beringen et. al. (1980) e Skov (1982), sugeriram a utilização de flechas indicativas do sentido de propagação das mesmas (ascendente ou descendente) em relação a um referencial. Desta forma a equação (3.15) pode ser representada como segue.

$$u(x,t) = f(x_1-ct) + g(x_2+ct) = u_{\downarrow} + u_{\uparrow} \tag{3.16}$$

3.3 – INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO

Como apresentado no item anterior, a equação geral de propagação de uma onda longitudinal de tensão, que é uma equação linear de segunda ordem, tem como solução à equação (3.15) que representa a soma de uma onda ascendente e uma descendente. Portanto para analisarmos a influência das condições de contorno tais como mudança de seção, extremidade da haste, resistência do solo por atrito e mudança de impedância, basta para o ponto em questão verificar as condições de equilíbrio de força e compatibilidade das velocidades. O desenvolvimento deste estudo implica em uma perfeita definição dos sinais para a velocidade e dos esforços de tensão ou força, bem como a adoção de indicadores gráficos do sentido de propagação das ondas. Para facilitar, apresenta-se abaixo, de forma sucinta, a convenção de sinais e indicadores gráficos adotada e as condições de contorno consideradas. (Figura 3.5).

Força de Compressão $\Rightarrow (+)$

Força de Tração $\Rightarrow (-)$

$$V\downarrow = F\downarrow/Z \quad (3.16)$$

$$V\uparrow = -F\uparrow/Z \quad (3.17)$$

3.3.1 - Extremidade da Haste

Depois de decorrido o tempo ℓ/c , a onda de impacto atinge o amostrador. As características da onda refletida e da onda transmitida ao solo vão depender das condições do solo na ponta do amostrador. Duas condições limites podem ocorrer: a) resistência da ponta é nula ($R_p=0$), b) a resistência do solo é tal que confere um situação de engaste do amostrador ($R_p=\infty$), ou seja, o deslocamento é nulo ($x=0$). Tais condições são ilustradas na Figura 3.5.

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

$$R_p = F_1\downarrow + F_1\uparrow \quad (\text{Equilíbrio}) \quad (3.18)$$

$$V_p = V\downarrow + V\uparrow \quad (\text{Compatibilidade}) \quad (3.19)$$

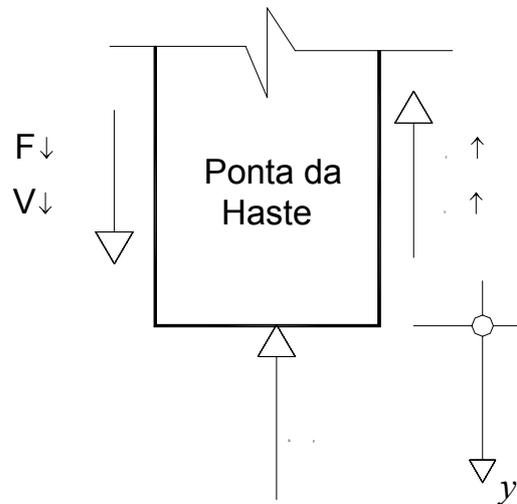


Figura 3.5 – Condições de contorno na ponta da haste. (Skov, 1982).

3.3.1.1 – Extremidade da Haste Livre

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

$$R_p = 0 \Rightarrow F^\uparrow = -F^\downarrow \quad (3.20)$$

$$V_p = V^\downarrow + V^\uparrow \quad (3.21)$$

$$V_p = F^\downarrow/Z - F^\uparrow/Z \quad (3.22)$$

$$V_p = F^\downarrow/Z - (-F^\downarrow/Z) = 2F^\downarrow/Z = 2V^\downarrow \quad (3.23)$$

Para a onda refletida na extremidade livre da haste a partícula tem velocidade positiva (descendente) e força negativa. Neste caso a superposição do sinal refletido com a primeira onda de compressão descendente mostrará uma redução da força e um aumento da velocidade. A Figura 3.6 – a mostrado o efeito apresentado acima.

3.3.1.2 – Extremidade da Haste Engastada

No caso em que o deslocamento é nulo, ponta engastada, a velocidade da partícula é nula resultando numa duplicação da força como mostrado a seguir.

$$V_p = 0 \Rightarrow V \uparrow = -V \downarrow \quad (3.24)$$

$$R_p = F \downarrow + F \uparrow \quad (3.25)$$

$$R_p = ZV \downarrow - ZV \uparrow \quad (3.26)$$

$$R_p = ZV \downarrow - (-ZV \downarrow) = 2ZV \downarrow = 2F \downarrow \quad (3.27)$$

Neste caso a onda refletida é uma onda de compressão com velocidade das partículas negativas, o que provocará um aumento da força e uma diminuição da velocidade quando superposta à primeira onda de compressão descendente. Na Figura 5.6 – b pode ser visto o efeito mostrado acima.

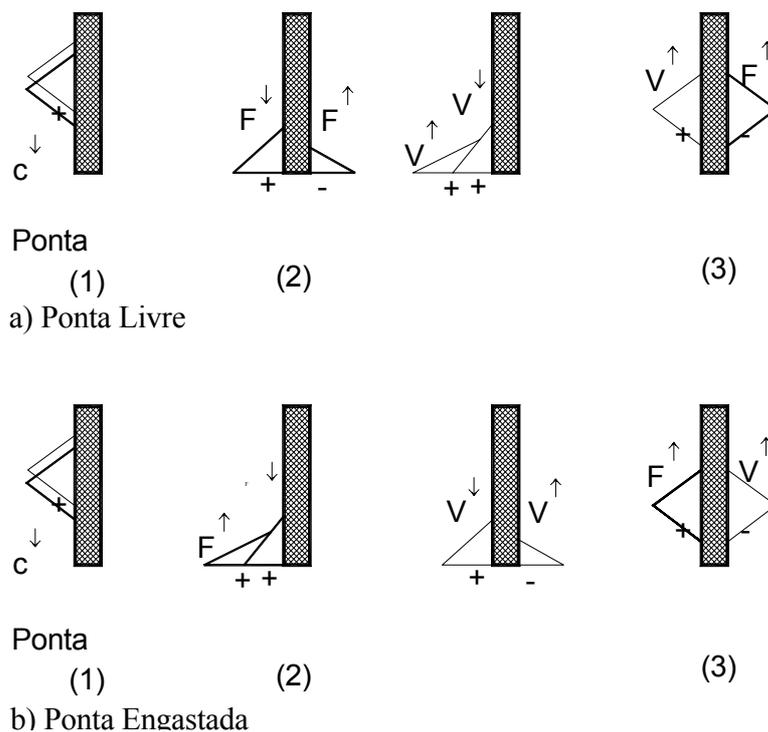


Figura 3.6 – Reflexão das ondas de Força e Velocidade na ponta da haste. (Skov, 1982).

3.3.1.3 – Haste com Extremidade Semi-Engastada

Para a análise desta condição impõe-se que a força final na extremidade semi-engastada é igual a resistência oferecida pelo solo.

$$R_p = F_{\downarrow} + F_{\uparrow} \quad \text{ou} \quad F_{\uparrow} = R_p - F_{\downarrow}$$

Pela expressão acima, considerando 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 das hastes pode ser calculada pela expressão:

$$V = V_{\downarrow} + V_{\uparrow} = F_{\downarrow}/Z - (R_p - F_{\downarrow})/Z = (2F_{\downarrow} - R_p)/Z$$

Observa-se que na realidade, para que seja mobilizada a força do solo R_p , deverá obrigatoriamente haver um pequeno deslocamento da ponta da haste. Quanto menor esse deslocamento menor 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.

3.3.2 – Atrito Lateral na Haste

Para analisar a influência de um possível atrito lateral na composição de haste deve-se estabelecer compatibilidade das forças e das velocidades entre as seções compreendidas antes e após o ponto de atrito (W).

Da figura 3.7 pode-se escrever:

$$F_{1\downarrow} + F_{1\uparrow} = F_{2\uparrow} + \downarrow F_2 + W$$

$$V = F_{1\downarrow}/Zh_1 - F_{1\uparrow}/Zh_1 = -F_{2\uparrow}/Zh_2 + F_{2\downarrow}/Zh_2$$

Como a haste não muda de material e seção $Zh_1 = Zh_2$.

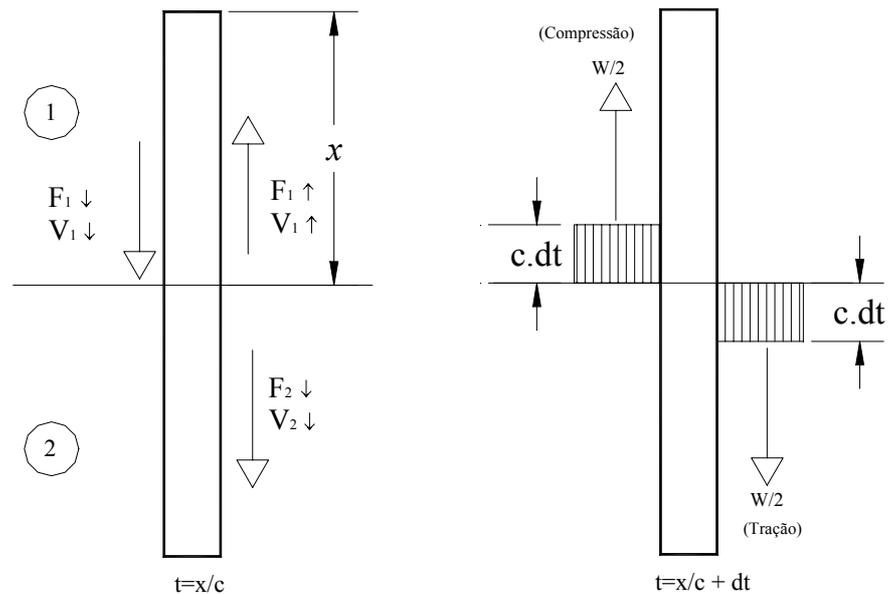


Figura 3.7 – Ondas Geradas num ponto intermediário da haste – Atrito Lateral.(Skov, 1982)

$$F_{1\uparrow} = F_{2\uparrow} + 1/2W \tag{3.28}$$

$$F_{2\downarrow} = F_{1\downarrow} - 1/2W \tag{3.29}$$

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.

3.3.2 – Mudança de Impedância na Haste.

A mudança de seção, em uma profundidade z , que ocorre, por exemplo, na junção do conjunto de hastes com o amostrador faz com haja uma mudança de impedâncias de Z_1 para Z_2 . Nesse ponto a onda inicial (F_1, V_1) será parcialmente transmitida (F_2, V_2) e parcialmente refletida, como indicado na Figura 3.8.

Essa mesma descontinuidade pode ser observada no elemento de ligação de uma haste com outra, ou seja na luva.

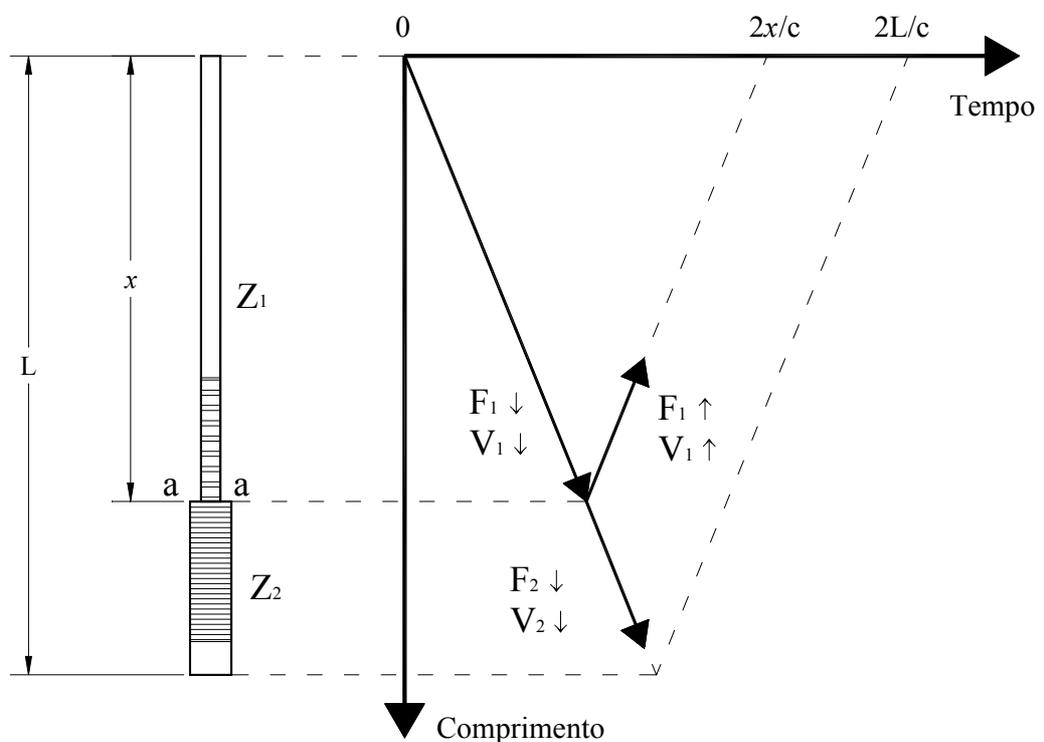


Figura 3.8– Propagação da onda de tensão em um ponto de descontinuidade.(Skov, 1982)

As forças e velocidades estão em equilíbrio acima e abaixo da descontinuidade, logo:

$$F = F_1\downarrow + F_1\uparrow = F_2\downarrow \quad (\text{Equilíbrio}) \quad (3.30)$$

$$V = V_1\downarrow + V_1\uparrow = V_2\downarrow \quad (\text{Compatibilidade}) \quad (3.31)$$

Resolvendo simultaneamente as equações acima, a força e a velocidade transmitidas são dadas pelas equações:

$$F_2 \uparrow = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} F_1 \downarrow \quad (3.32)$$

e

$$V_2 \downarrow = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} V_1 \downarrow \quad (3.33)$$

Substituindo-se $F_2\downarrow$ na equação (3.30) e $V_2\downarrow$ na equação (3.31), a força e a velocidade refletidas são respectivamente:

$$F_1 \uparrow = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} F_1 \downarrow \quad (3.34)$$

$$V_1 \uparrow = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} V_1 \downarrow \quad (3.35)$$

Na Tabela 3.1 são apresentados os resultados das ondas refletidas que podem ocorrer devido à descontinuidade, dependendo da relação Z_1 e Z_2 .

Se $Z_1 = Z_2$ a onda transmitida é igual à onda inicial e não haverá onda refletida.

Se $Z_1 > Z_2$, redução da seção, 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 3.8.

Se $Z_1 < Z_2$, aumento de seção, a onda refletida será de compressão, resultando numa redução da velocidade e aumento da força no topo da haste após decorrido o tempo $t = 2x/c$.

Tabela 3.1- Ondas Refletidas pela Descontinuidade da Haste. (Bernardes, 1989).

	$Z_1 = Z_2$	$Z_1 \gg Z_2$	$Z_1 \ll Z_2$
Onda Inicial			
Onda Refletida			
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

3.4 – IMPACTO DO MARTELO SOBRE O CONJUNTO DE HASTE.

3.4.1. – Impacto do Martelo Rígido Sobre o Conjunto de Hastes

A Figura 3.9 apresenta o Martelo Rígido, de massa M_p , que cai de uma altura h , sobre o conjunto de hastes. A velocidade com que o martelo atinge a haste é V . O equilíbrio de forças na parte superior da haste ($x = 0$) para um tempo (t) após o impacto é dado pela equação (3.36).

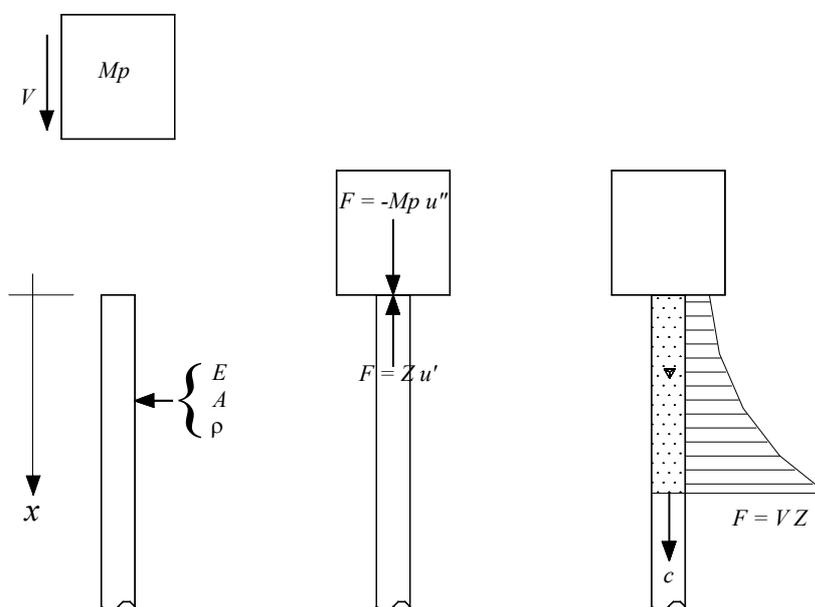


Figura 3.9 – Onda de impacto para um martelo rígido e um conjunto de haste elástica, (Bernardes, 1989).

$$M_p u''(t) + Z u'(t) = 0 \tag{3.36}$$

Onde: M_p = Massa do Martelo;
 Z = Impedância da haste;

u' = Velocidade da partícula no topo da haste;

u'' = Aceleração da partícula no topo da haste.

Rearranjando a equação (3.36) tem-se:

$$u''(t) + \frac{Z}{M_p} u'(t) = 0 \quad (3.37)$$

A equação (3.37) é uma equação diferencial homogênea de segunda ordem. A sua equação característica é $(\lambda + 0)(\lambda + Z/M_p) = 0$. A solução da equação diferencial acima, desde que suas raízes $\lambda_1 = 0$ e $\lambda_2 = -Z/M_p$ são reais e distintas é:

$$u(t) = C_1 e^{0t} + C_2 e^{-\frac{Z}{M_p}t} \quad (3.38)$$

$$u(t) = C_1 + C_2 e^{-\frac{Z}{M_p}t} \quad (3.39)$$

Onde C_1 e C_2 são constantes de integração que depende das condições de contorno. No instante do impacto a deformação da haste é zero [$u(0) = 0$] e a velocidade da partícula é igual a velocidade no martelo [$u'(0) = V$].

Para $u(0) = 0$ tem-se:

$$0 = C_1 + C_2 e^{-\frac{Z}{M_p}0} \quad \therefore C_1 = -C_2$$

Para $u'(0) = V$, tem-se:

$$u'(t) = C_2 e^{-\frac{Z}{M_p}t} \frac{d}{dt} \left(-\frac{Z}{M_p} t \right)$$

$$u'(t) = C_2 e^{-\frac{Z}{M_p}t} \left(-\frac{Z}{M_p} \right)$$

$$V = C_2 e^0 \left(-\frac{Z}{M_p} \right) \quad (3.40)$$

$$C_2 = -\frac{VM_p}{Z}$$

e

$$C_1 = \frac{VM_p}{Z}$$

Substituindo os valores de C_1 e C_2 na equação (3.39) tem-se:

$$u(t) = \frac{VM_p}{Z} \left(1 - e^{-\frac{Z}{M_p}t} \right) \quad (3.41)$$

A solução geral da função de x e t de acordo com a equação (3.16) é do tipo $u(x-ct)$. Portanto, o tempo t deve ser combinado com x , ou seja, $(t - x/c)$. Introduzindo $(t - x/c)$ na equação (3.41) tem-se:

$$u(x,t) = \frac{VM_p}{Z} \left(1 - e^{-\frac{Z}{M_p}(t-\frac{x}{c})} \right) \quad (3.42)$$

A força de impacto é dada por:

$$F(x,t) = Zu'(x,t)$$

$$F(x,t) = VZe^{-\frac{Z}{M_p}(t-\frac{x}{c})} \quad (3.43)$$

3.4.2 – Impacto do Martelo Elástico sobre o Conjunto de Hastes

Seja o martelo da Figura 3.10 com área A_m , altura L e módulo de elasticidade E que cai de uma altura h , atingindo uma haste com uma área “A”, um comprimento ℓ , módulo de elasticidade E , com velocidade V .

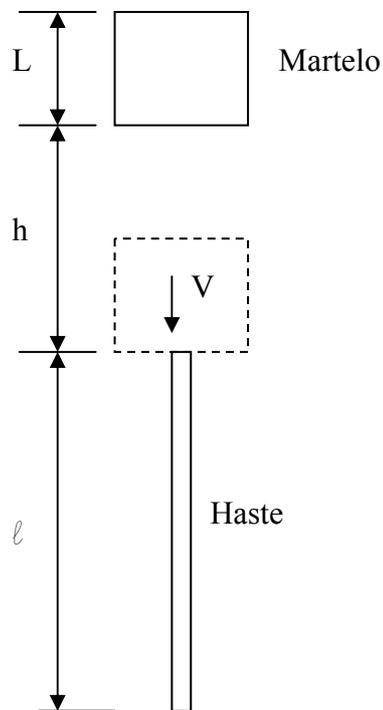


Figura 3.10 – Esquema do impacto do martelo no conjunto de hastes.

Admitindo-se contato pleno entre a seção da extremidade superior da haste e inferior do martelo, ambas estão sujeitas a duas condições:

- As forças na interface da extremidade do martelo e da haste devem ser iguais;
- As velocidades nestas duas seções também devem ser iguais.

As forças no martelo, provenientes da propagação das ondas longitudinais de tensão, serão denominadas de F_p e na haste de F_h . Considera-se também que essa força se distribui uniformemente em toda a seção transversal imediatamente após o impacto.

Quando o martelo entra em contato com a haste surgem imediatamente duas ondas longitudinais de tensão que se propagam em sentidos opostos: uma onda ascendente no martelo, v_{po} , e outra descendente na haste, v_{ho} , com velocidade de propagação c . (Figura 3.11-B). No tempo $t = L/c$, (Figura 3.11-C), a onda de tensão gerada no instante da colisão do martelo com a haste é refletida na parte superior do martelo atingindo novamente o ponto de

contato do martelo com a haste (base do martelo) no tempo $t = 2L/c$, Figura 3.11-E. Como o material que compõem a haste e o martelo é o mesmo, e portanto possuem a mesma velocidade de propagação da onda “c”, a distância percorrida pela onda na haste tem um comprimento igual a $2L$, Figura 3.11-E. Cabe lembrar que a velocidade da partícula dobra na extremidade livre, ver item 3.3.1, retornando um velocidade $2v_{po}$. Neste instante novamente as condições de força e velocidade, acima citadas, devem ser satisfeitas. Como houve uma desaceleração de $V-2v_{po}$ no martelo e a velocidade das partículas da haste ainda é de v_{ho} há um desequilíbrio de velocidades, Figura 3.11-E. Este equilíbrio é restabelecido com a introdução de um novo pulso de tensão na haste, este de menor intensidade, gerando um novo pulso ascendente no martelo e um pulso descendente na haste, Figura 3.11-E. Este processo é repetido sucessivamente até o amortecimento final do martelo ou a chegada da onda longitudinal de tensão refletida na extremidade inferior da haste, separando momentaneamente o martelo da haste e interrompendo o processo.

Conforme, citado anteriormente, as duas condições de equilíbrio de força e velocidade, devem ser satisfeitas:

$$F_{po} = F_{ho}$$

e

$$V - v_{po} = v_{ho}$$

As velocidades podem ser expressas em termos de força, levando-se em consideração as impedâncias.

$$V - \frac{F_{po}}{Z_p} = \frac{F_{ho}}{Z_h}$$

$$F_{ho} \left(\frac{1}{Z_p} + \frac{1}{Z_h} \right) = V$$

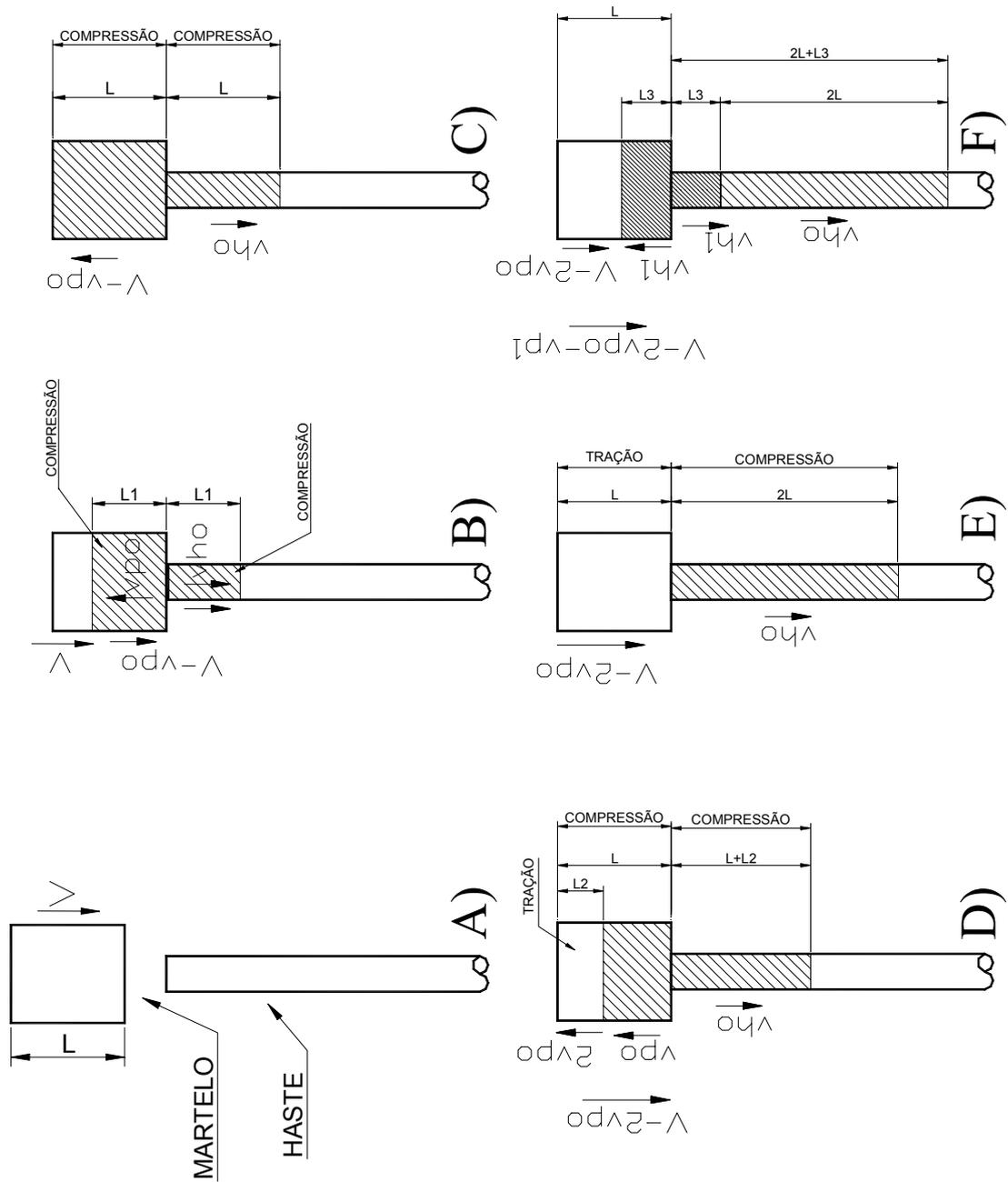


Figura 3.11 Esquema de geração de impulsos de tensão.

$$Fho = V \frac{Z_p Z_h}{Z_p + Z_h} \quad (3.44)$$

Recordando que, quando a onda de tração alcança a extremidade inferior do martelo, o mesmo é desacelerado de $V-2vpo$, que o torna incompatível com a velocidade da extremidade superior das hastas, que ainda é de vho . Nesse instante deve-se estabelecer novamente as condições da compatibilidade de forças e velocidade, portanto:

$$Fp1 = Fh1$$

$$(V - 2vpo) - vp1 = vh1$$

Ou

$$\left(V - \frac{2Fho}{Z_p} \right) - \frac{Fh1}{Z_p} = \frac{Fh1}{Z_h}$$

$$Fh1 \left(\frac{1}{Z_p} + \frac{1}{Z_h} \right) = V - \frac{2Fho}{Z_p}$$

$$Fh1 = \left(V - \frac{2Fho}{Z_p} \right) \left(\frac{Z_p Z_h}{Z_h + Z_p} \right)$$

Substituindo a equação (3.44) na equação acima tem-se:

$$Fh1 = V \left(1 - \frac{2Z_h}{Z_p + Z_h} \right) \left(\frac{Z_p Z_h}{Z_h + Z_p} \right)$$

$$Fh1 = V \left(\frac{Z_p - Z_h}{Z_p + Z_h} \right) \left(\frac{Z_p Z_h}{Z_h + Z_p} \right) \quad (3.45)$$

Após, decorrido o tempo $t = 4L/c$, o martelo terá velocidade igual a $V - 2v_{po} - 2v_{p1}$ que deverá, novamente ser compatibilizada com a velocidade da partícula da extremidade superior da haste, logo:

$$V - 2v_{po} - 2v_{p1} - v_{p2} = v_{h2}$$

pela compatibilidade das forças, tem-se:

$$V - \frac{2Fh_0}{Z_p} - \frac{2Fh_1}{Z_p} - \frac{Fh_2}{Z_p} = \frac{Fh_2}{Z_h}$$

Introduzindo as equações (3.37) e (3.38) na equação acima e isolando Fh_2 tem-se:

$$V - \frac{2VZ_h}{Z_p + Z_h} - 2V \left(\frac{Z_p - Z_h}{Z_p + Z_h} \right) \left(\frac{Z_h}{Z_p + Z_h} \right) = \frac{Fh_2}{Z_p} + \frac{Fh_2}{Z_p}$$

$$V \left[1 - \frac{2Z_h}{Z_p + Z_h} - 2 \left(\frac{Z_p - Z_h}{Z_p + Z_h} \right) \left(\frac{Z_h}{Z_p + Z_h} \right) \right] = Fh_2 \left(\frac{Z_p + Z_h}{Z_p Z_h} \right)$$

$$V \left[1 - \frac{2Z_h}{Z_p + Z_h} \left(1 + \frac{Z_p - Z_h}{Z_p + Z_h} \right) \right] = Fh_2 \left(\frac{Z_p + Z_h}{Z_p Z_p} \right)$$

$$V \left[1 - \frac{2Z_h}{Z_p + Z_h} \left(\frac{2Z_p}{Z_p + Z_h} \right) \right] = Fh_2 \left(\frac{Z_p + Z_h}{Z_p Z_h} \right)$$

$$V \left(\frac{Z_p^2 + 2Z_p Z_h + Z_h^2 - 4Z_p Z_h}{(Z_p + Z_h)^2} \right) = Fh_2 \left(\frac{Z_p + Z_h}{Z_p Z_p} \right)$$

$$Fh_2 = V \frac{Z_p Z_h}{Z_p + Z_h} \left(\frac{Z_p - Z_h}{Z_p + Z_h} \right)^2 \tag{3.46}$$

A partir da chegada da terceira onda de tração no martelo tem-se:

$$Fh_3 = V \frac{Z_p Z_h}{Z_p + Z_h} \left(\frac{Z_p - Z_h}{Z_p + Z_h} \right)^3 \tag{3.47}$$

A chegada da terceira onda longitudinal de tensão na extremidade inferior do martelo e consequentemente na extremidade superior da haste corresponde a um intervalo de tempo $t = 6L/c$. A frente da onda longitudinal de tensão, no interior da haste, já atingiu uma distância de $6L$. Esse processo continua assim, sucessivamente, até o amortecimento final do martelo, que teoricamente ocorre em um tempo $t = \infty$. É fácil de entender que, após um determinado tempo, os pulsos vão sendo amortecidos e reduzidos a valores de força que não contribuem mais significativamente na onda de compressão. Como a haste tem um comprimento finito, a onda de compressão longitudinal é refletida na sua parte inferior. Esta onda refletida é normalmente de tração e atinge a extremidade superior da haste no tempo $t = 2\ell/c$ (onde $\ell =$ comprimento da haste). Neste instante, em que a onda de tração atinge a extremidade superior da haste, ou seja, o ponto de contato entre a haste e o martelo, há um choque e a onda de tração empurra o martelo para cima, provocando a perda de contato do martelo com a haste e interrompendo o fluxo de pulsos de tensões que alimenta a haste. É, portanto, fácil de se concluir que a transferência do fluxo de pulsos do martelo para a haste é total quando o comprimento da haste é suficientemente grande, e nesse caso a energia total contida no martelo já foi transferida para a haste, salvo eventuais perdas, tais como as que ocorrem no instante do choque do martelo com a haste. Quando a haste tem um comprimento pequeno esse fluxo é prematuramente interrompido e a energia contida no martelo não é totalmente transferida à haste.

A chegada da n -ésima onda de tração na base do martelo é:

$$F_{hn} = V \frac{Z_p Z_h}{Z_p + Z_h} \left(\frac{Z_p - Z_h}{Z_p + Z_h} \right)^n \quad (3.48)$$

Onde:

F_{hn} = força de compressão transmitida a extremidade superior da haste;

V = velocidade inicial do martelo no instante do impacto;

Z_p e Z_h = impedância do martelo e da haste, respectivamente;

n = um número inteiro, dado em função do tempo decorrido após o impacto, que representa o número de vezes que a onda de tensão gerada no instante do impacto percorreu a distância $2L$ dentro do martelo.

$$2n \frac{L}{c} < t < 2(n+1) \frac{L}{c} \quad (3.49)$$

A equação (5.47) pode ser expressa em função da razão das impedâncias representada pela letra r ($r = Z_h/Z_p$)

$$Fhn = V \frac{Z_h}{1+r} \left(\frac{1-r}{1+r} \right)^n \quad (3.50)$$

Assim como no martelo, a onda longitudinal de tensão percorre n vezes o seu interior, até o seu amortecimento total, na haste, a onda longitudinal também percorre n vezes a sua extensão. Cada vez que a onda longitudinal de tensão atinge a extremidade inferior da haste, parte da energia contida na onda é refletida como uma onda de tração e parte é consumida para cravar o amostrador no solo. A Figura (3.12) representa esse processo.

O amostrador não é cravado no solo instantaneamente quando do impacto do martelo sobre a composição da haste. O amostrador só inicia a sua penetração no solo quando a primeira onda de tensão atinge o amostrador, sendo parte da energia contida nessa onda consumida para cravar o amostrador, Figura 3.12-e, e parte refletida. A onda refletida percorre a haste até atingir a extremidade superior onde é novamente refletida, voltando a atingir o amostrador cravando-o mais um incremento, Figura 3.12-f. A cravação do amostrador continua enquanto a energia da onda for suficiente para cravá-lo no solo; os ciclos de descida e subida da onda ocorrem até a dissipação total da energia. O processo de cravação do amostrador no solo é discutido mais extensivamente no item 3.6.

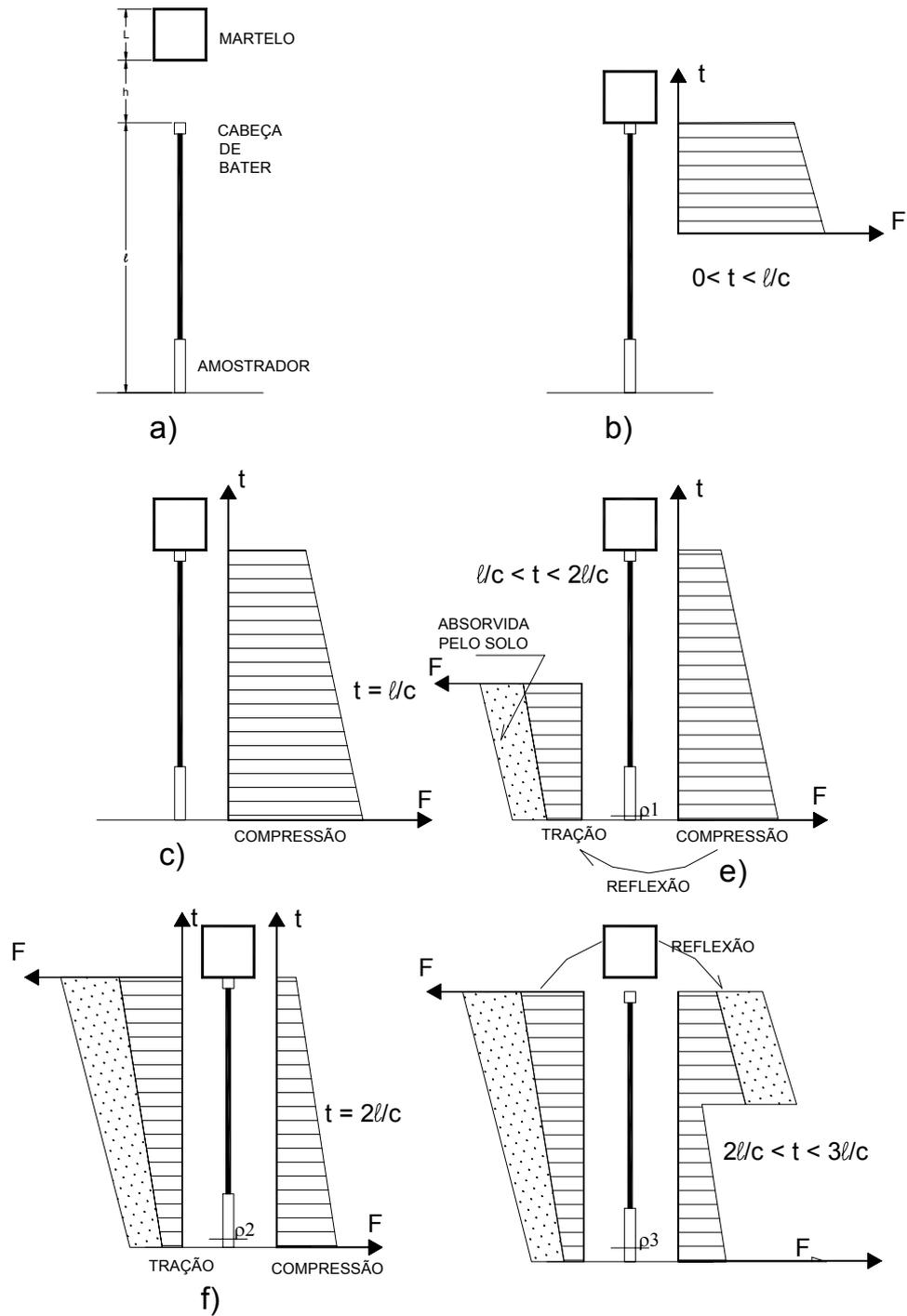


Figura 3.12 – Esquema do mecanismo de propagação de ondas longitudinais de tensão no interior da haste (Schmertmann e Palacios 1979).

3.4.3 – Impacto do Martelo Rígido com Coxim Elástico sobre o Conjunto de Hastes

A NBR 6484 de 1980 prevê a utilização de um coxim de madeira dura no martelo conforme indicado na figura (3.13). Este coxim, que funciona como um amortecedor, reduz a amplitude do pico da força transmitida para a haste. Para efeitos desta análise é considerado o material do coxim como sendo um material linear e elástico com uma constante de deformação k e que não apresenta histerese. A diferença entre o deslocamento do martelo (y) e o deslocamento (u) da haste definem a compressão do coxim ($y-u$). Com base na Figura 3.13 e no acima exposto é possível obter duas equações diferenciais que representam o equilíbrio entre o sistema martelo, coxim e haste.

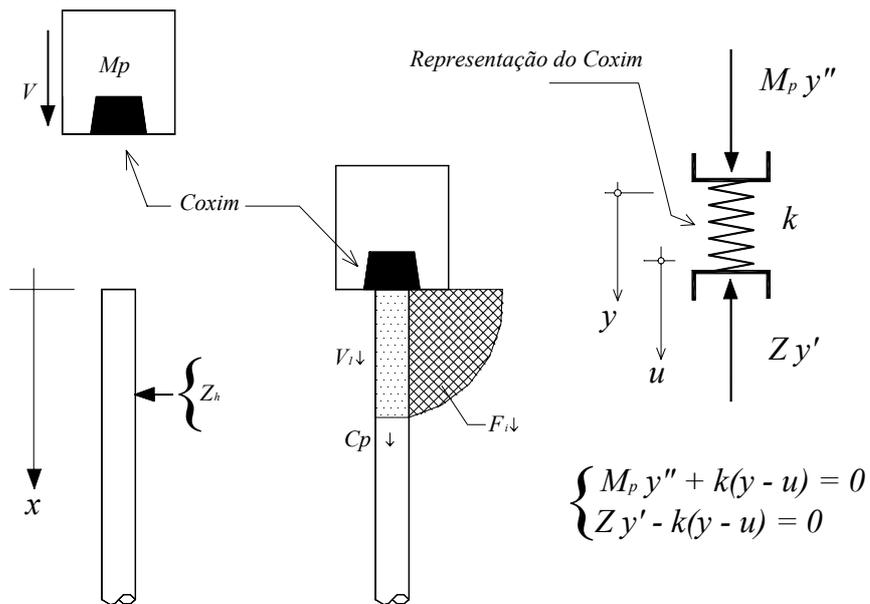


Figura 3.13 – Sistema martelo, coxim e haste (Bernardes, 1989).

$$M_p y'' + k(y - u) = 0 \tag{3.51}$$

$$Z_h u'' - k(y - u) = 0 \tag{3.52}$$

Considerando $\beta^2 = k/M_p$ e $\alpha = k/2Z_h$ as equações (3.51) e (3.52) tomam a seguinte forma:

$$y'' + \beta^2 y - \beta^2 u = 0 \quad (3.53)$$

$$u' - 2\alpha y - 2\alpha u = 0 \quad (3.54)$$

Isolando y da equação (3.54) obtém-se a equação (3.55), cuja primeira e segunda derivada são as equações (3.56) e (3.57) respectivamente:

$$y = \frac{u'}{2\alpha} + u \quad (3.55)$$

$$y' = \frac{u''}{2\alpha} + u' \quad (3.56)$$

$$y'' = \frac{u'''}{2\alpha} + u'' \quad (3.57)$$

Substituindo as equações (3.55) e (3.57) na equação (3.53) tem-se:

$$u'''' + 2\alpha u'' + \beta^2 u = 0 \quad (3.58)$$

Na solução da equação (3.58) duas condições devem ser analisadas dependendo da rigidez do coxim, a saber: 1) Cxim macio em que $\beta^2 > \alpha^2$ e $k < 4Z_h^2/M_p$; 2) Cxim duro onde $\beta^2 < \alpha^2$ e $k > 4Z_h^2/M_p$.

3.4.3.1 - Cxim macio em que $\beta^2 > \alpha^2$ e $k < 4Z_h^2/M_p$.

No primeiro caso que representa um coxim de madeira macia a solução da equação (3.58) é dada pela equação (3.59).

$$u = C_1 + e^{-\alpha t} (C_2 \sin \omega t + C_3 \cos \omega t) \quad (3.59)$$

Onde $\omega = \sqrt{\beta^2 - \alpha^2}$ e C_1 , C_2 e C_3 são constantes de integração. Derivando-se a equação (3.59) tem-se:

$$u' = e^{-\alpha t} [-\alpha(C_2 \sin \omega t + C_3 \cos \omega t) + \omega(C_2 \cos \omega t - C_3 \sin \omega t)] \quad (3.60)$$

Para a condição inicial $t = 0$ $u'(0) = 0$, tem-se:

$$C_2 = \frac{\alpha}{\omega} C_3 \quad (3.61)$$

Substituindo (3.61) em (3.60) tem-se:

$$u' = \frac{\beta^2}{\omega} C_3 e^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (3.62)$$

e

$$u'' = -\frac{\beta^2}{\omega} C_3 e^{-\alpha t} (-\alpha \sin \omega t + \omega \cos \omega t) \quad (3.63)$$

Substituindo as equações (3.62) e (3.63) na equação (3.56) tem-se:

$$y' = -\frac{\beta^2}{2\omega\alpha} C_3 e^{-\alpha t} (-\alpha \sin \omega t - \omega \cos \omega t) \quad (3.64)$$

Na condição inicial, instante do impacto, a velocidade do martelo é V , ou seja $y'(0) = V$. Da equação (3.64) obtém-se o valor de C_3 .

$$C_3 = \frac{V 2\alpha}{\beta^2} \quad (3.65)$$

Introduzindo o valor de C_3 na equação (3.64) e sabendo-se que $\alpha = k / 2Z_h$ tem-se:

$$u' = V \frac{k}{Z_h \omega} e^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (3.66)$$

Como a força de impacto é $F = Z_h V = Z_h u'$ tem-se:

$$F_i = V \frac{k}{\omega} e^{-\alpha t} \sin \alpha t \quad (3.67)$$

A equação (3.67) atinge o seu valor máximo no ponto $dF/dt = 0$, quando $u'' = 0$. Da equação (5.63) tem-se:

$$\alpha \sin \omega t = \omega \cos \omega t \quad (3.68)$$

O valor máximo da força ocorre portanto no tempo:

$$t = \frac{1}{\omega} \tan^{-1} \left(\frac{\omega}{\alpha} \right) \quad (3.69)$$

A equação (3.67) é uma equação senoidal o que leva a F_i assumir valores positivos e negativos, compressão e tensão respectivamente. Como não há ligação entre o conjunto martelo/coxim e a haste a conexão é interrompida no instante em que surge uma força de tensão que ocorre no tempo:

$$\sin \omega t = 0 \quad (3.70)$$

ou,

$$t = \frac{\pi}{\omega} \quad (3.71)$$

Em outras palavras, a equação (3.67) só é válida no intervalo de tempo de $t = 0$ a $t = \pi/\omega$.

3.4.3.2 - Coxim duro em que $\beta^2 < \alpha^2$ e $k > 4Z^2/M$.

No caso que representa um coxim de madeira dura a força de impacto é dada pela equação:

$$F_i = V \frac{k}{\omega} e^{-\alpha t} \sinh(\omega t) \quad (3.72)$$

O valor máximo da força de impacto ocorre no tempo:

$$t = \frac{1}{\omega} \tanh^{-1} \left(\frac{\omega}{\alpha} \right) \quad (3.73)$$

As duas soluções apresentadas acima de martelo com coxim rígido e macio são ferramentas importantes para a compreensão da transferência de energia para a haste de sondagem. Para facilitar a compreensão do exposto apresenta-se na figura (3.14) as curvas de força ao longo do tempo obtidas pelas equações (3.67) e (3.72) para diferentes valores de rigidez “k”. Adicionalmente apresenta-se a equação (3.50) que representa a curva de força transferida por um martelo elástico quando atinge um conjunto de hastes. As curvas da figura (3.14) referem-se a um conjunto de martelo e haste de acordo com a norma brasileira. A seguir são apresentados os dados que possibilitaram a geração destas curvas.

$$\text{Área seção da haste} = A = 4,1 \text{ cm}^2 = 0,000041 \text{ m}^2$$

$$\text{Área da seção do Martelo} = A_p = 400 \text{ cm}^2 = 0,04 \text{ m}^2$$

$$\text{Módulo de Elasticidade do aço} = E = 2,10 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$$

$$\text{Massa do Martelo} = M_p = 65,0 \text{ kg}$$

$$\text{Velocidade de propagação da onda} = c = 5120 \text{ m/s}$$

Pela simples análise da Figura 3.14 observa-se que quanto menor a rigidez menor é a intensidade do pico de força e maior é o tempo, a contar do início do golpe, necessário para que ocorra o pico. Observa-se que para a diferente rigidez a energia transferida à haste é a mesma desde que seja considerada toda a curva. No caso de uma interrupção prematura da transferência de energia devido a um comprimento curto da haste, quanto menor a rigidez do coxim menor a energia transferida.

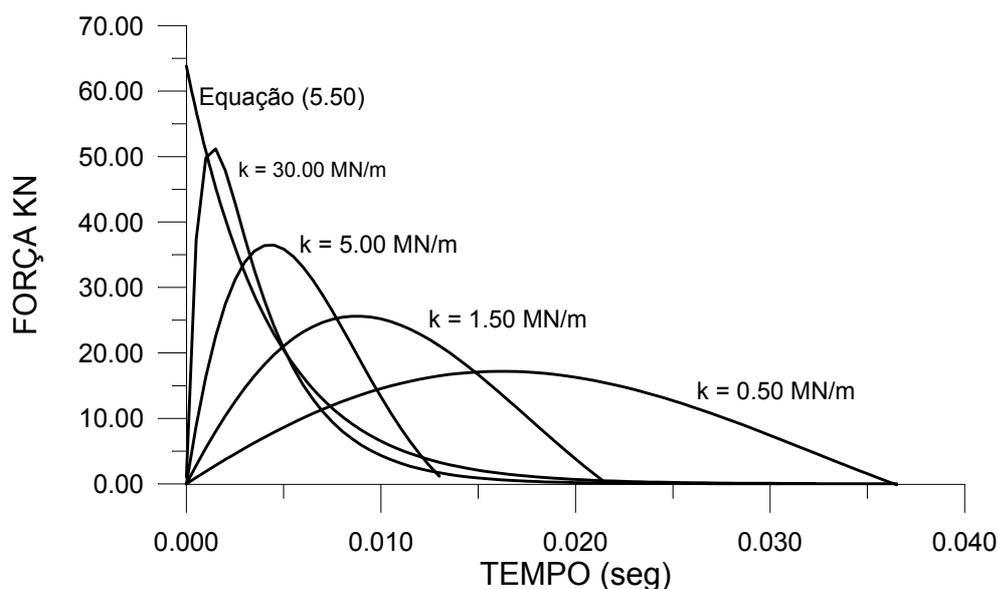


Figura 3.14 – Influência da rigidez do coxim na onda de força.

3.5 – ENERGIA DE UMA ONDA LONGITUDINAL DE COMPRESSÃO.

Uma onda de compressão que se propaga em uma haste cilíndrica conduz uma determinada quantidade de energia. A energia contida nessa onda é composta de duas parcelas: a energia de deformação armazenada em um elemento sujeito ao esforço e a energia cinética das partículas animadas com determinada velocidade.

A) Energia de Deformação:

Considerando que o trabalho de deformação, proveniente dos esforços internos na haste, é igual ao trabalho de deformação realizado pelas forças externas e que quando a força F_x é acrescida de dF_x , o trabalho de deformação é acrescido de $d\xi$, pode-se expressar:

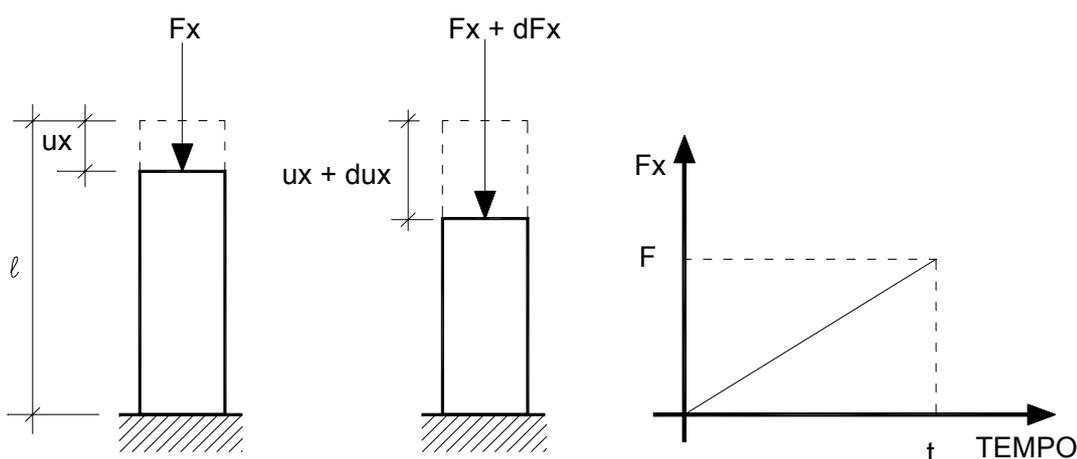


Figura 3.15 –Cálculo da energia de deformação.

$$d\xi = F_x u_x + dF_x du_x \quad (3.74)$$

O segundo termo ($dF_x du_x$), por ser infinitésimo de ordem superior, se torna desprezível na expressão acima.

A deformação elástica u_x devido a aplicação de uma força F_x em uma barra é dada pela lei de Hooke;

$$Fx = E \frac{u_x}{\ell} \quad \therefore \quad u_x = \frac{F_x \ell}{EA} \quad (3.75)$$

Logo:

$$d\xi = F_x d\left(\frac{F_x \ell}{EA}\right)$$

Integrando de 0 a F, obtém-se:

$$\xi = \frac{F^2 \ell}{2EA} = \frac{\sigma^2 A \ell}{2E} \quad (3.76)$$

A energia de deformação armazenada em um elemento dx (dx = cdt) em termos de tensão é:

$$\xi = \frac{A}{2E} \sigma^2 c dt \quad (3.77)$$

B) Energia Cinética:

$$\xi = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} (dx A \rho) v^2 \quad (3.78)$$

como dx = cdt ; $\rho = E/c^2$ e $v = \sigma c / E$

$$\xi = \frac{1}{2} c dt A \frac{E}{c^2} \frac{\sigma^2 c^2}{E^2}$$

$$\xi = \frac{A}{2E} \sigma^2 c dt \quad (3.79)$$

As equações deduzidas para o cálculo da energia de deformação e energia cinética são idênticas, e como a energia total é dada pela soma das duas parcelas conclui-se que metade da energia contida numa onda longitudinal de tensão é composta por energia armazenada na deformação e a outra metade por energia cinética das partículas.

A Energia total contida em uma onda de deformação é, portanto:

$$E = \frac{Ac}{E} \int \sigma^2 dt = \frac{c}{AE} \int F^2 dt \quad (3.80)$$

Como existe uma relação direta entre força e velocidade da partícula [$F = Z_h v = (EA/c)v$] pode-se reescrever a equação acima:

$$E = \frac{c}{AE} \int \left(\frac{EA}{c} \right)^2 v^2 dt = \frac{EA}{c} \int v^2 dt \quad (3.81)$$

ou ainda:

$$E = \frac{c}{AE} \int FF dt = \frac{Ac}{E} \int \left(\frac{EA}{c} \right) vF dt = \int Fv dt \quad (3.82)$$

Portanto para se obter a energia total é suficiente integrar a função de F^2 , Fv ou v^2 no intervalo de tempo em que está compreendida a passagem de toda a onda, ou seja, considera uma haste de comprimento infinito.

Observa-se que a dedução acima apresentada refere-se à passagem de uma onda, composta por duas parcelas de energia (elástica e cinética) por uma seção da haste. Estas equações não levam em consideração a energia potencial gravitacional da haste e, portanto não há diferença se a barra está ou não sofrendo um movimento translacional como um todo referenciado a uma referência externa ao sistema e fixa. Este assunto será discutido com mais detalhes no capítulo 6 desta tese.

Devido às condições de contorno do problema, tais como a posição da célula de carga, velocidade de propagação da onda no material constituinte da haste e principalmente devido ao comprimento da haste, alguns fatores de correção e a definição de intervalos de integração são necessários. Estes fatores de correção são apresentados na literatura por vários autores e compõem também a Referência Internacional do SPT. Portanto, as equações (3.80) a (3.82) devem ser apresentadas como segue:

$$E = \frac{cK_1K_2K_c}{AE} \int_{t_1=0}^{t_2} F^2 dt \quad (3.83)$$

$$E = \frac{EaK_1K_2K_c}{c} \int_{t_1=0}^{t_2} v^2 dt \quad (3.84)$$

$$E = \int_{t_1=0}^{t_2=\infty} Fv dt \quad (3.85)$$

Onde: K_1 = Coeficiente de correção que leva em consideração a energia não registrada na célula de carga devido à distância Δl entre a cabeça de bater e a célula de carga.

K_2 = Coeficiente de correção teórico necessário quando o comprimento da haste é menor que o comprimento equivalente da haste.

K_c = Coeficiente de correção que leva em consideração uma eventual diferença entre a velocidade teórica de propagação da onda e a real no meio constituinte da haste.

O intervalo de integração nas equações (3.83) e (3.84) é de $t_1 = 0$ até $t_2 = 2l/c$ ou $t_1 = 0$ até $t_2 = (F=0)$. Nessa última situação considera-se o intervalo de tempo até que onda de tração refletida no amostrador atinge a seção instrumentada tornando negativo o valor da força.

O intervalo de integração da equação (3.85) é de zero até o tempo em que toda a energia da onda tenha sido transferida e dissipada. Observa-se que há na literatura (Butler et al., 1998; Farrar, 1998; PDI, 1999) o intervalo de integração é apresentado como sendo de $t_1 = 0$ até $t_2 = \text{máx.}$ A princípio entende-se que “máx” represento o tempo que toda a onda transferida ao conjunto de haste tenha sido dissipada e não o tempo máximo de aquisição do sinal de força e velocidade de um referido equipamento. Esta equação conduz a resultado verdadeiro conforme será demonstrado no Capítulo 6.

Uma discussão mais cuidadosa das equações utilizadas para o cálculo da energia e o que realmente a instrumentação utilizada para determinar a força e a aceleração está medindo é efetuada no Capítulo 6, bem como, a necessidade ou não da utilização dos coeficientes de correção K_1 , K_2 e K_c .

3.5.1 – Determinação de K_1

3.5.1.1 – Coeficientes de Correção K_1 conforme a Referência Internacional do SPT

O valor de K_1 é obtido com a equação (3.86)

$$K_1 = \frac{1 - e^{(-4m)}}{1 - e^{[-4m(1-d)]}} \quad (3.86)$$

Onde: $d = \Delta l / l$

l = comprimento total da haste,

Δl = distância entre a cabeça de bater e a célula de carga,

$m = M_m / M_h$

M_m = massa do martelo,

M_h = massa da haste.

Figura 3.16 apresenta a equação (3.86) em forma gráfica.

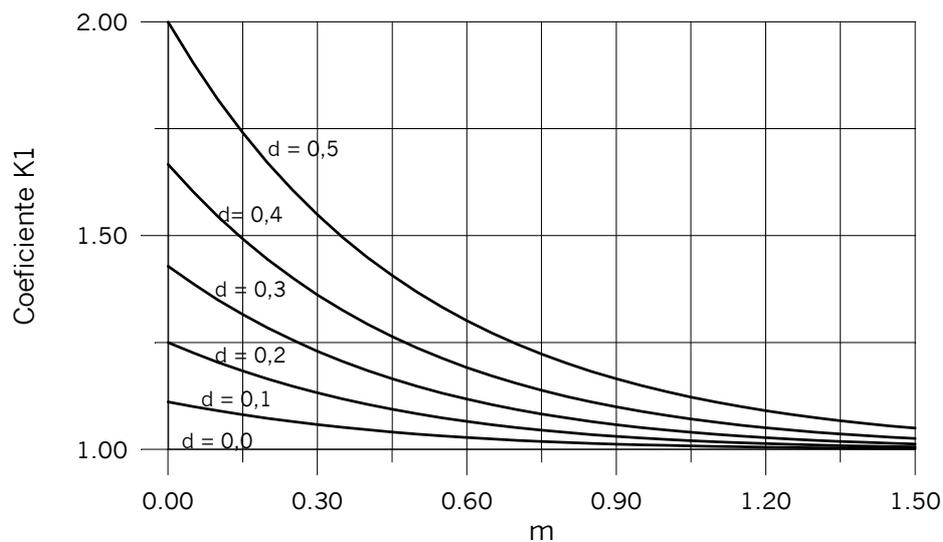


Figura 3.16 – Coeficiente de correção K_1 (IRTP / ISSMFE 1988)

3.5.1.2 – Coeficiente de Correção K_1 conforme Schmertmann e Palacios (1979)

Schmertmann e Palacios (1979) verificaram que a forma da onda prevista com a equação teórica (5.50) é bem coerente com a registrada, Figura 3.17. Portanto, é possível calcular a energia que teoricamente é transferida à haste a partir do instante do impacto do martelo sobre a cabeça de bater até o tempo $t = 2l/c$, quando é cessada a transferência da energia pela separação do martelo com a cabeça de bater, conforme descrito no item 3.4.1.

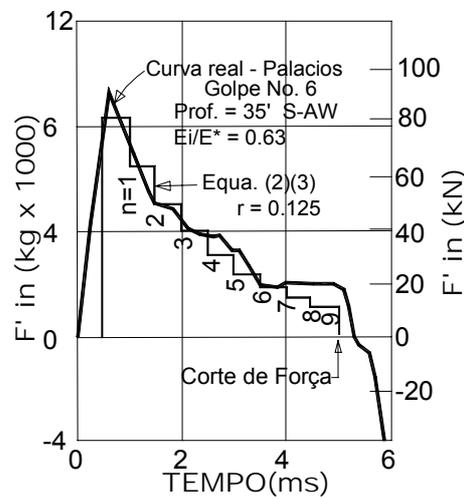


Figura 3.17 – Comparação entre uma curva real de força e a teórica ao longo do tempo. (Schmertmann e Palacios, 1979).

Para calcular esta energia com o uso da equação 3.50 algumas condições são impostas:

- as hastes e o martelo são constituídos do mesmo material;
- não há perda de energia na propagação da onda longitudinal de tensão nas hastes;
- não há reflexão significativa nos pontos de união das hastes, a não ser a verificada junto ao amostrador;
- o impacto é perfeito não havendo perda de energia.

Logo a energia teórica (E_{teo}) pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$E_{teo} = \frac{ct}{EA} \sum_0^n F_{hn}^2 \quad (3.87)$$

Onde:

E, A, c - são constantes da haste;

t - tempo de duração de cada patamar, $2L/c$, da força transmitida às hastes, onde L é o comprimento do martelo;

F_{hn} - intensidade da força transmitida à haste em cada pulso (equação 5.41).

A equação (3.87) pode ser expressa da seguinte forma:

$$E_{teo} = \frac{c}{EA} \frac{2L}{c} \left[F_{h0}^2 + F_{h1}^2 + F_{h2}^2 + \dots F_{h(n-1)}^2 + \left(\frac{\ell}{L} - n \right) F_{hn}^2 \right] \quad (3.88)$$

Onde n é um número inteiro e positivo dado em função do comprimento da composição (ℓ), tal que:

$$\frac{\ell}{L} \geq n > \left(\frac{\ell}{L} \right) - 1$$

A equação (5.88) é igual a uma soma de uma progressão geométrica. Para facilitar a compreensão do desenvolvimento matemático a equação (3.50), anteriormente deduzida é rerepresentada.

$$F_{hn} = \frac{VZ_h}{(1+r)} \left[\frac{1-r}{1+r} \right]^n$$

Chamando a parcela $(VZ_h/(1+r))^2$ de “b” e a parcela $[(1-r)/(1+r)]^2$ de “ k_2 ” pode-se escrever a equação (3.88) da seguinte forma:

$$E_{teo} = \frac{c}{EA} \frac{2L}{c} \left[(bk_2^0) + (bk_2^1) + (bk_2^2) + (bk_2^3) + \dots (bk_2^{(n-1)}) + \left(\frac{\ell}{L} - n \right) (bk_2^n) \right] \quad (3.89)$$

A parte da equação (3.89) $(b + bk_2^1 + bk_2^2 + bk_2^3 + \dots + bk_2^{(n-1)})$ é uma progressão geométrica (PG) que tem como resultado da soma a expressão $b(1 - k_2^n)/(1 - k_2)$, logo:

$$E_{teo} = \frac{c}{EA} \frac{2L}{c} \left\{ \frac{b(1 - k_2^n)}{(1 - k_2)} + \left(\frac{\ell}{L} - n \right) bk_2^n \right\} \quad (3.90)$$

Substituindo o valores de “b” na expressão acima tem-se:

$$E_{teo} = \frac{c}{EA} \frac{2L}{c} \left\{ \left[\frac{\left(\frac{VZ_h}{1+r} \right)^2 - \left(\frac{VZ_h}{1+r} \right)^2 k_2^n}{1 + k_2} \right] + \left(\frac{\ell}{L} - n \right) \left(\frac{VZ_h}{1+r} \right)^2 k_2^n \right\} \quad (3.91)$$

Colocando $(VZ_h)^2$ em evidência:

$$E_{teo} = \frac{c}{EA} \frac{2L}{c} V^2 Z_h^2 \left\{ \frac{1 - k_2^n}{(1+r)^2} + \left(\frac{\ell}{L} - n \right) \frac{k_2^n}{(1+r)^2} \right\} \quad (3.92)$$

Como $Z_h = EA/c$ e rearranjando a (3.62) tem-se:

$$E_{teo} = \frac{EA}{c} \frac{2L}{c} V^2 \left\{ \left(\frac{1 - k_2^n}{(1+r)^2} \frac{1}{(1 - k_2)} \right) + \left(\frac{\ell}{L} - n \right) \frac{k_2^n}{(1+r)^2} \right\} \quad (3.93)$$

Substituindo o valor de k_2 na expressão (3.53) tem-se finalmente:

$$E_{teo} = \frac{EAL}{c^2} V^2 \left\{ \left(\frac{1 - k_2^n}{4r} \right) + \left(\frac{\ell}{L} - n \right) \frac{k_2^n}{(1+r)^2} \right\} \quad (3.94)$$

Sendo a energia inicial do martelo no instante do impacto igual a $\frac{1}{2} MV^2$ e a energia transferida para a haste, referente à primeira onda longitudinal de compressão dada pela equação (3.94) é possível calcular a eficiência do sistema, expresso como a razão da energia calculada e da teórica.

$\eta_\ell =$ energia transferida à haste / energia inicial

$$\eta^\ell = \frac{\frac{EA2LV^2}{c^2} \left\{ \frac{1-k_2^n}{4r} + \left(\frac{\ell}{L} - n \right) \frac{k_2^n}{(1+r)^2} \right\}}{\frac{1}{2}MV^2}$$

Sabendo que $M = \rho AL$ e $\rho = E/c^2$ tem-se:

$$n\ell = (1-k_2^n) + 4r \left(\frac{\ell}{L} - n \right) \frac{k_2^n}{(1+r)^2} \quad (3.95)$$

A equação (3.95) representa a eficiência teórica da energia transferida à haste de sondagem devido a aplicação de um golpe do martelo. Para determinar o coeficiente de correção K_1 é suficiente utilizar a equação (3.95), sabendo-se que a onda de compressão incidente medida na célula de carga percorreu um comprimento $2(\ell - \Delta\ell)$ enquanto que o comprimento real da haste é 2ℓ . Logo:

E (corrigido) = E (calculado através do registro da célula de carga) K_1

$E 2 n\ell = E 2 n(\ell - \Delta\ell) K_1$

Simplificando e isolando em função de K_1 tem-se:

$$K_1 = \frac{n_\ell}{n_{(\ell-\Delta\ell)}} \quad (3.96)$$

3.5.2 – Determinação de K_2

3.5.2.1 – Coeficientes de Correção K_2 conforme a Referência Internacional do SPT

O coeficiente de correção K_2 é dado pela expressão.

$$K_2 = \frac{1}{1 - e^{-4m}} \quad (3.97)$$

A Figura 3.18 apresenta a equação (3.67) em forma gráfica. Este coeficiente que leva em consideração o comprimento da haste não precisa ser usado quando a haste tem um comprimento maior que o comprimento equivalente L_o obtido pela equação (3.68).

$$L_o = \frac{M_m}{m_h} \quad (3.98)$$

Onde: $m_h = Mh/\ell$

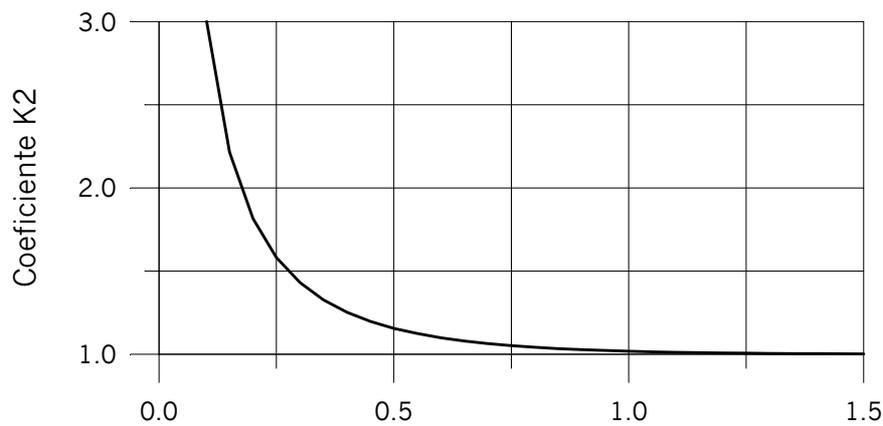


Figura 3.18 – Coeficiente de correção K_2 . (IRTP / ISSMFE 1988)

3.5.2.2 – Coeficiente de Correção K_2 conforme Schmertmann e Palacios (1979).

A expressão proposta por Schmertmann e Palacios, para K_2 , é obtida de forma semelhante a de K_1 . Considerando que a energia corrigida para um comprimento infinito $n\ell = 1$ tem-se:

E (corrigido) = E (calculado através do registro da célula de carga) K_2

$E = E \ n\ell \ K_2$

Simplificando e isolando em função de K_2 tem-se:

$$K_2 = \frac{1}{n\ell} \quad (3.99)$$

3.5.3 – Coeficiente K_c

O coeficiente K_c é dado pela razão entre a velocidade de propagação teórica da onda no aço ($c = 5120$ m/s) e a velocidade real (medida) c_a é, portanto $K_c = c/c_a$.

3.6 – PENETRAÇÃO DO AMOSTRADOR NO SOLO

Ao contrario do que se imagina, o amostrador não penetra suavemente no solo quando da aplicação do golpe do martelo sobre a haste. A penetração somente inicia quando da chegada da primeira onda de compressão no amostrador. Nesse instante parte da energia é transferida para o amostrador e parte retorna como uma onda refletida, conforme já descrito no item 3.4. Essa energia transferida ao amostrador promove uma rápida aceleração no mesmo, chegando a velocidades de até 4 m/s, iniciando a penetração no solo seguido por uma diminuição da velocidade de penetração. Antes mesmo que essa velocidade reduza totalmente a zero um novo impulso, refletido na extremidade superior da haste, chega ao amostrador promovendo um novo aumento da velocidade e um novo incremento de penetração no solo. Este processo é claramente demonstrado por Schmertmann e Placios (1979) através da Figura 3.19.

A Figura 3.19- A representa a curva força ao longo do tempo da primeira onda de tensão, cujo tempo de duração é de $2l/c$. No instante l/c , o amostrador percebe a chegada da onda de força Figura 3.19 – B e inicia a penetração Figura 3.19 – C. A onda refletida, junto ao amostrador percorre a haste até a sua extremidade superior, $t= 2l/c$, e empurra o martelo para cima encerrando a sua transmissão de pulso de tensão. O martelo volta a atingir a haste, mas com uma energia cinética muito menor, aproximadamente $0,04E^*$, que não produz forças adicionais significativas que venham a contribuir com a penetração do amostrador no solo. Esse processo continua até o amortecimento total da onda de tensão que se propaga ao longo da haste.

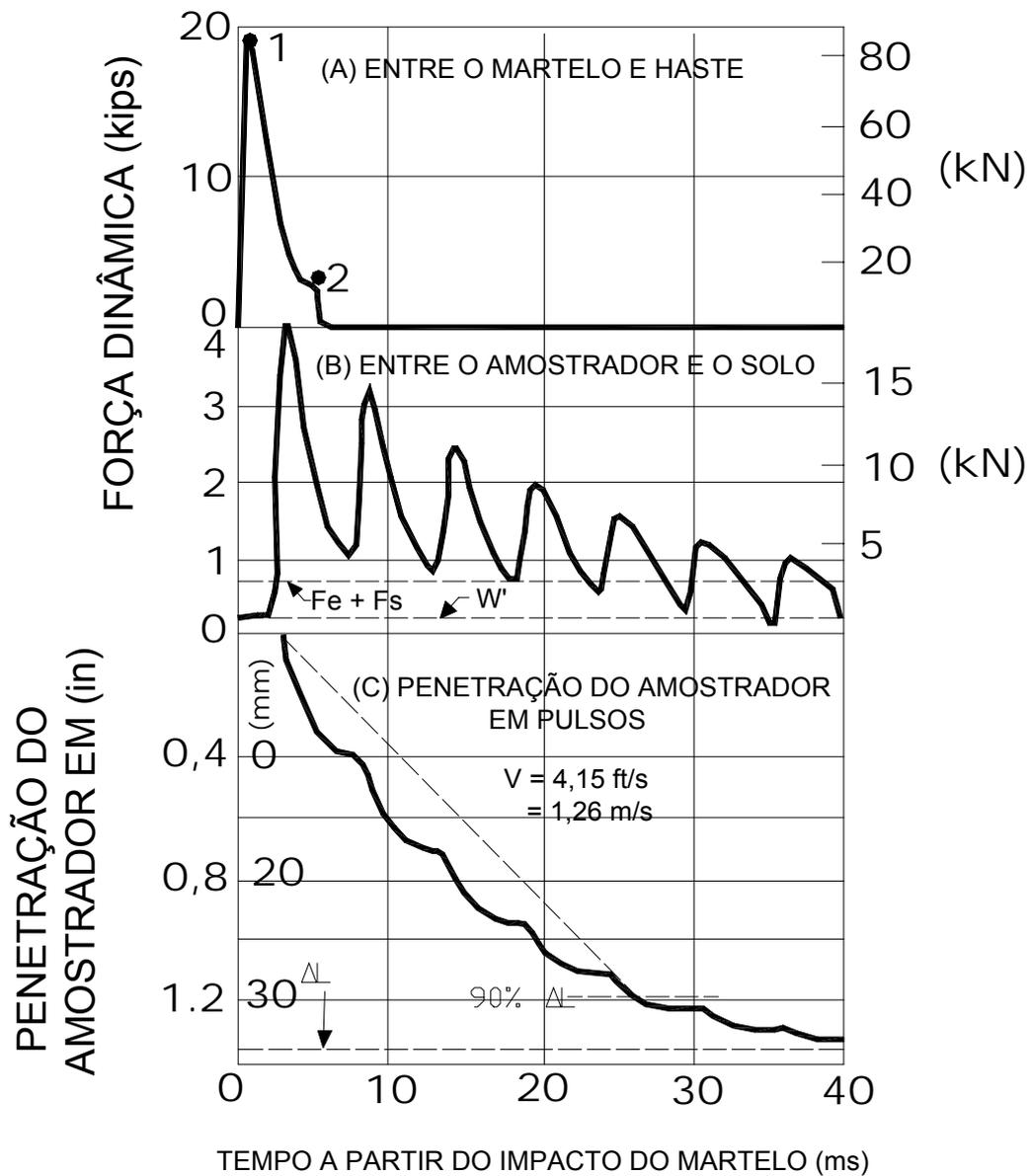


Figura 3.19 – Curva Força, Pulsos e Penetração do Amostrador no Solo. (Schmertmann e Palacios 1979).

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO

4.1– INTRODUÇÃO

A determinação da energia transferida à haste devido à aplicação de um golpe do martelo é determinada de três formas distintas: pela integração do quadrado da deformação ao longo do tempo; pela integração do quadrado da velocidade ao longo do tempo ou pelo produto da deformação e velocidade ao longo do tempo. Portanto, necessita-se da obtenção da onda de deformação e velocidade que percorre a haste ao longo do tempo. A velocidade é obtida pela integração do sinal de aceleração.

Para adquirir o sinal de deformação é necessária uma célula de carga e para a aceleração é necessária a utilização de um acelerômetro. Estes sinais não são facilmente registrados, principalmente devido ao fato do fenômeno ser de potencia alta e de gerar acelerações elevadíssimas, da ordem de 5000 g's. Isto implica em equipamentos robustos e ao mesmo tempo precisos, circuitos elétricos capazes de amplificar e condicionar os sinais e osciloscópios e placas de aquisição capazes de adquirir o sinal com elevada frequência de amostragem.

Apresenta-se a seguir o projeto da célula de carga desenvolvida no presente trabalho, bem como os acelerômetros utilizados, o amplificador e condicionador de sinal desenvolvido, e o sistema de aquisição de sinais.

4.2 – CÉLULA DE CARGA

A célula de carga deverá apresentar a mesma impedância mecânica da haste para que não provoque reflexões de ondas indesejadas, portanto os diâmetros internos e externos da célula devem ser os mesmos das hastes utilizadas na sondagem. Para a fixação da célula de carga nas hastes de sondagem foram projetadas duas luvas conforme indicado no projeto, Figura 4.1.

Quanto à altura da célula de carga, não houve nenhum critério específico, apenas o cuidado para que a parte instrumentada com extensômetros elétricos (parte central) não fosse influenciada pelas luvas e pelo ponto de fixação dos acelerômetros. A Figura 4.1 apresenta a geometria da célula de carga, com as respectivas medidas desenvolvidas no presente trabalho.

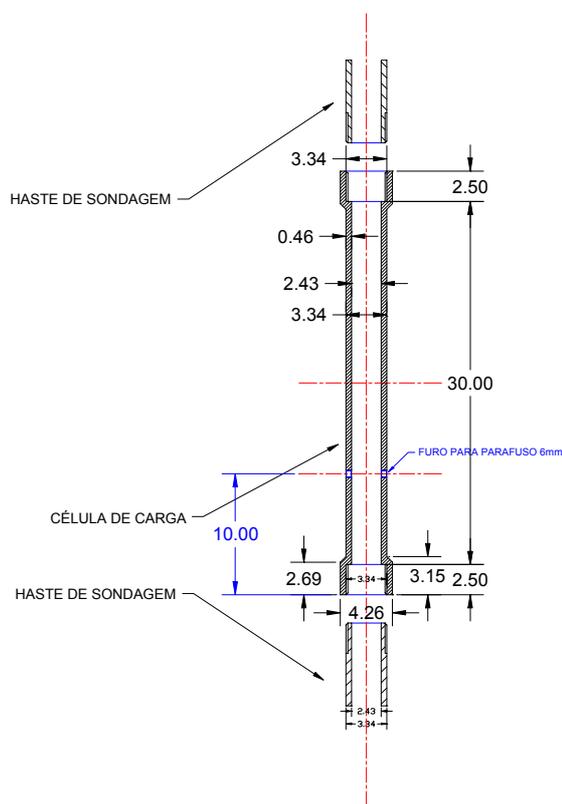


Figura 4.1 – Projeto Geométrico da Célula de Carga.

4.2.1 – Material da Célula de Carga

A seção da haste de sondagem preconizada pela NBR 6484 de 2001 e a resistência do aço utilizado são tais que a tensão gerada durante a aplicação de um golpe do martelo é muito elevado, relativamente próxima da tensão de escoamento, provocando, após uso intenso, deformações na peça que poderão danificar os extensômetros e sua fixação. Portanto o aço utilizado deverá suportar apropriadamente a tensão gerada na haste devido à aplicação do golpe, devendo manter suas propriedades iniciais mesmo após uso intenso.

O material utilizado para a confecção da célula de carga foi o aço inoxidável martensítico de nome comercial, VC – 150, fornecido pela empresa VILLARES, cuja composição inclui 0.35% de Carbono e de 13% Cromo. Este aço é padronizado pela ABNT NBR 5601 Tipo 420 SAE 51420, ou DIN X 40 Cr 13 AISI 420; ASTM A 276-81a tipo 420.

O aço é fornecido em barras cilíndricas, nos mais variados diâmetros. Neste caso foi adquirido um tarugo de 350mm de comprimento com um diâmetro de 1 3/4” (4,445 cm). O aço VC-150 apresenta, no seu estado de fornecimento, o limite de resistência à tração de 640 MPa (65kgf/mm²) e o limite de escoamento de 345 MPa (35kgf/mm²).

Após a usinagem, a peça recebeu um tratamento térmico a fim de eliminar as tensões induzidas durante o processo de usinagem. O tratamento térmico é composto de duas etapas: a primeira onde o material é submetido a uma temperatura de 980° – 1040°, sendo mantido durante meia hora. Imediatamente após a têmpera o aço sofre o revenimento, para evitar a ocorrência de trincas. A temperatura de revenimento é determinada em função das características mecânicas desejadas à peça. A Figura 4.2 indica a variação das propriedades mecânicas com a temperatura de revenimento.

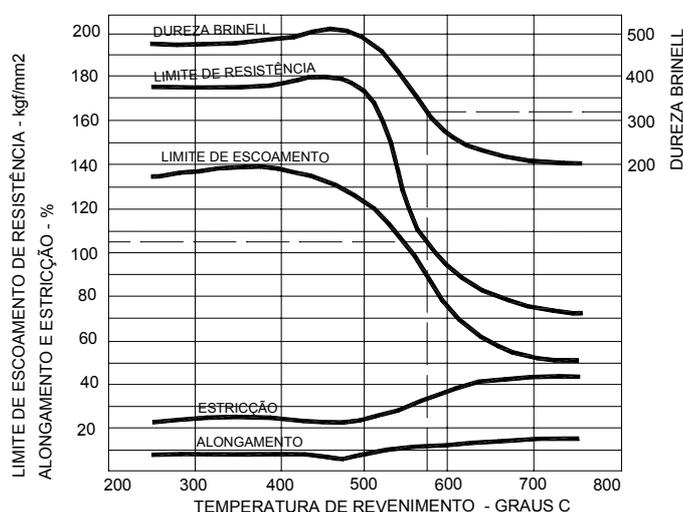


Figura 4.2 – Gráfico de revenimento.

A célula de carga confeccionada foi revenida à temperatura de 580°, objetivando a obtenção de uma resistência de aproximadamente 1 kN/mm² e uma dureza de 330 Brinell considerada suficiente para evitar o amassamento durante a aplicação dos golpes. Temperaturas menores

de 580° produzem uma peça com comportamento frágil indesejado à célula de carga.

4.3 - EXTENSÔMETROS

Os extensômetros utilizados são do tipo PA-06-125TG-350-LEN fornecidos pela empresa Excel Engenharia de Sensores Ltda. A escolha da EXCEL como fornecedora dos extensômetros decorre do simples fato de ser brasileira e de fornecer os extensômetros e acessórios no menor prazo de tempo (3 a 4 dias) e custo. Os códigos utilizados para descrever o extensômetros são assim definidos: PA – base de poliamida com filme de constantan; 06 – auto compensação de temperatura para aço; 125 comprimento ativo da grelha; TG – roseta dupla a 90°; 350 – resistência elétrica em ohms; LEN – encapsulados com fios de cobre.

Os extensômetros foram colados com colas fornecidas pelo próprio fornecedor dos extensômetros e todo o processo de preparo da superfície e cura térmica da cola foi de acordo com as especificações do fornecedor.

4.4 - ACELERÔMETROS

O acelerômetro escolhido para ser utilizado no presente trabalho suporta a aceleração gerada devido à passagem da onda de compressão. Para o caso do ensaio SPT, os acelerômetros devem suportar acelerações de até 5000 g \approx 5,0 kg. O acelerômetro escolhido foi o da marca Brüel & Kjaer, modelo 4375S, indicado para altas frequências, e uma faixa de variação de 100 μ G até 10kG para condições de trabalho. O projeto contempla a utilização de dois acelerômetros. A utilização de dois acelerômetros é indicada devido à excentricidade do golpe, que por muitas vezes faz como que um dos sinais seja prejudicado, e portanto eliminado.

4.4.1 – Fixação dos Acelerômetros

Os acelerômetros estão fixados à célula de carga, logo abaixo do ponto onde foram fixados os extensômetros. A Figura 4.3 e a Foto 4.1 apresentam o detalhe de fixação dos acelerômetros,

que estão diametralmente opostos.

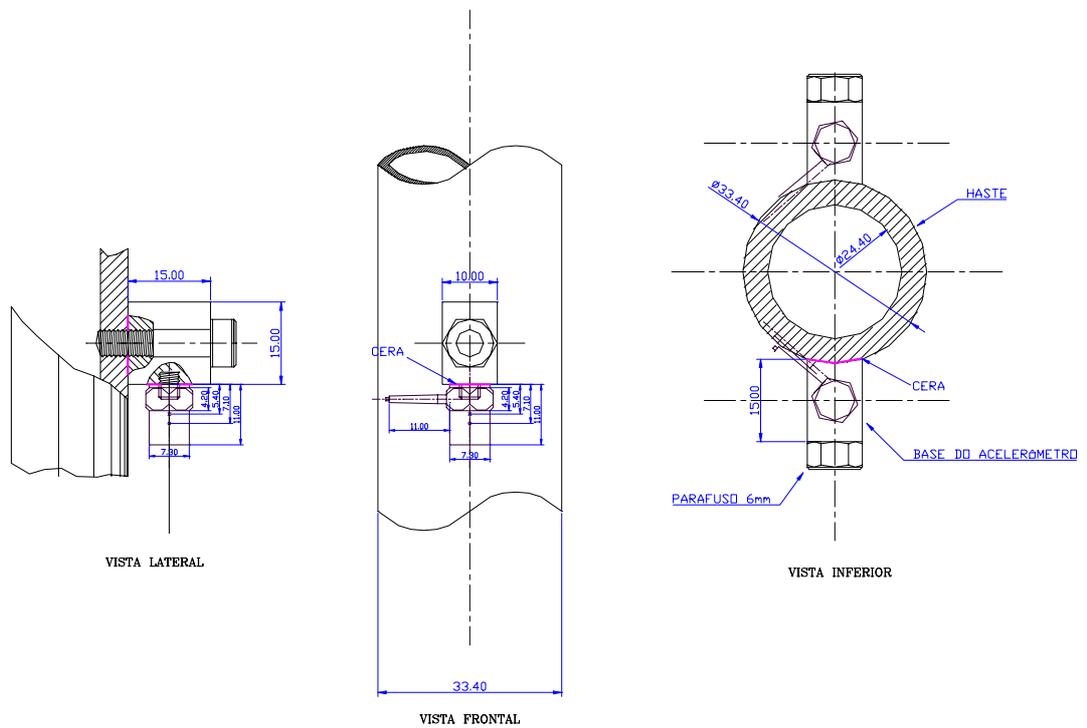


Figura 4.3 – Detalhe de Fixação dos Acelerômetros.



Foto 4.1 – Detalhe de Fixação dos Acelerômetros.

4.5 – CIRCUITO ELÉTRICO UTILIZADO DA CÉLULA DE CARGA.

O circuito elétrico utilizado na célula de carga é uma ponte de Wheastone completa, sendo cada extensômetro composto de “*strain gages*” duplos (um vertical e um horizontal), montados diametralmente opostos. A utilização de 8 “*strain gages*” tem como por objetivo minimizar o efeito da excentricidade, que é elevada no caso de carregamentos dinâmicos em hastes de sondagem.

A Figura 4.4 apresenta o esquema da ponte de Wheastone, onde “*strain gages*” são apresentados em azul, e as resistências R1 a R4 em vermelho. As resistências R1 e R3 são chamadas de resistências ativas e as resistências R2 e R4 são chamados de resistências passivas de compensação térmica.

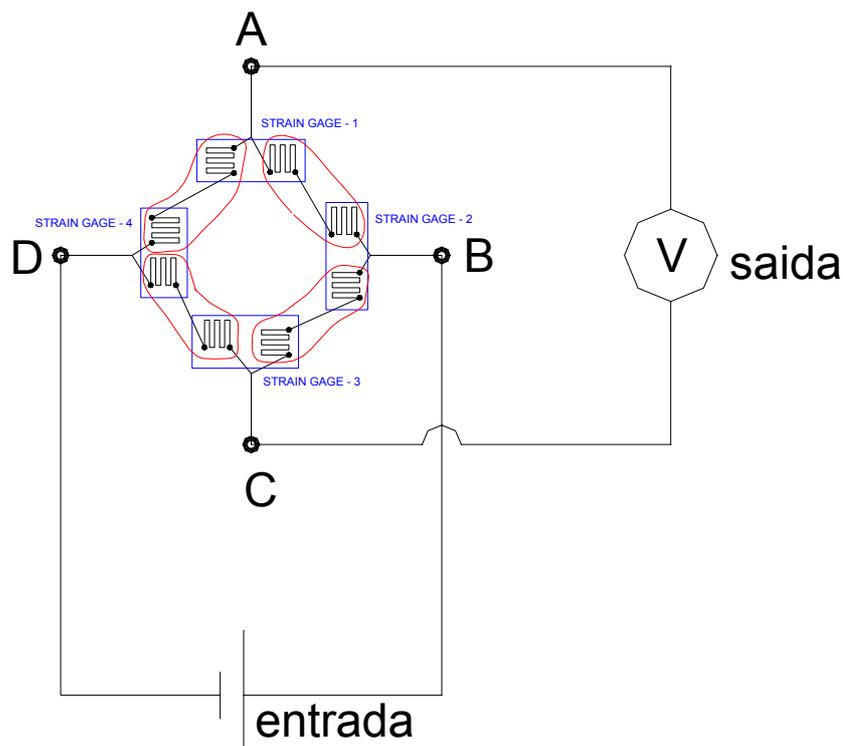


Figura 4.4 – Detalhe da Ponte de Wheastone.

A Figura 4.5 detalha a posição de colagem dos “*strain gages*” e o esquema de ligação entre eles, e a Foto 4.3 apresenta os “*strain gages*” já aderidos ao corpo da célula de carga.

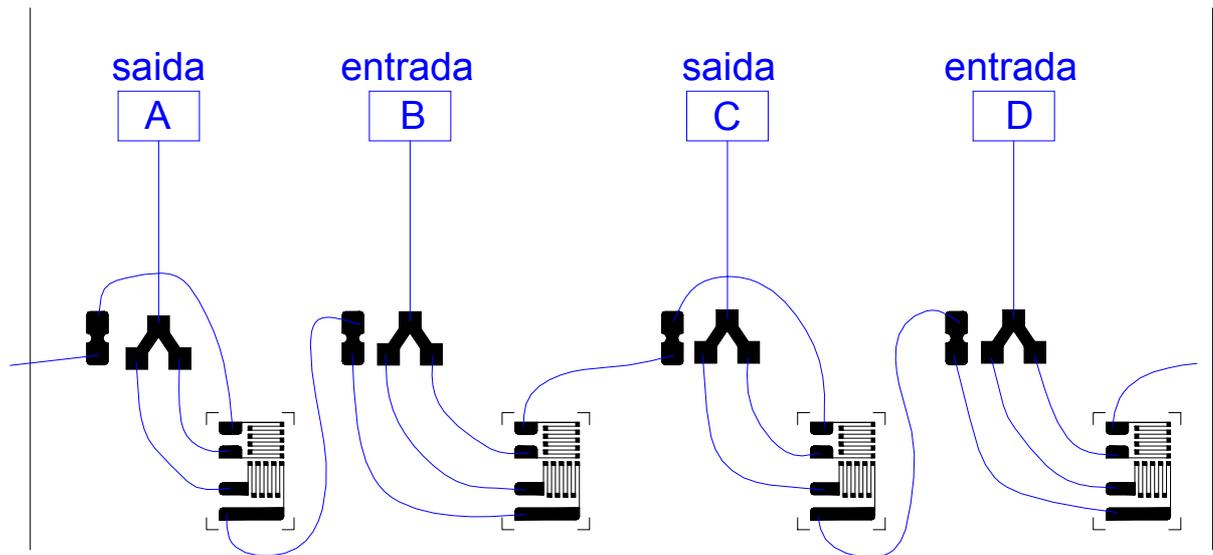


Figura 4.5 – Detalhe das ligações dos “strain gages”.

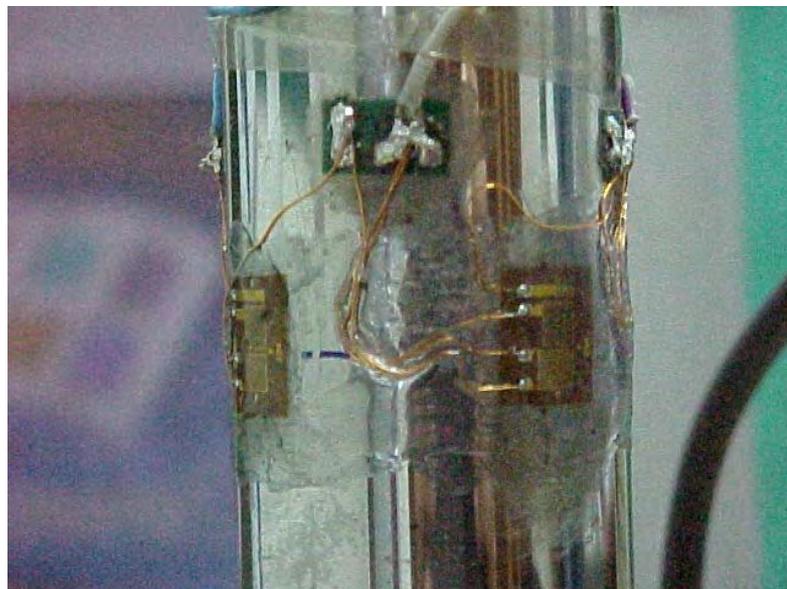


Foto 4.2 – Detalhe da célula de carga.

4.6 – AMPLIFICADOR E CONDICIONADOR DE SINAL

4.6.1 – Da Célula de Carga

A velocidade de propagação da onda na haste de sondagem é de 5120m/s. Dependendo do comprimento da haste, o tempo necessário para que a onda alcance o amostrador e retorne pode variar de 4 a 10 milisegundos. Para que a curva adquirida tenha uma definição aceitável, ela deverá ter no mínimo 40 pontos. Nesse caso a taxa de amostragem, para um evento de 4ms, deverá ser de 10kHz, entretanto, taxas de aquisição maiores são desejadas. Portanto, o condicionador e o amplificador deverão ser capazes de operar com estas frequências. Do condicionador, o sinal pode ser enviado a uma placa A/D (analógico/digital) que permitirá o registro do sinal em um micro computador ou a um osciloscópio que permitirá a visualização em tempo real do sinal.

O circuito desenvolvido no presente trabalho tem como fonte de alimentação duas baterias de 12 volts e 1,2 ampère por hora ligadas em simetria. Um circuito regulador filtra e estabiliza a tensão em 8 volts alimentando a ponte de Wheastone. O sinal de retorno da ponte, em milivolts, é amplificado cerca de 1200 vezes. O amplificador de ponte é de construção própria, baseada no circuito integrado INA118. Este sinal é então visualizado em um osciloscópio e registrado em um micro computador do tipo “*Notebook*”, para processamentos futuros.

4.6.2 – Dos Acelerômetros

Os acelerômetros utilizados no presente trabalho, cuja especificação está indicada no item 4.4, são do tipo piezoelétricos. O material piezoelétrico gera uma carga elétrica quando sujeitos a uma deformação. No caso do acelerômetro escolhido, este material piezoelétrico está disposto entre uma base fixa e uma massa móvel. Esta massa é denominada de massa sísmica. Quando um acelerômetro sofre uma solicitação há um movimento diferencial entre a base e massa, solicitando o elemento piezoelétrico com uma força cisalhante. Esta força cisalhante gera uma carga elétrica que é o sinal de resposta do acelerômetro à solicitação dinâmica. Portanto, como o acelerômetro piezoelétrico gera um sinal de carga o mesmo não é alimentado eletricamente.

O sinal de carga elétrico gerado com o acelerômetro 4372S para uma solicitação de aproximadamente 5000 G pode chegar a 25V e para ser registrado em um microcomputador,

deve ser deamplificado. O fator de deamplificação é que indicará a escala de trabalho do acelerômetro. A fornecedora dos acelerômetros Brüel & Kjaer dispõe de amplificadores com uma grande gama de escalas permitindo amplificar e deamplificar o sinal de carga dos acelerômetros. No presente trabalho foi desenvolvido um circuito de deamplificação específico para os acelerômetros utilizados. A Foto 4.3 mostra o circuito montado. Pode-se observar na foto que o conjunto possui uma saída para a célula de carga e duas dos acelerômetros.

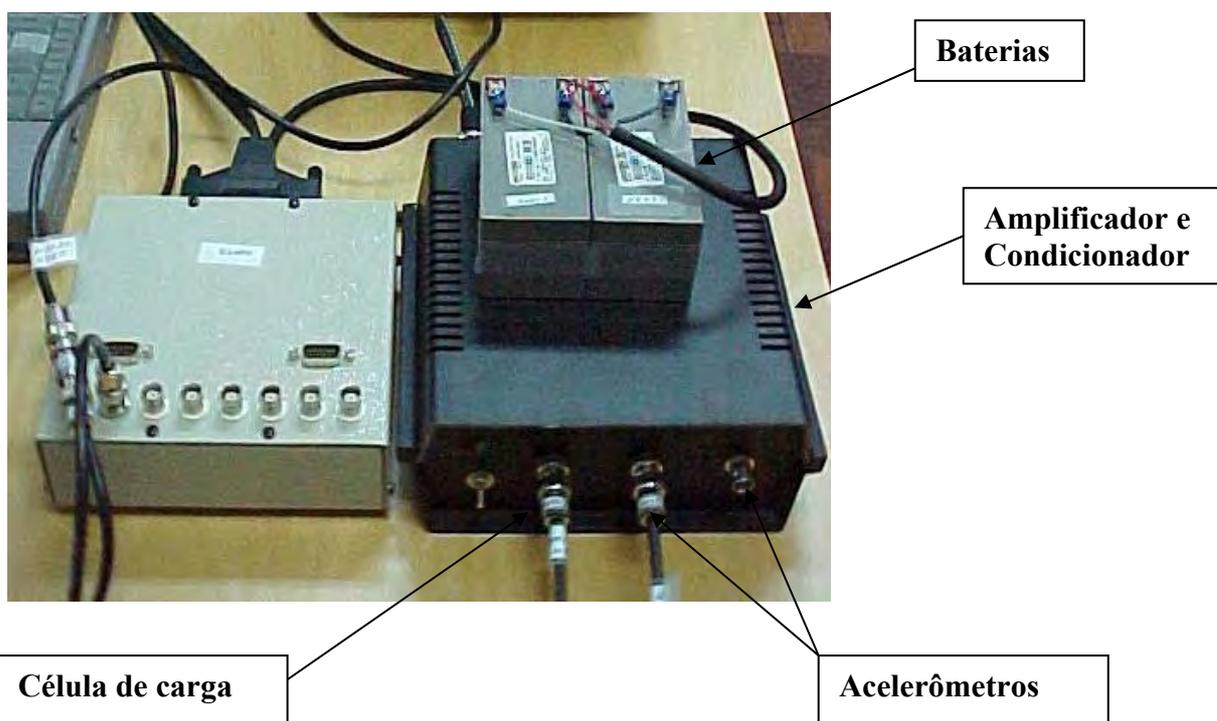


Foto 4.3 – Amplificador e Condicionador de Sinal.

4.7 – PLACA CONVERSORA ANALÓGICA DIGITAL

O sinal da célula de carga e dos acelerômetros após passar pelo condicionador de sinal é registrado em um microcomputador. Para permitir este registro o microcomputador deverá possuir uma placa conversora analógica digital. No presente trabalho foi adquirida a placa denominada PCM-DAS16D/16, da ComputerBoards, que possui 8 canais diferenciais e permite uma taxa de conversão de até 330 kHz. A capacidade desta placa é muito superior às necessidades mas foi a única encontrada que apresenta uma taxa de conversão superior a

20kHz, passível de ser utilizada em micro computador portátil.

4.8 – OSCILOSCÓPIO

Para a visualização em tempo real do sinal é necessária a utilização de um osciloscópio, pois o microcomputador necessita de alguns segundos para apresentar o sinal na tela. Os requisitos básicos do osciloscópio são: permitir registros com frequências iguais e superiores a 20kHz e de no mínimo dois canais, para permitir a exibição de um sinal de aceleração e o sinal de força. O osciloscópio utilizado no presente trabalho é da marca Tektronix, modelo TDS 224, que possui 4 canais. A grande vantagem desse osciloscópio é o seu reduzido tamanho e peso, além da sua robustez, confiabilidade e fácil operação.

A Foto 4.4 apresenta todo o conjunto, célula de carga com os acelerômetros, amplificador de sinal, fonte de alimentação da célula de carga, micro computador, osciloscópio, cabos e conexões.

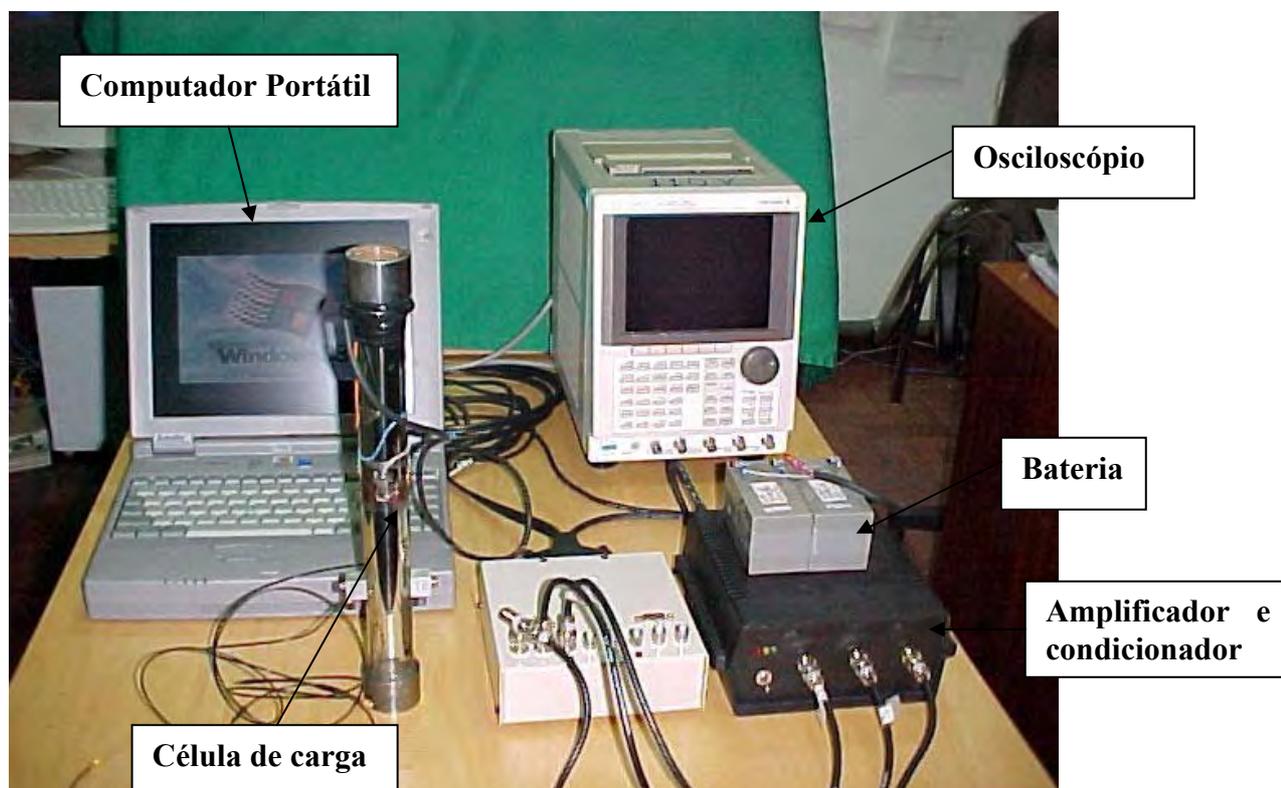


Foto 4.4 – Célula de Carga, Acelerômetros, Amplificadores, Osciloscópio e Micro computador.

A Foto 4.5 apresenta o sinal registrado em tempo real visualizado na tela do osciloscópio. A primeira linha representa o registro de força (em voltagem) e os outros dois o sinal de cada acelerômetro (em voltagem).

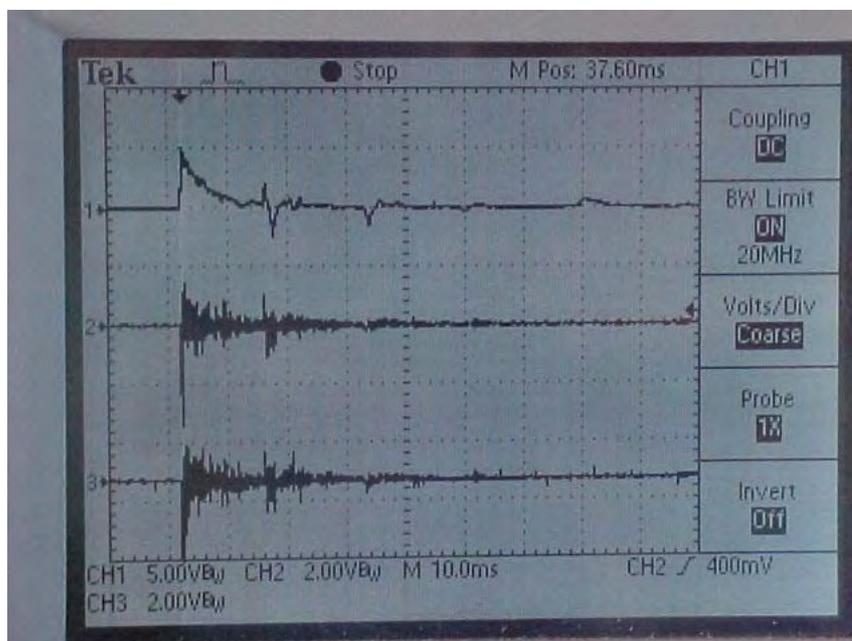


Foto 4.5 – Tela do osciloscópio com sinal.

4.9 – PROGRAMA DE AQUISIÇÃO DE SINAL

Para adquirir o sinal vindo dos amplificadores e registrá-los em disco rígido para futuro processamento foi desenvolvido um programa utilizando-se o software denominado HPVVEE. O programa ao ser executado carrega os drives de comunicação entre a placa analógico digital e o software, abre os arquivos onde serão gravados os dados adquiridos e inicia a aquisição do sinal por um período de 4 segundos no qual deverá ser efetuado o golpe do martelo. Imediatamente após este período o programa apresenta os sinais na tela, sendo na parte superior os resultados dos acelerômetros e na parte inferior o resultado da célula de carga, Figura 4.6. Este programa não faz qualquer tipo de análise ou de cálculo, limitando-se tão somente à aquisição de sinal.

Devido à simplicidade do programa desenvolvido é possível, mesmo no campo, mudança na taxa de aquisição do sinal (Rate (taxa de aquisição) = 16384 utilizado normalmente), na faixa

de voltagem (± 5 volts) e no tempo de aquisição (normal = 4 segundos). É possível uma melhor visualização dos sinais de força e de aceleração refinando-se as variáveis de tempo e voltagem dos gráficos, Figura 4.7.

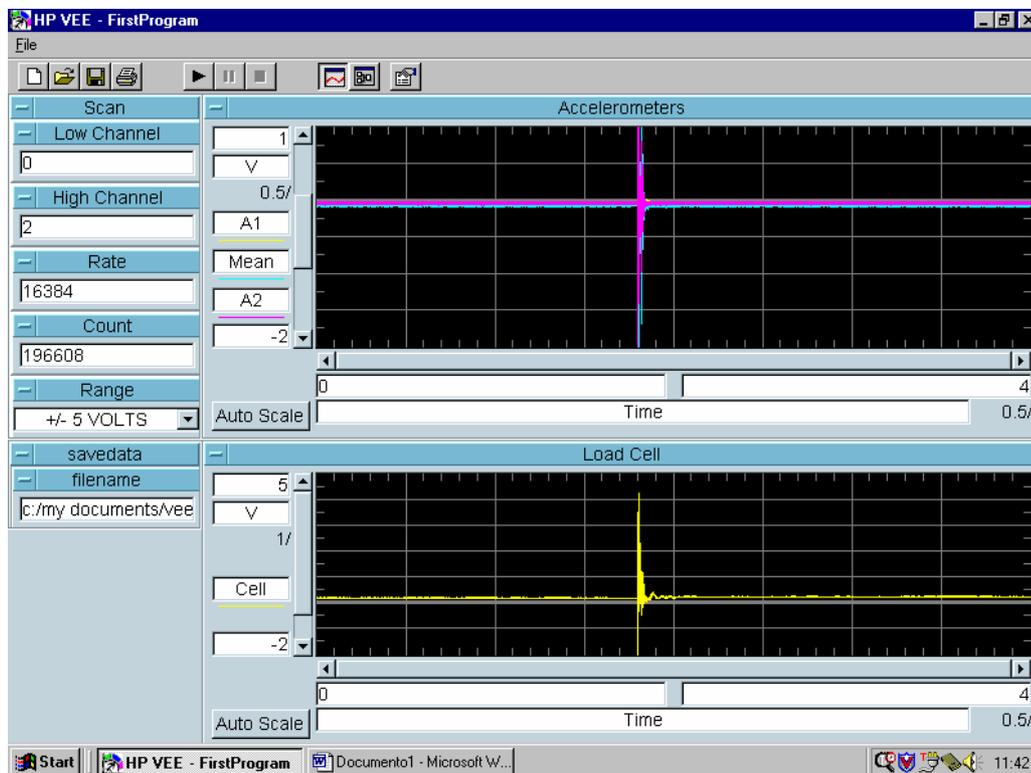


Figura 4.6 – Tela do programa de aquisição de sinal.

O arquivo gravado em disco pelo programa descrito acima é lido por um outro programa desenvolvido na linguagem FORTRAN, que transforma os registros de voltagem em valores de força em N e de aceleração em m/s^2 através da utilização da curva de calibração da célula de carga e das constantes dos acelerômetros. Efetua a correção de zero, e cria um novo arquivo contendo quatro colunas sendo a primeira a do tempo, a segunda o sinal de força, e as duas últimas o sinal de cada acelerômetro.

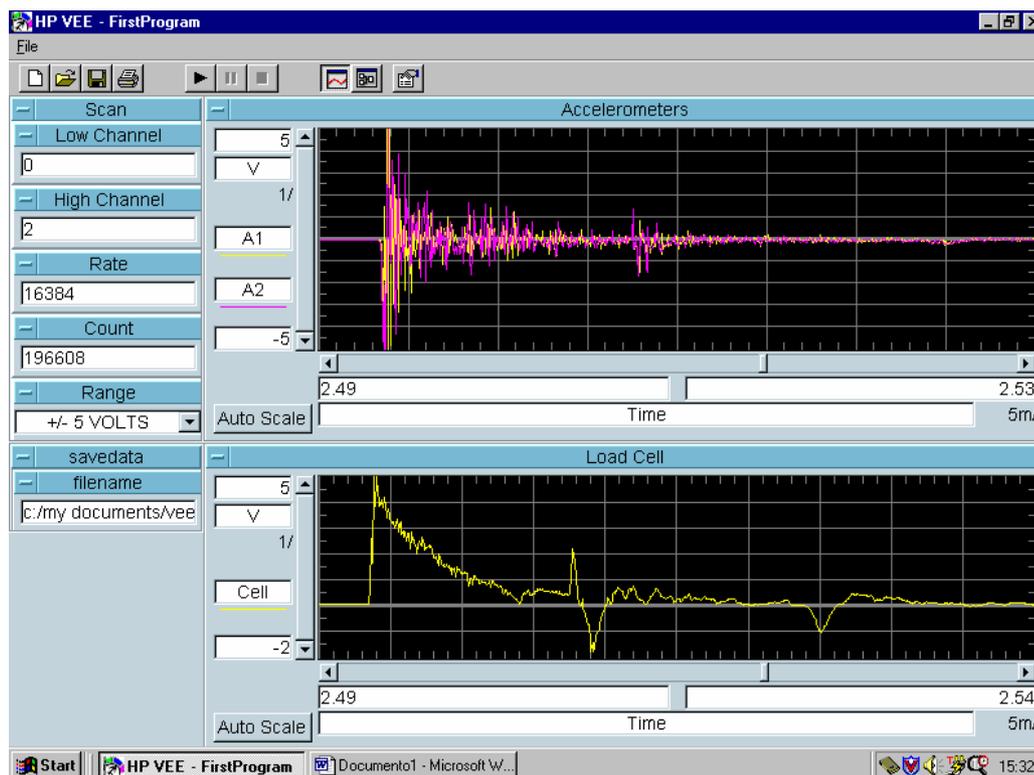


Figura 4.7 – Sinal de força e aceleração visualizado no campo – haste 35 metros.

4.10 – CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA E DOS ACELERÔMETROS.

A célula de carga foi calibrada estaticamente em uma prensa Modelo AG100kNG, marca Autograd. A figura 4.8 apresenta a curva de calibração obtida em uma de suas calibrações. Para esta calibração foi utilizada a célula de carga da prensa que possui fundo de escala de 100kN e um multímetro de bancada regulado para um fundo de escala de 10V. Observou-se que ao longo de dos ensaios não houve mudança da curva de calibração. Os acelerômetros são fornecidos cada qual com sua constante de calibração. Devido à elevada aceleração suportada pelos acelerômetros (até 5.000 g), há a necessidade de uma mesa de calibração especial não disponível no Brasil. A mesa de calibração disponível na Universidade Federal do Rio Grande do Sul só permite calibrações de até 1.500 g, muito abaixo do necessário. Portanto, nos casos dos acelerômetros foi utilizada sempre a constante de calibração fornecida pelo fabricante.

4.11 – TRATAMENTO DOS SINAIS.

Os sinais adquiridos com o sistema desenvolvido são registrados em disco através do programa de aquisição de sinal. No campo somente é possível a visualização do sinal de força e dos sinais de aceleração através do uso do osciloscópio ou na tela do micro computador, foto 4.5 e figuras 4.6. Em escritório o sinal é analisado através de um programa de tratamento de sinal desenvolvido em linguagem Fortran que lê o sinal registrado em campo e efetuava algumas operações.

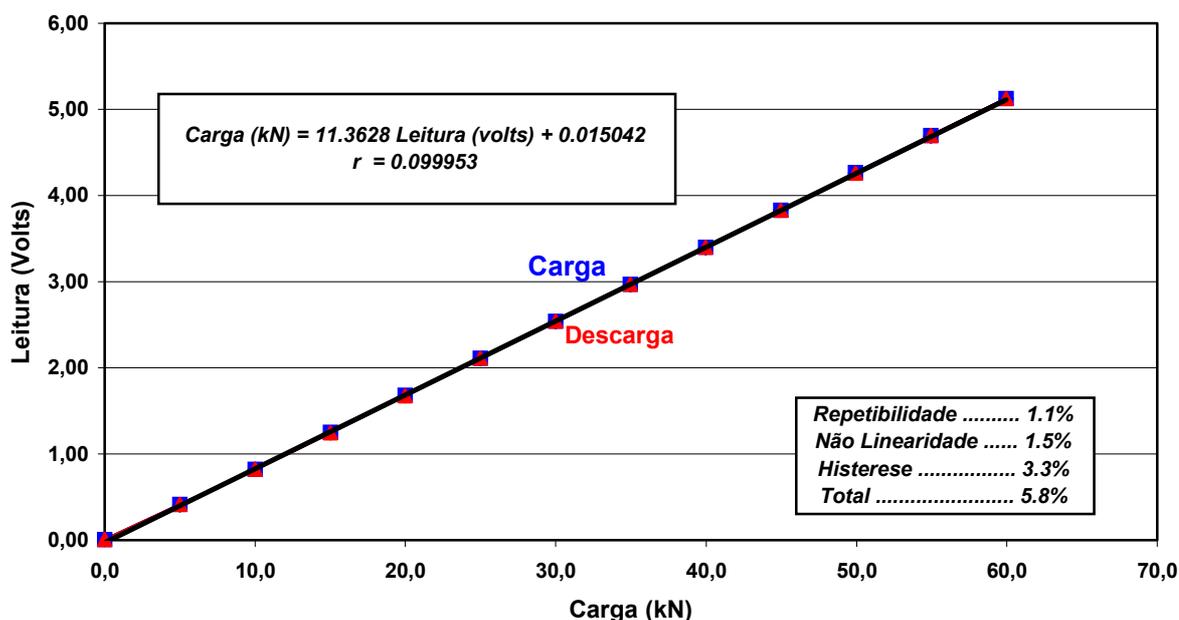


Figura 4.8 – Curva de calibração da célula de carga.

Os sinais dos dois acelerômetros e da célula de carga, referentes a um golpe, somente são aprovados quando os resultados dos sinais de forças obtidos pela célula de carga e a partir da velocidade ($F = VZh$) são compatíveis para o primeiro impacto. Adicionalmente, o valor da penetração permanente obtida pela dupla integração dos sinais dos acelerômetros deve levar a um valor de penetração permanente compatível ao valor registrado no campo. Este processo não é simples e trivial. Operações distintas são necessárias para distintos golpes.

Com relação ao sinal da célula de carga somente é efetuada uma correção do zero inicial. Este processo é simples e necessário, pois o circuito da célula de carga possui um pequeno desequilíbrio que é compensado com um trimpot que deveria ser ajustado a cada nova campanha de ensaios. Entretanto, por ser uma tarefa delicada a operação era efetuada

posteriormente em escritório com o uso do programa, o que não afeta em nada o resultado final da célula de carga.

Já para os sinais dos acelerômetros são basicamente efetuadas 4 operações distintas, que não necessariamente eram concomitantemente empregadas em todos os sinais. A primeira operação, comum a todos os sinais, é zerar o valor inicial dos acelerômetros seguindo o mesmo procedimento e as mesmas razões descritas para a célula de carga. As três operações subsequentes são correção do sinal de aceleração através do rebatimento do sinal, filtragem do sinal, e eventualmente eliminação de picos de aceleração. Estes picos são provavelmente decorrentes de perturbações não axiais sofridas pelo acelerômetro quando da aplicação do golpe. Este fato sugere que um acelerômetro mais robusto e menos sujeito às ondas transversais geradas devido as excentricidades do golpe ou devido ao choque da haste nas paredes do tubo de revestimento utilizado, como, por exemplo, os acelerômetros piezoresistivos da Entram utilizados pela PDI. A figura 4.9 apresenta um sinal típico de aceleração que necessita de eliminação de picos indesejáveis de aceleração e a figura 4.10 apresenta o mesmo sinal, entretanto plotado de forma adequada indicando a necessidade do rebatimento através da subtração de uma reta. Observa-se que é grande o número de sinais rejeitados devido a um número excessivo de picos de aceleração.

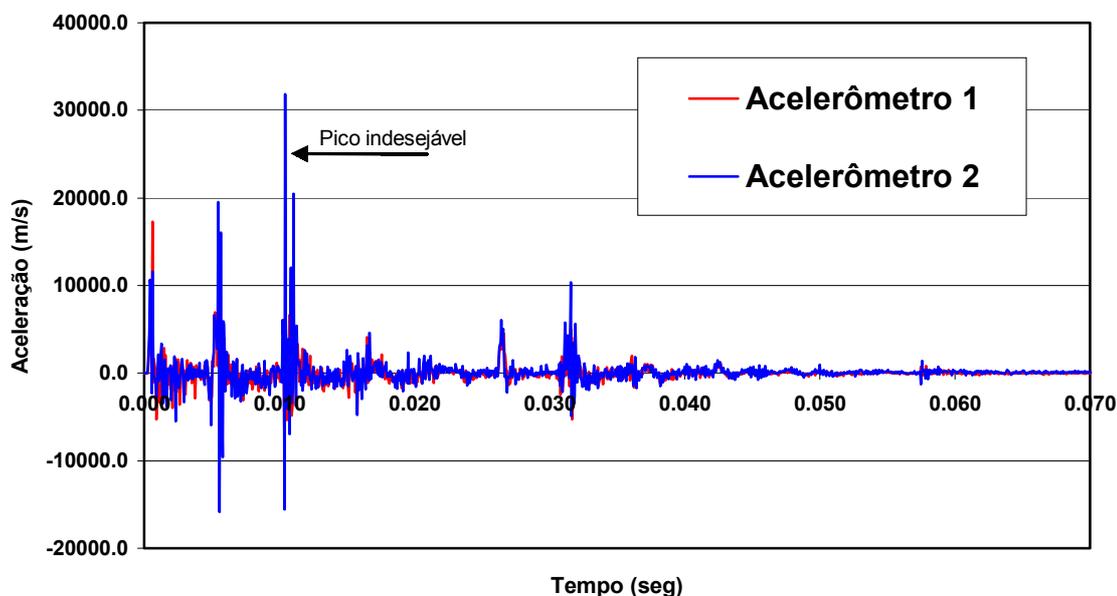


Figura 4.9 – Sinal de aceleração com necessidade de correção (eliminação dos picos indesejáveis).

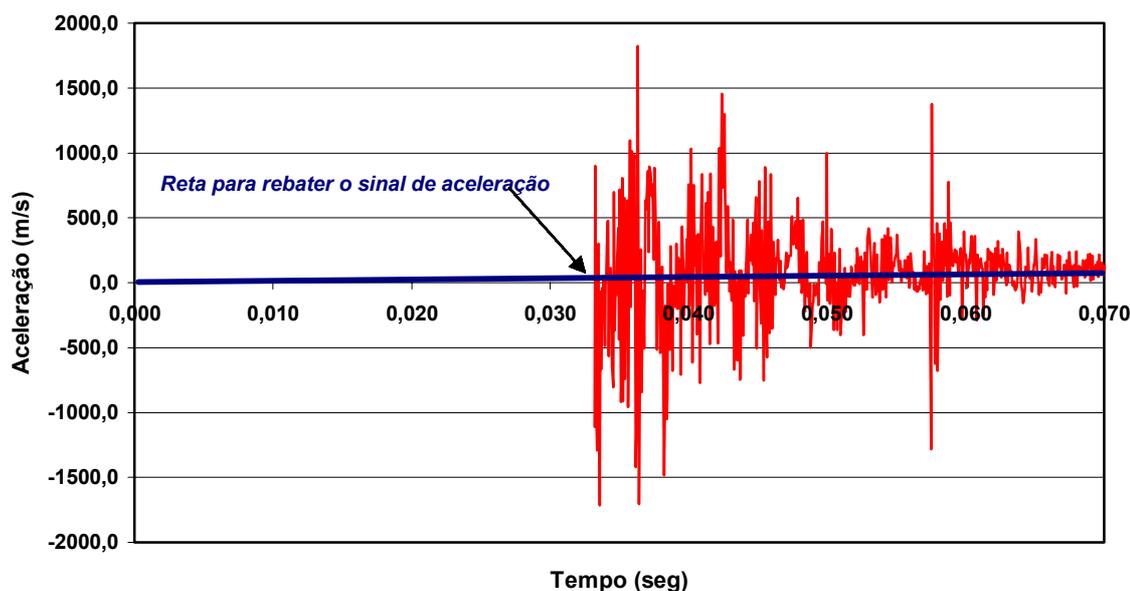


Figura 4.10 – Sinal de aceleração com necessidade de correção (Subtração dos valores registrados pelos valores da reta).

Outra técnica efetuada para corrigir o sinal é a sua filtragem. Para tanto foi incorporada ao programa de tratamento de sinal a rotina que filtra numericamente o sinal através da transformada de Fourier. Neste caso é necessário informar a banda de frequência que deverá ser mantida no sinal. Normalmente é definida como a banda de frequências os valores de 60Hz a 4000Hz. A figura 4.11 apresenta o sinal de aceleração plotado no espectro de frequência onde pode ser observado que frequências acima de 3000 Hz indicam um excesso de ruído principalmente para o acelerômetro 2, indicando a necessidade de filtragem deste sinal, com banda passante de 60 a 3000 Hz.

Observa-se que muitos sinais registrados somente necessitaram da correção do zero inicial. Em outros casos foi utilizada a correção do zero associado e o rebatimento através da equação de uma reta. As quatro formas de tratamento também foram utilizadas em alguns poucos sinais. Ressalta-se que o critério de aprovação do sinal (compatibilidade entre sinais de força da célula de carga e $F = VZ_h$ e valor da penetração permanente) sempre foi rigorosamente mantido.

Os sinais adquiridos junto ao amostrador foram os que melhor se apresentaram,

provavelmente devido ao fato de estarem fixos no solo reduzindo substancialmente as movimentações laterais.

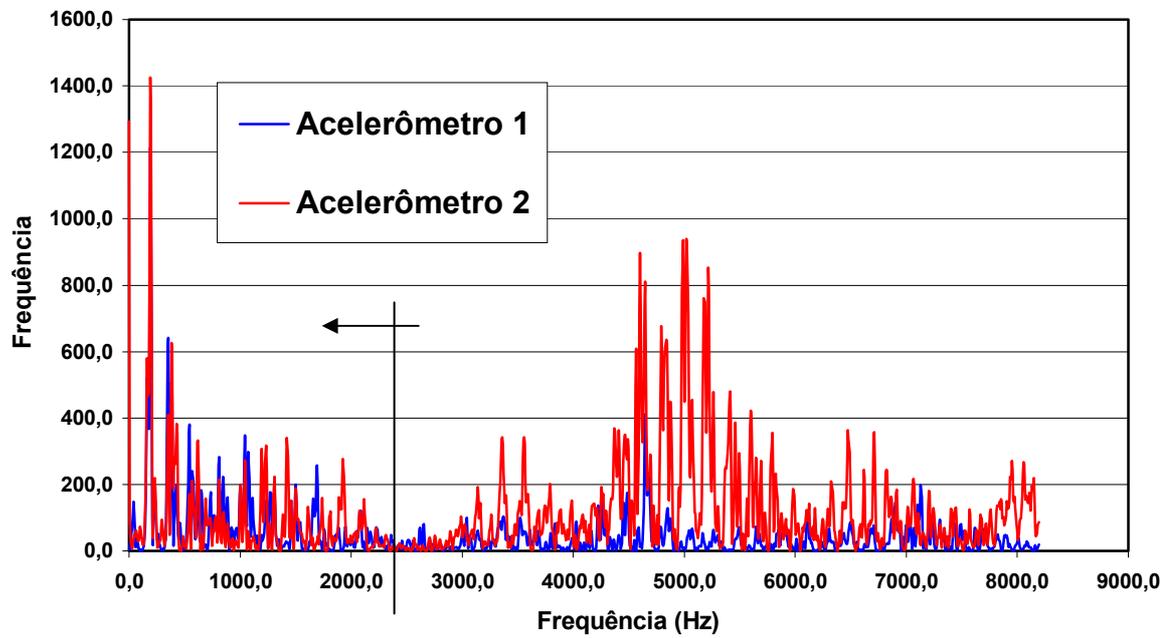


Figura 4.11 – Sinal de aceleração plotado em frequência.

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA

Com o objetivo de investigar o comportamento da onda de tensão que percorre a haste de sondagem devido à ação do golpe do martelo, avaliar a evolução das distintas energias ao longo do tempo e compreender melhor a cravação do amostrador no solo, um programa de microcomputador foi desenvolvido e implementado na presente pesquisa. O programa desenvolvido inicialmente por Rocha (1989), foi adaptado no presente trabalho para a situação unidimensional e acrescido de uma barra para simular o martelo. Esta barra (martelo) desloca-se ao longo do tempo, pela ação da gravidade, até atingir a haste dando início a todo o processo de cravação do amostrador. O programa foi desenvolvido em diferenças finitas e implementado em linguagem FORTRAN.

No presente capítulo são apresentados a formulação utilizada, a discretização em diferenças finitas e alguns exemplos numéricos.

5.1 – DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Seja um ponto de massa “ m ” sujeito a uma solitação dinâmica, em um instante t qualquer; aplicando-se o princípio de D’Alembert obtém-se a equação de equilíbrio dinâmico deste ponto:

$$f_I(t) + f_D(t) + f_S(t) = f(t) \quad (5.1)$$

onde f_I é a força inercial da massa, f_D é a força de amortecimento dinâmico e f_S é uma força restitutiva. Cada uma das forças representadas na parte esquerda da equação 5.1, é função do deslocamento da partícula $u(t)$ ou de suas derivada no tempo, $v(t) = \dot{u}(t)$ e $a(t) = \ddot{u}(t)$.

De acordo com a segunda lei de Newton a força inercial é o produto da massa e aceleração.

$$f_I(t) = m\ddot{u}(t) \quad (5.2)$$

A força de amortecimento dinâmico pode ser representada pelo produto do coeficiente de amortecimento dinâmico pela velocidade do ponto.

$$f_D = c\dot{u}(t) \quad (5.3)$$

Finalmente a força elástica é obtida a partir da deformação de cada barra conforme descrito no item 3.1.3.

Substituindo as equações 5.2 e 5.3 em 5.1 tem-se:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) = f(t) - f_S(t) \quad (5.4)$$

onde:

m = massa do ponto;

c = coeficiente de amortecimento dinâmico;

k = coeficiente de mola;

u = deslocamento da massa;

\dot{u} = velocidade da massa;

\ddot{u} = aceleração da massa;

A equação 5.4 pode ser resolvida numericamente através do método de diferenças finitas. Para tanto, faz-se necessário discretizar a haste e o martelo em segmentos cujas massas (m_i) estão idealmente concentradas em pontos sucessivos, conforme indicado na Figura 5.1.

5.2 – DISCRETIZAÇÃO

Por conveniência de implementação do programa, a força elástica é determinada internamente

a cada passo de iteração. O coeficiente de mola é obtido pelo produto do módulo de elasticidade pela área da seção da haste.

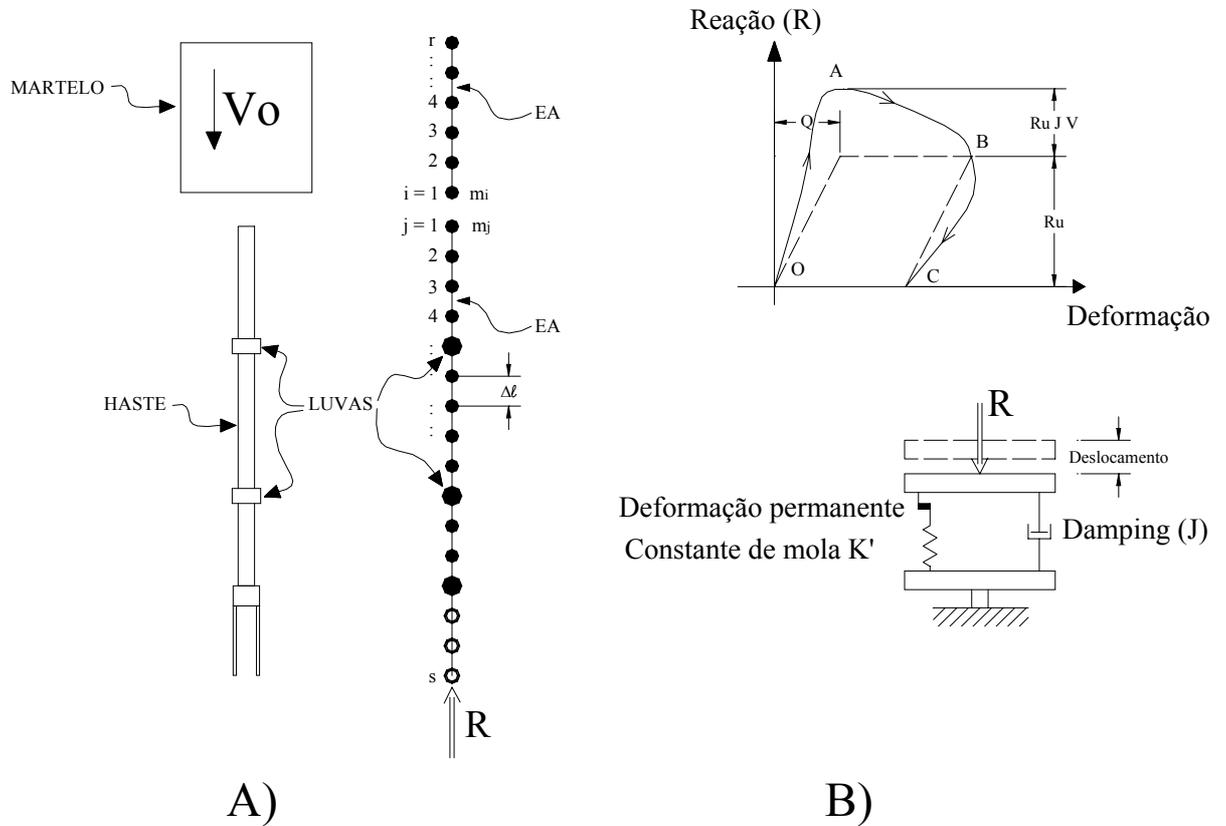


Figura 5.1 – A) Discretização da haste e do martelo; B) Modelo de Smith.

A velocidade da partícula pode ser obtida de uma expressão de diferenças centrais, conforme apresentado na equação 5.5.

$$\dot{u} = \frac{u_{3i} - u_{1i}}{2\Delta t} \tag{5.5}$$

onde: $u_{3i} = u_i(t_3)$

$u_{2i} = u_i(t_2)$

$u_{1i} = u_i(t_1)$

$u_{0i} = u_i(0)$

$\dot{u}(0) = V_0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, r$

Da mesma forma a aceleração de cada ponto pode ser obtida através de:

$$\ddot{u} = \frac{\frac{u_{3_i} - u_{2_i}}{\Delta t} - \frac{u_{2_i} - u_{1_i}}{\Delta t}}{\Delta t} \quad (5.6)$$

Reescrevendo a equação 5.6 tem-se:

$$\ddot{u} = \frac{u_{3_i} - 2u_{2_i} + u_{1_i}}{\Delta t^2} \quad (5.7)$$

que substituindo na equação 5.1 resulta em:

$$m \left[\frac{u_{3_i} - 2u_{2_i} + u_{1_i}}{\Delta t^2} \right] + c \left[\frac{u_{3_i} - u_{2_i}}{2\Delta t} \right] = f(t) - f_s(t) \quad (5.8)$$

Resolvendo a equação 5.8 em termos de u_{3_i} tem-se:

$$u_{3_i} = \frac{\frac{f(t)\Delta t^2}{m} + 2u_{2_i} - \left(1 - \frac{c\Delta t}{2m}\right)u_{1_i}}{1 + \frac{c\Delta t}{2m}} \quad (5.9)$$

Chamando de:

$$C_1 = \left(1 - \frac{c\Delta t}{2m}\right) \quad (5.10)$$

e

$$C_2 = \left(1 + \frac{c\Delta t}{2m}\right) \quad (5.11)$$

tem-se:

$$u_{3_i} = \frac{\frac{f(t)\Delta t^2}{m} + 2u_{2_i} - C_1 u_{1_i}}{C_2} \quad (5.12)$$

A equação 3.12 é a equação implementada no programa. Para cada incremento de tempo tem-se, portanto, o deslocamento de cada nó. A implementação corrige a cada incremento de tempo a posição do nó, simulando com isso o deslocamento do martelo e da haste como um todo. Para que esta equação apresente resultado acurado, é necessário escolher Δt tal que não haja deslocamentos excessivos a cada passo de integração.

5.3 – MODELO CONSTITUTIVO DO SEGMENTO DAS HASTES

A força $f_s(t)$ é determinada a partir da deformação de cada barra. A equação 5.13 descreve a lei que determina a força elástica

$$f_s = EA\varepsilon = EA\frac{\Delta\ell}{\ell} = EA\left(\frac{L - L_0}{L_0}\right) \quad (5.13)$$

5.4 – CONDIÇÃO DE CONTORNO NO CONTATO NO CHOQUE ENTRE O MARTELO E A HASTE

A barra que representa o martelo, após dado o início ao programa, cai em queda livre até que o ponto inferior que discretiza o martelo ultrapasse o ponto superior que discretiza a haste. Nesse instante o programa implementado efetua a média das posições destes dois pontos e atualiza a posição destes pontos com relação ao valor médio calculado. É também

determinado o momentum gerado pelo choque e a partir dele calculada a deformação correspondente, aplicada igualmente na haste e no martelo. Esta deformação imposta gera, tanto na extremidade inferior do martelo como na extremidade superior da haste, a força que dará origem a onda que percorre a haste e o martelo. Observa-se neste choque não é introduzido nenhum tipo de perda.

5.5 – MODELO DE SMITH

A extremidade inferior da haste receberá uma força de reação do solo (R) conforme indicado na Figura (3.1- B). Esta força é determinada com base no modelo de Smith original, onde as propriedades do solo são representadas pela resistência última (Ru); deformação elástica denominada de “quake” (Q) e “damping” (J) .

O modelo de Smith utilizado na presente implementação é sem dúvida um modelo sujeito a críticas. Modelos mais sofisticados são disponíveis na literatura sendo que alguns levam em consideração a dissipação de energia que é transmitida ao solo. Contudo, não é objetivo deste trabalho aprofundar-se no conhecimento desses modelos e sim simplesmente utilizar um modelo qualquer que mal ou bem represente um solo que reage na ponta do amostrador.

5.6 – CONTROLE DE ENERGIA NO MÉTODO DE INTEGRAÇÃO EXPLÍCITA

Considerando que durante o processo de integração não são aplicadas forças externas ao sistema martelo-haste-solo, a energia total inicial deve permanecer constante ao longo do tempo. Esta energia total inicial de referência é dada por:

$$E_{\text{Tot}}(t = 0) = mgx_0 \quad (5.14)$$

onde m é a massa do martelo, g é a aceleração da gravidade e x_0 é a altura inicial do martelo em relação a um nível de referência arbitrário. A partir do início da integração, a energia total é calculada como a soma de diversos tipos de energia:

$$E_{\text{Tot}}(t) = E_{\text{PG}}(t) + E_{\text{C}}(t) + E_{\text{PE}}(t) + E_{\text{A}}(t) + E_{\text{S}}(t) \quad (5.15)$$

onde $E_{\text{PG}}(t)$ é a energia potencial instantânea, $E_{\text{C}}(t)$ é a energia cinética instantânea, $E_{\text{PE}}(t)$ é a energia potencial elástica instantânea, $E_{\text{D}}(t)$ é a energia dissipada pelo critério de amortecimento proporcional à massa, e $E_{\text{S}}(t)$ é a energia entregue ao solo.

Considerando agora que o sistema tem n_{N} nós e n_{B} barras (considerando martelo e haste em conjunto), estas energias podem ser calculadas como:

$$E_{\text{PG}}(t) = \sum_{i=1}^{n_{\text{N}}} m_i g x_i(t) \quad (5.16)$$

$$E_{\text{C}}(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_{\text{N}}} m_i v_i^2(t) \quad (5.17)$$

$$E_{\text{PE}}(t) = \sum_{i=1}^{n_{\text{B}}} \frac{L_i}{2EA_i} F_i(t) \quad (5.18)$$

$$E_{\text{D}}(t) = \int_0^t \sum_{i=1}^{n_{\text{N}}} c m_i v_i \Delta x_i d\tau \quad (5.19)$$

$$E_{\text{S}}(t) = \int_0^t F_s v_p dt \quad (5.20)$$

Observa-se que todas as formas de energia, com exceção da energia de amortecimento, podem ser avaliadas instantaneamente. A energia de amortecimento, dado o seu caráter dissipativo, precisa ser acumulada em uma variável durante o processo de integração. O mesmo acontece com a parcela não restituível da energia dissipada no solo.

A Figura 5.2 apresenta o resultado dos sinais de força e velocidade multiplicada pela impedância da haste, trajetória percorrida pela parte superior da cabeça de bater e pela parte

inferior do martelo, bem como a penetração do amostrador no solo para uma haste de 11,80 metros mais o amostrador. Esta simulação numérica considerou uma haste sem a presença de luvas e o amostrador. A figura 5.3 apresenta a mesma simulação introduzindo as variações de impedância na haste devido à presença das luvas e do amostrador.

É possível observar que a simulação da presença das luvas e a do amostrador provocam reflexões que são percebidas pela resposta do programa.

O programa desenvolvido será utilizado no Capítulo 6 e sua potencialidade será melhor demonstrada. Vários resultados de simulações numéricas serão analisados e plotados. A Figura 6.4 do Capítulo 6 apresenta a variação das distintas energias ao longo do tempo devido à aplicação de um golpe do martelo sobre a haste. Com base nessas figuras importantes conclusões são obtidas e discutidas no referido capítulo. Utiliza-se também o programa para analisar a velocidade da partícula que compõe a haste excitada pela passagem da onda longitudinal e a velocidade devido à translação de corpo rígido da barra.

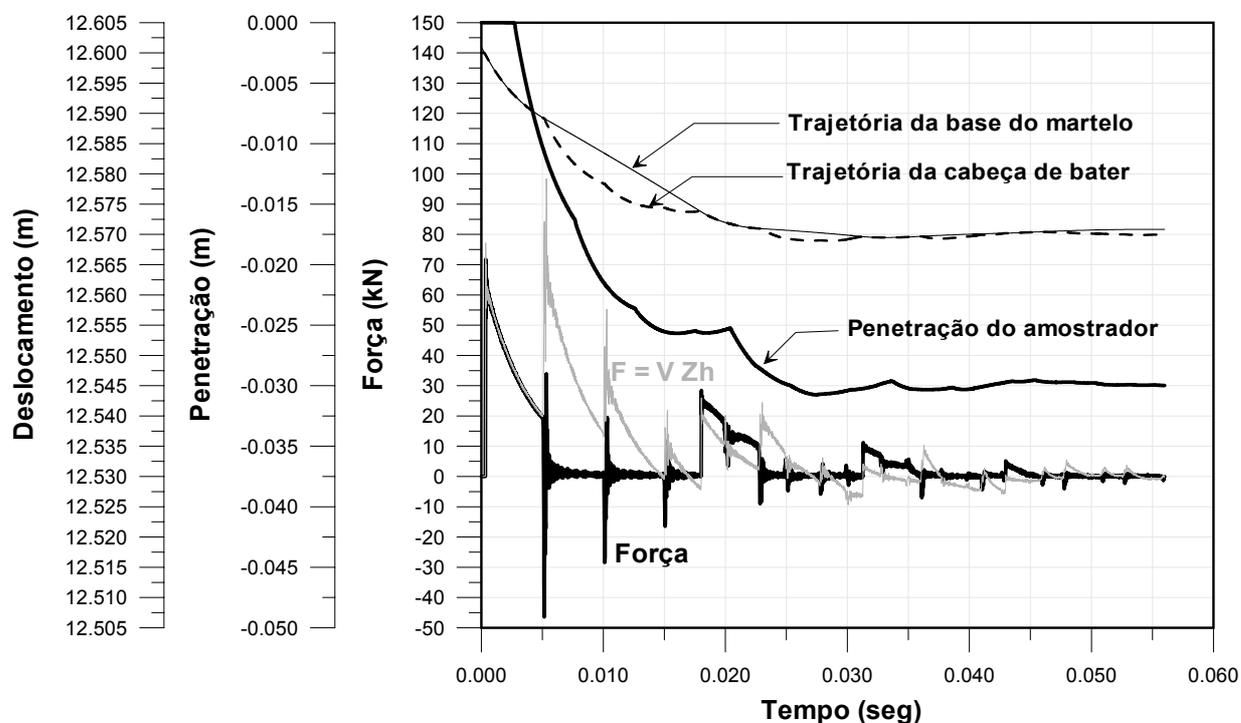


Figura 5.2 – Exemplo de simulação numérica de haste com impedância constante.

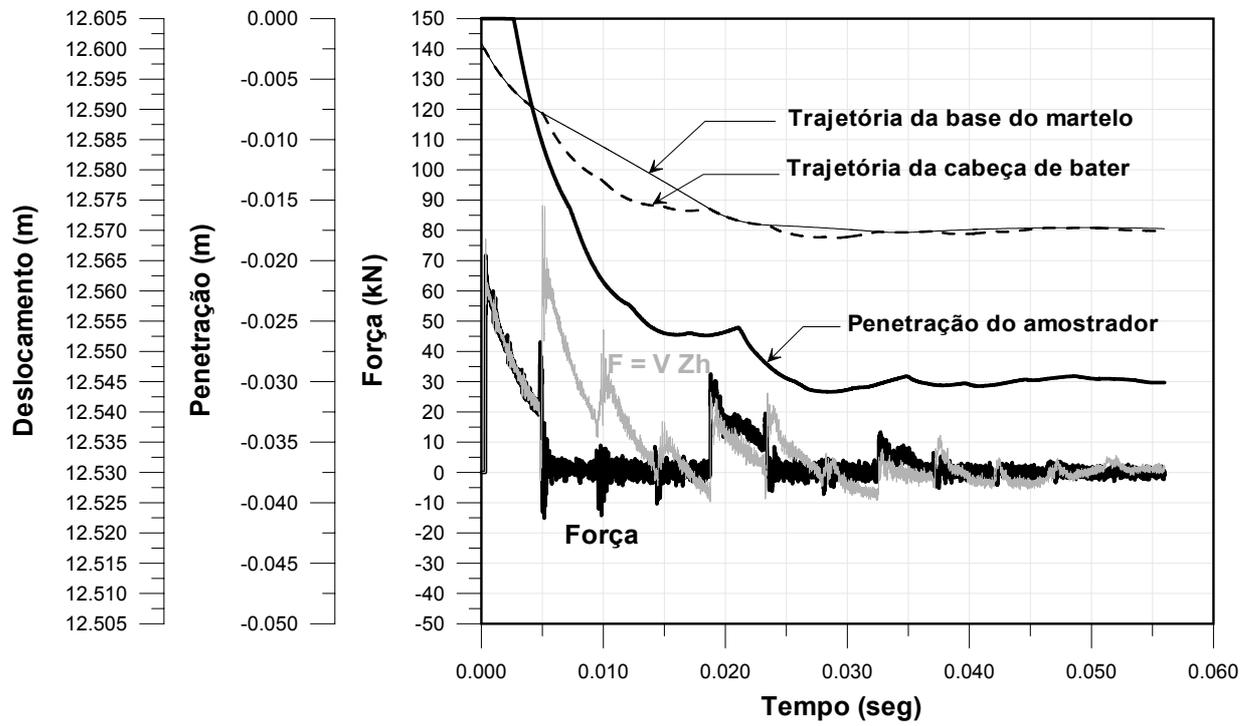


Figura 5.3 - Exemplo de simulação numérica de haste com impedância variável devido à presença das luvas e do amostrador.

CAPÍTULO 6

ANÁLISE TEÓRICA

6.1 - INTRODUÇÃO

Questionamentos quanto à energia efetivamente transmitida à composição de hastes, bem como das hastes para o solo, e a influência do comprimento das hastes no valor da penetração resultante da aplicação de um golpe do martelo são freqüentemente discutidos na literatura (Schmertmann & Palácios, 1979; Abou-matar & Goble, 1997; Cavalcante, 2002). Para responder a estas questões e racionalizar a interpretação de resultados do ensaio SPT, apresenta-se neste capítulo uma análise teórica fundamentada nos princípios básicos da física. Na análise o autor introduz novas definições e conceitos necessários à interpretação dos resultados. Estes conceitos são uma extensão daqueles propostos por Schmertmann & Palácios (1979) já consagrados na literatura.

Inicialmente cabe rever o conceito fundamental contido no trabalho de Schmertmann & Palácios (1979) que na opinião do autor deste trabalho foi esquecido ao longo do tempo e conseqüentemente levou a uma interpretação equivocada na análise do ensaio do SPT em estudos recentes. Schmertmann & Palácios (1979) adotaram como hipótese que a energia transferida para a haste devido à aplicação de um golpe do martelo só ocorre durante o primeiro impacto. Coloca ainda que este impacto é responsável por 90% da penetração do amostrador e que os impactos subseqüentes ocorrem em um intervalo de tempo muito posterior não mais contribuindo na cravação do amostrador. O primeiro impacto é interrompido com a chegada da onda de compressão refletida junto ao amostrador. Durante este intervalo de tempo ($2l/c$) a parte superior da haste somente experimenta deformações elásticas que são de pequena monta. Estes conceitos são ilustrados na Figura 6.1, que apresenta um sinal simulado numericamente para uma haste de 12,60m, cujas especificações de equipamentos seguem as recomendações da NBR 6484, sujeita ao primeiro impacto do martelo. Adicionalmente apresenta-se nesse mesmo gráfico a trajetória de deslocamentos de um ponto correspondente à parte superior da haste e à parte inferior do martelo, indicando que durante o impacto a parte superior da haste está em contato com a parte inferior do martelo. O deslocamento ocorrido neste período é de 0.012m (12,600m – 12,588m) (ver Figura 6.1). Este

deslocamento é a deformação elástica que pode ser determinada a partir da lei de Hooke ou seja, $\sigma = E\varepsilon$.

$$\varepsilon = \frac{F}{EA} = \frac{(60\text{kN} + 20\text{kN})/2}{205\text{MPa} \cdot 0,00041\text{m}^2} = 0,000476$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell} \therefore \Delta\ell = \varepsilon \cdot \ell = 0,000476 \cdot 12,600 = 0,012\text{m}$$

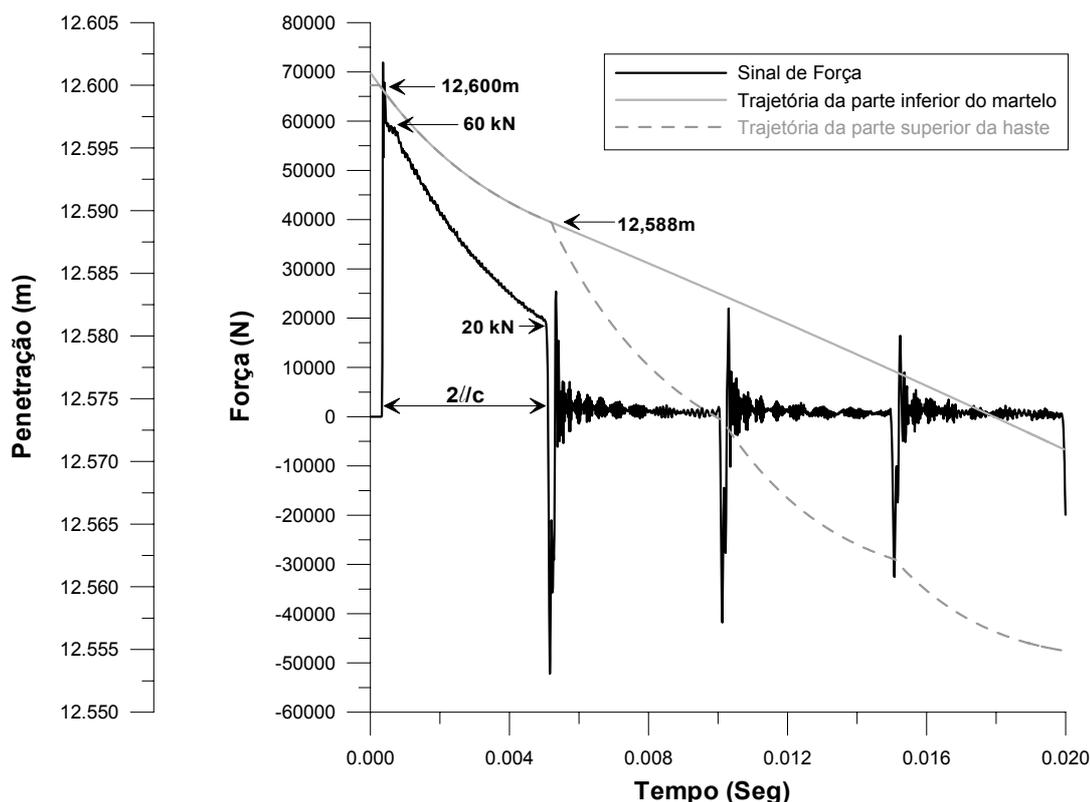


Figura 6.1 – Simulação Numérica de um Golpe em haste de 12,6m.

Na hipótese da adoção da primeira onda de compressão, subentende-se deformações elásticas e pequenos deslocamentos (penetrações) e, neste cenário, a adoção de um referencial interno ao sistema (cabeça de bater) é adequado para descrever o fenômeno físico produzido pelo impacto conforme adotado no trabalho original de Schmertmann e Palácios (1979). Contudo, problemas com hastes curtas são esperados e coeficientes de correção empíricos devem ser adotados para determinar o valor da energia transferida para estas hastes. Uma interpretação racional do SPT em hastes curtas deveria considerar os golpes subseqüentes como válidos à cravação do amostrador e no cálculo da energia transferida à haste, mas neste caso um novo referencial (fixo) fora do sistema deve ser adotado para levar em consideração os grandes deslocamentos observadas durante todo o processo de penetração. Ou seja, deformações

maiores são registradas no sistema martelo-haste-amostrador-solo e o problema de pequenas deformações (Schmertmann & Palácios,1979; Fairhurst, 1961) passa a ser um problema de grandes deslocamentos, o que requer uma adaptação às considerações inicialmente adotadas por Schmertmann & Palácios (1979).

6.2 – ENERGIA POTENCIAL GRAVITACIONAL DO SISTEMA

Para subsidiar esta análise apresenta-se inicialmente a Figura 6.2 que representa o processo de cravação do amostrador no solo, devido à aplicação de um golpe, em três estágios distintos de tempo. O primeiro, $t_1 = 0$, corresponde ao instante imediatamente antes da liberação em queda livre do martelo. O segundo, $t_2 = t$, corresponde ao instante imediatamente anterior ao impacto do martelo sobre a cabeça de bater e o ultimo, $t_3 = \infty$, corresponde ao tempo em que todo processo de cravação do amostrador no solo já ocorreu. Neste instante t_3 , as energias potencial gravitacional do martelo e da haste já foram consumidas na cravação do amostrador no solo, devolvidas elasticamente e amortecidas dinamicamente no interior do martelo e da haste.

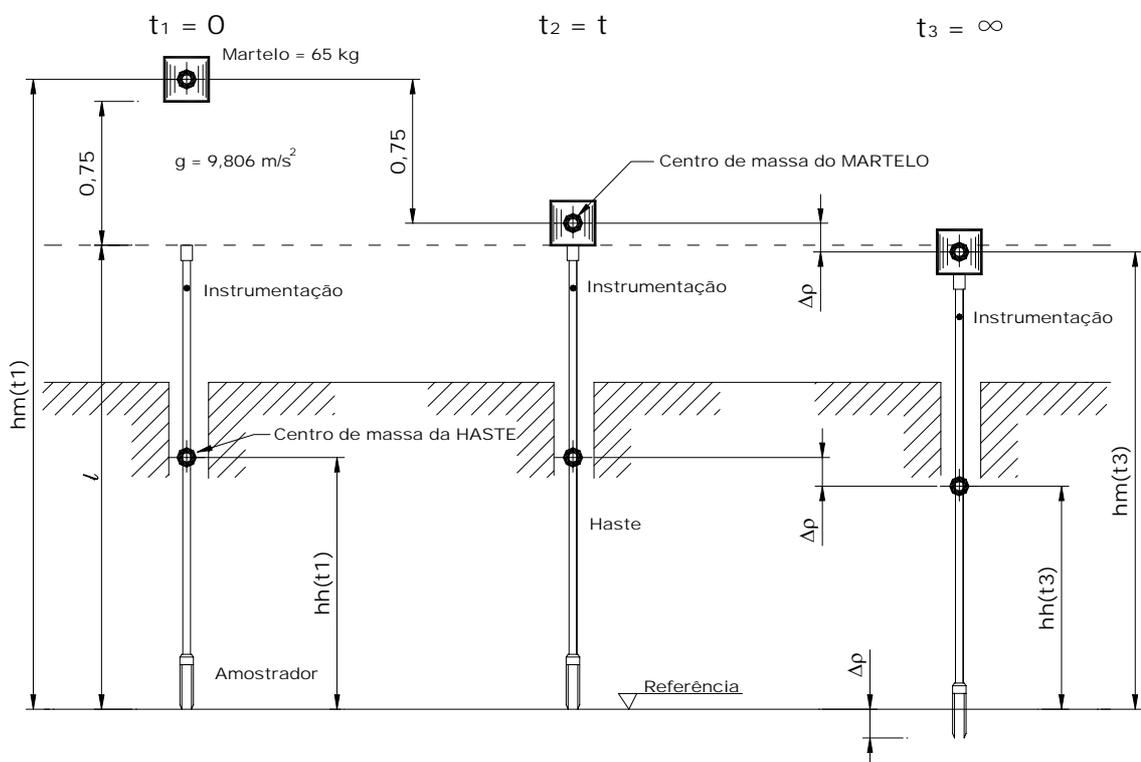


Figura 6.2 – Definições para o cálculo das energias potenciais gravitacional do martelo e da haste.

A determinação da energia potencial gravitacional do martelo (EPG_m) deve ser efetuada em relação a um referencial fixo, externo ao sistema, e é calculada pela equação 6.1.

$$EPG_m = M_m g h_{m(t_1)} \quad (6.1)$$

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 determinação da energia potencial gravitacional da haste (EPG_h) deve ser igualmente efetuada em relação a um referencial fixo, externo ao sistema, e é calculada pela equação 6.2.

$$EPG_h = M_h g h_{h(t_1)} \quad (6.2)$$

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.

Vários autores, entre eles Kovacs (1979), Palácios (1977), Schmertmann e Palácios (1979) desenvolveram os seus estudos com base no trabalho de Fairhurst (1961), que fundamentou a análise na cravação de uma haste pela ação de um golpe de um martelo em uma rocha, Figura 6.3. Abou-matar e Goble (1997) realizaram pesquisas teóricas e experimentais com ensaios controlados em laboratório e fundamentaram suas conclusões em ensaios que consistiam em cravar a ponta da haste em uma placa de compensado assente sobre o piso do laboratório. Nessas situações a penetração é praticamente nula e a adoção de um referencial móvel (cabeça de bater) induz a erros desprezíveis.

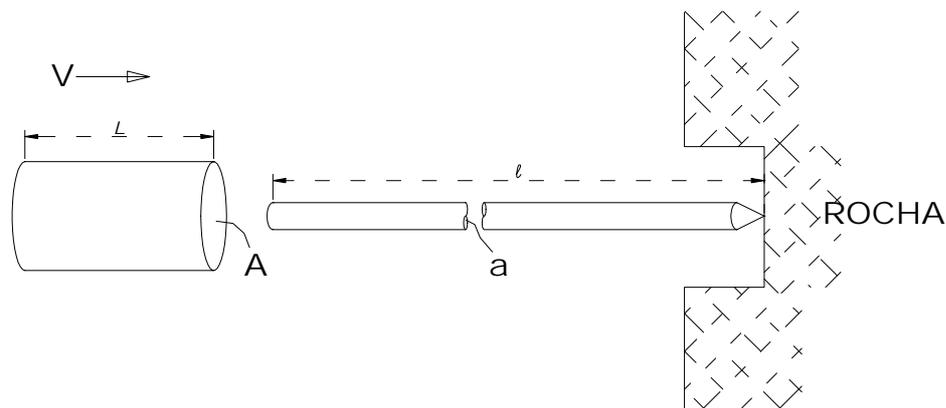


Figura 6.3 – Fairhurst (1961) – Sistema básico de percussão empregado para desmonte de rocha.

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,

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

e

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

sendo: $\Delta\rho$ = 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 6.3.

$$\Delta EPG_m = E^* + M_m g \Delta\rho \quad (6.3)$$

onde: E^* = Energia potencial gravitacional teórica. ($E^* = M_m g 0,75 = 65 \cdot 9,806 \cdot 0,75 = 478\text{J}$).

A energia potencial gravitacional teórica de 478J (E^*) corresponde às especificações da NBR 6484 que difere ligeiramente da energia teórica de referência internacional, $E^* = 63,5\text{kg} \cdot 9,806\text{m/s}^2 \cdot 0,76\text{m} = 474\text{J}$. Neste capítulo optou-se por utilizar as especificações da norma brasileira tendo em vista que todo o trabalho de análise teórica e experimental considerada a NBR 6484 como referência.

Observa-se que para qualquer golpe que resulte em uma penetração no solo, a variação total da energia potencial gravitacional do martelo é sempre maior que a energia potencial gravitacional teórica (E^*). Esta diferença é mais acentuada quando se trata de solos de menor resistência, cuja penetração do amostrador no solo é mais acentuada.

Em relação à energia utilizada para a cravação do amostrador nem sempre é possível desprezar a variação da energia potencial gravitacional da haste, que para comprimentos longos é significativa. Esta variação de energia poder ser calculada pela equação 6.4.

$$\Delta EPG_h = M_h g \Delta \rho \quad (6.4)$$

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, apresentada a seguir na equação 6.5.

As definições introduzidas na Mecânica dos Solos por Schmertmann & Palácios (1979) desprezam a variação da energia produzida pela penetração do amostrador no solo, $\Delta \rho$, na medida em que a análise é restrita a primeira onda de compressão que introduz apenas deformações elásticas ao sistema martelo-haste-amostrador. Inicialmente desenvolvidas para penetração de uma ponteira de aço em rocha, Fairhurst (1961), as definições são válidas para pequenos deslocamentos.

Considerando-se um referencial externo ao sistema, a energia produzida por um golpe será função da altura de queda teórica $75\text{cm} + \Delta \rho$ e, como conseqüência, a energia efetivamente empregada na cravação da composição quando submetida a um golpe de um martelo de massa M_m , passa a ser função de 3 variáveis: altura de queda do martelo, tipo de solo que determina a magnitude de $\Delta \rho$, e geometria (comprimento e seção) das hastes que determina a massa da haste.

Somam-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 reconhecido internacionalmente e expressa através da eficiência do equipamento (Skempton, 1986).

Como conclusão, a energia potencial gravitacional do sistema (considerando simultaneamente martelo, haste, solo), responsável pela efetiva penetração do amostrador é expressa como:

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = E^{\bullet} + M_m g \Delta \rho + M_h g \Delta \rho \tag{6.5}$$

As Tabelas 6.1 e 6.2 apresentam o cálculo teórico da razão das energias ($\Delta EPG_{m+h}^{sistema} / E^{\bullet}$), para diferentes comprimentos de haste e para diferentes tipos de solo, considerando respectivamente a situação de furo de sondagem completamente seco e completamente inundado. Quando 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). Para diferentes posições do lençol freático tem-se diferentes razões de energias.

Tabela 6.1 – Relação de energia $\Delta EPG_{m+h}^{sistema} / E^{\bullet}$ para haste não submersa.

Relação de energia $\Delta EPG_{m+h}^{sistema} / E^{\bullet}$

N	Comprimento da haste (m)														
	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

Algumas conclusões relevantes para a prática podem ser obtidas pela simples avaliação dos dados reportados na Tabelas 6.1 e 6.2. Para solos resistentes (N_{spt} elevados, tipicamente acima de 15 golpes) combinados a comprimentos de haste inferiores a 20 metros 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 correta correção de N_{spt} para o valor de referência de N_{60} . Esta condição é observada na área não hachurada da tabela, que corresponde a razão de $\Delta EPG_{m+h}^{sistema} / E^*$ da ordem de 1,01 a 1,04 (ou seja erros de interpretação entre 2 e 3%). Entretanto a área hachurada na tabela expressa diferenças significativas em função do referencial de grandes penetrações, em razões entre $\Delta EPG_{m+h}^{sistema} / E^*$ superiores a 10%, nos quais a hipótese de desprezar o referencial de grandes deslocamentos não é aceitável.

Tabela 6.2 – Relação de energia $\Delta EPG_{m+h}^{sistema} / E^*$ para haste completamente submersa.

Relação de energia $\Delta EPG_{m+h}^{sistema} / E^*$

N	Comprimento da haste (m)														
	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

Nota-se que vários autores justificam um valor de eficiência ($ER_i = E/E^*$) maior que 100%, devido a uma sobre-elevação do martelo, o que é perfeitamente justificável. Os valores mostrados nas Tabelas 6.1 e 6.2 de razões de $\Delta EPG_{m+h}^{sistema} / E^*$ indicam ser possível obter-se valores de eficiência superiores a 100% sem sobre elevação, como decorrência da energia transferida pelas hastes. Neste caso a interpretação corrente dos ensaios de SPT, especialmente a grandes profundidades, pode estar incorreta, devendo-se fazer uso da energia transferida ao sistema (equação 6.5) para a correção do N_{spt} ao invés da energia teórica de referência internacional E^* .

6.2.1 – Energias contidas no Martelo e na Haste ao longo do tempo devido à aplicação de um golpe.

Para ilustrar o balanço das distintas energias tanto relacionadas ao martelo como a haste utiliza-se o programa desenvolvido e apresentado no Capítulo 5 desta tese. Neste programa é possível, a cada passo de integração, determinar a energia potencial gravitacional $E_{PG}(t)$, a energia cinética $E_C(t)$, a energia potencial elástica $E_{PE}(t)$, a energia dissipada pelo critério de amortecimento proporcional à massa $E_A(t)$ e a energia entregue ao solo $E_S(t)$.

O exemplo analisado refere-se a uma haste de 12,6 metros de comprimento posicionada com a sua extremidade inferior no nível de referência (cota zero), Figura 6.4. O centro de massa do martelo inicial encontra-se a uma altura de 13,465m acima do nível de referência. Desta forma a energia potencial gravitacional inicial do martelo é de 8582,465 J [$EPG_{m\ inicial} = M_m h_{m(t)} g = 65\text{kg} \cdot 13,465\text{m} \cdot 9,806\text{m/s}^2$]. No instante em que o martelo inicia a sua queda a energia potencial gravitacional irá diminuir e a energia cinética irá crescer proporcionalmente. A Figura 6.5 (A) apresenta a variação da energia potencial gravitacional (E_{PGm}) e a energia cinética (E_{Cm}). A Figura 6.5 (B) apresenta a variação da energia potencial elástica (E_{PEm}) e de amortecimento dinâmico (E_{Am}) do martelo ao longo do tempo.

Considerando que a penetração do amostrador no solo no exemplo apresentado é 3,2 centímetros (correspondente a N_{spt} 9,37 golpes) o valor da energia potencial gravitacional final do martelo é de 8084,01 J [$EPG_{m\ final} = (12,6\text{m} - 0,032\text{m} + 0,23\text{m}/2) \cdot 65\text{kg} \cdot 9,806\text{m/s}^2$]. A energia cinética do martelo sai de um valor inicial nulo, atinge o valor máximo de 478 J e no final do processo volta a ser nulo. A variação da energia elástica do martelo ao longo do tempo, bem como, a de amortecimento dinâmico é muito pequena.

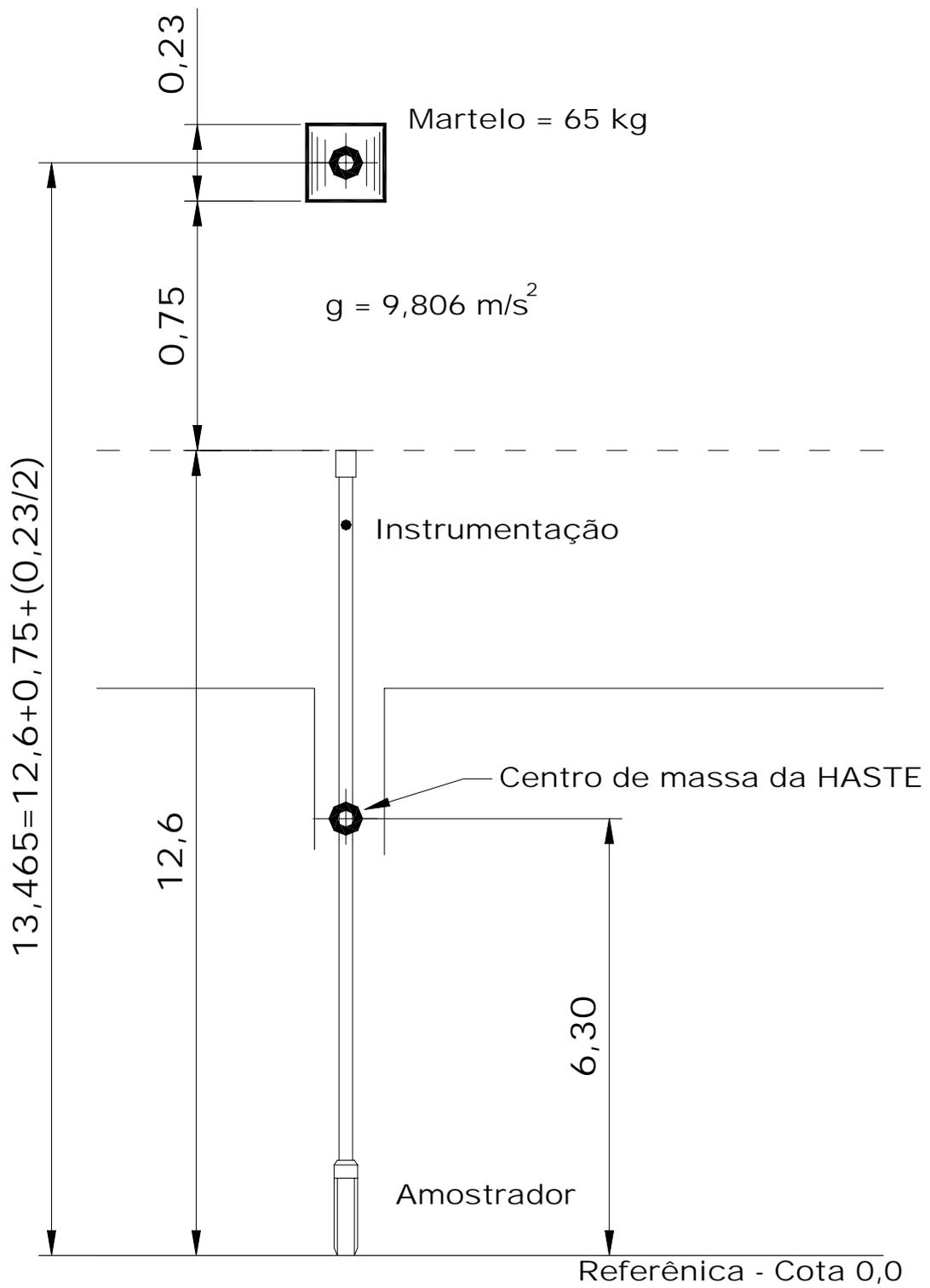


Figura 6.4 – Dados do Exemplo.

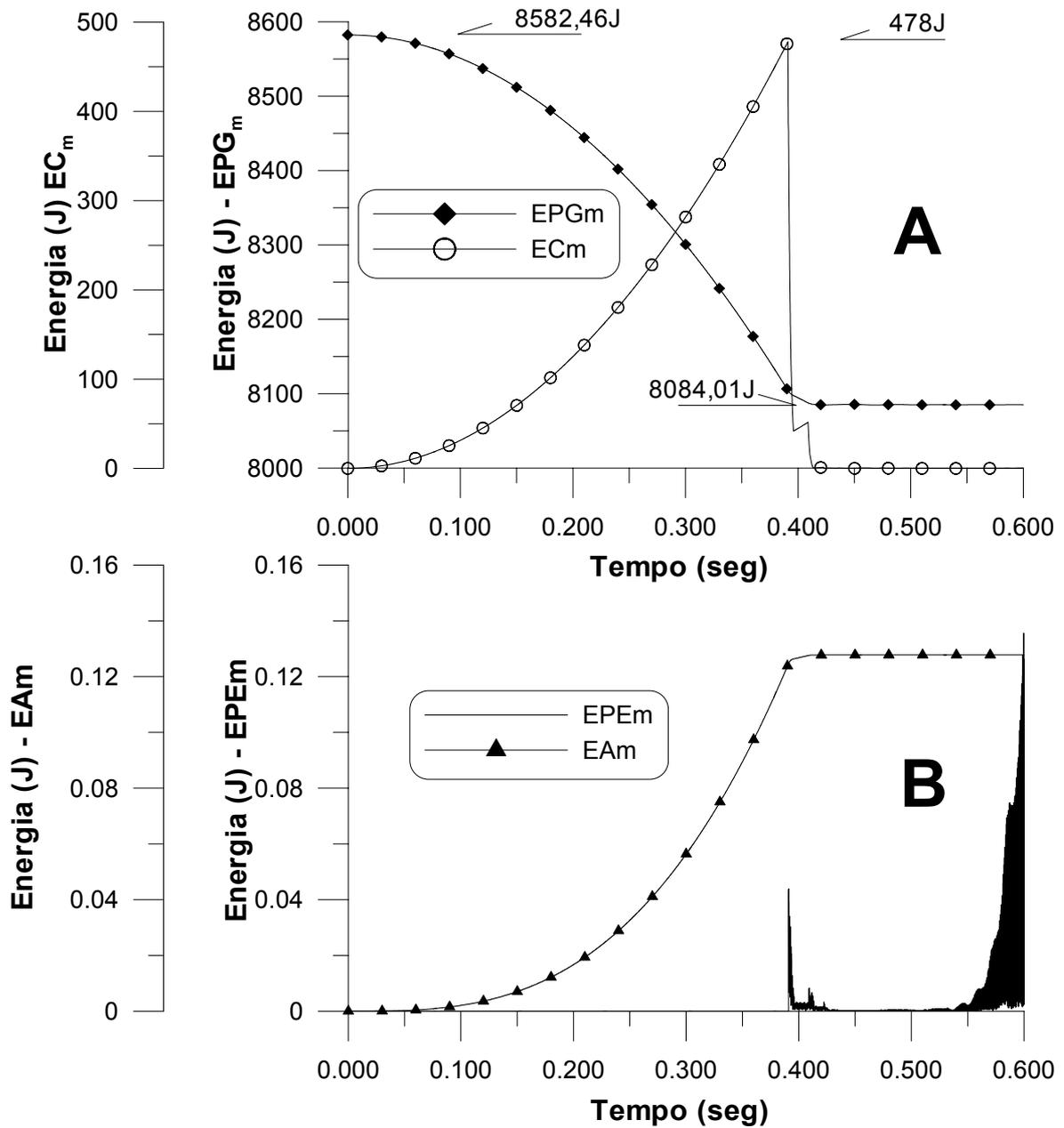


Figura 6.5 – Gráfico de energias do martelo. A) Energia potencial gravitacional e energia cinética; B) Energia elástica e energia de amortecimento dinâmico.

A energia potencial inicial da haste é de 2514,23J [$EPG_{h\ inicial} = (12,6m \ 3,23kg/m) \ 9,806m/s^2 \ (12,6m/2)$] e após a cravação do amostrador de um valor de 3,2cm passa a ser de 2501,46 J [$EPG_{h\ final} = (12,6m \ 3,23kg/m) \ 9,806m/s^2 \ ((12,6m/2)-0,032m)$]. A Figura 6.6 A apresenta o gráfico da variação da energia potencial gravitacional e da energia cinética da haste e a Figura 6.6 B apresenta o gráfico da variação da energia potencial elástica e da energia de amortecimento dinâmico da haste ao longo do tempo.

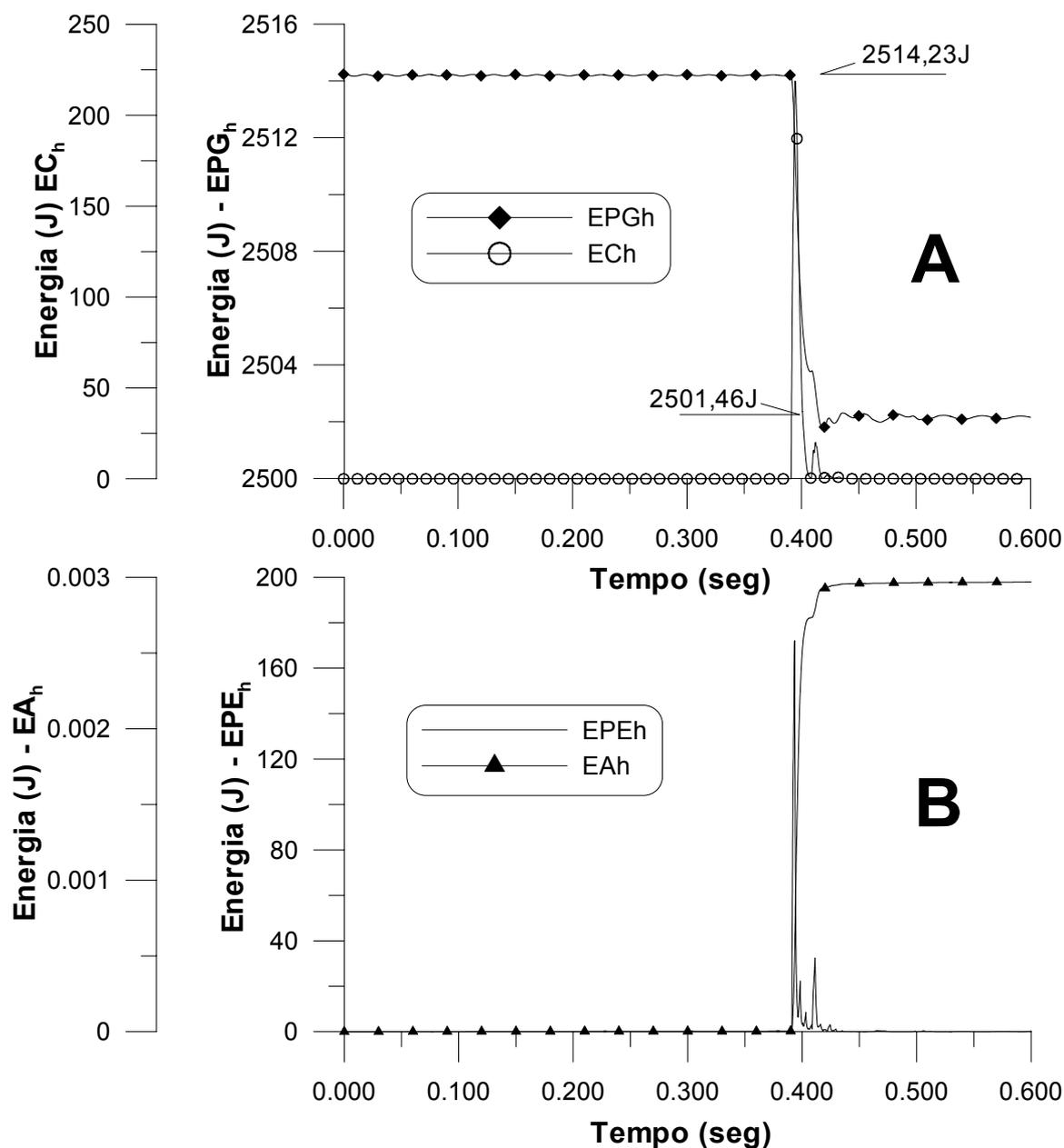


Figura 6.6 – Gráfico de energia da haste. A) Energia potencial gravitacional e energia cinética; B) Energia elástica e energia de amortecimento dinâmico.

Pela análise das Figuras 6.5 e 6.6 pode-se verificar que a energia inicial total do martelo e da haste era de 11096,69 J [8582,46 (J) + 2514,23 (J)] e no final do processo a energia total do martelo e da haste é de 10585,47 J [8084,01 (J) + 2501,46 (J)]. Com a variação da energia total do sistema deve permanecer constante a diferença de 511,0 J [11096,47 – 10585,47] é a energia transferida para o solo conforme apresentado na Figura 6.7.

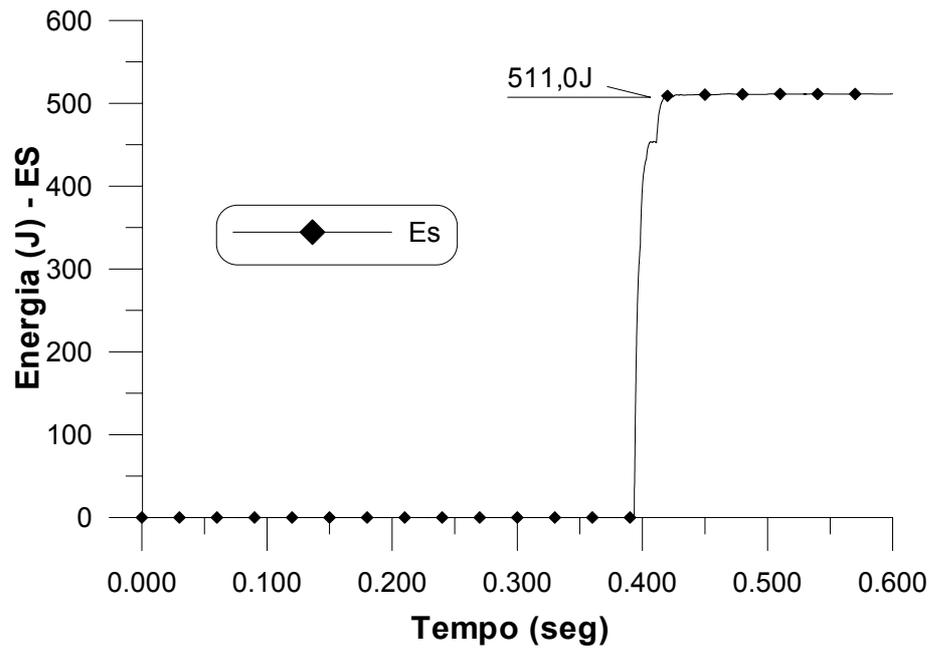


Figura 6.7 – Energia entregue para o solo ao longo do tempo.

O valor de 511 J também pode ser obtido pela equação 6.5 como segue:

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = \left\{ 0,75m \ 9,806 \frac{m}{s^2} \ 65kg + 65kg \ 9,806 \frac{m}{s^2} \ 0,032m \right\} + \left\{ 12,6m \ 3,23 \frac{Kg}{m} \ 9,806 \frac{m}{s^2} \ 0,032 \right\} = 511J$$

6.3 – TRABALHO EXERCIDO SOBRE O SOLO

Entre os vários desdobramentos que resultam das análises apresentadas neste trabalho, uma das mais interessantes refere-se ao entendimento do trabalho exercido sobre o solo pela penetração do amostrador. Este trabalho pode ser utilizado para calcular a força aplicada contra o amostrador, sendo possível através desta força estimar parâmetros constitutivos representativos do comportamento do material. Neste caso a interpretação dos ensaios SPT deixa de ser empírica (correlacionar N com parâmetros dimensionais) passando a ser efetuada por formulações fechadas da mecânica dos solos.

O trabalho efetivamente entregue ao solo é dado pela equação 6.5. Esta equação pode ser demonstrada utilizando-se o princípio de Hamilton como segue: O princípio de Hamilton

mostra 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 a zero. A aplicação do princípio de Hamilton na interpretação do SPT deve-se a Cintra & Aoki (2000). Adotando a nomenclatura apresentada em Clough e Penzien (1975) a equação que descreve o princípio de Hamilton é dada por:

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

Onde: $T(t)$: Energia cinética;

$V(t)$: Energia Potencial;

$W_s(t)$: Trabalho efetuado por forças não conservativas na ponta do amostrador (sobe o solo);

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

δ : Variação;

t_1 : tempo inicial do período considerado (ver figura 6.2);

t_2 : tempo final do período considerado (ver figura 6.2).

Considerando a Figura 6.2 e t_1 (Hamilton) igual ao instante zero (Figura 6.2) e o t_2 (Hamilton) igual ao instante (t_3 da Figura 6.2) 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 que:

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

Portanto, 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 6.5 este valor nada mais é do que a variação do trabalho efetuado pelas forças não conservativas, ou seja:

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = W_s + W_{nc}$$

Como o trabalho efetivamente entregue ao solo é conhecido (equação 6.5); como este valor é proporcional à penetração e o valor desta penetração é conhecido é fácil calcular o valor da força dinâmica (F_d) média.

$$E_s = T = \Delta EPG_{m+h}^{sistema} \text{ com perdas} = W_s = F_d * \Delta\rho \quad (6.6)$$

$$F_d = \Delta EPG_{m+h}^{sistema} \text{ com perdas} / \Delta\rho \quad (6.7)$$

O conhecimento do valor da força F_d que atua para produzir a penetração do amostrador no solo abre uma gama de alternativas para a interpretação do ensaio. Por exemplo, em argilas é possível utilizar o valor medido desta força para estimar a resistência ao cisalhamento não drenado (S_u) através de métodos de equilíbrio limite. Em areias pode-se buscar uma estimativa das tensões admissíveis do solo. Estabelecer correlações não é objetivo do presente trabalho, embora no Capítulo 8 apresente-se um estudo de casos que objetiva a determinação dos princípios que possam fundamentar a interpretação dos resultados do SPT em areais e argilas.

6.4 ANÁLISES COMPLEMENTARES

6.4.1 – Influência da variação da seção da haste no valor da Energia Entregue ao Solo.

A proposição apresentada nesta pesquisa pode ser utilizada para subsidiar estudos referentes a diferentes tipos de hastes, tais como as utilizadas em outros países, (AW, NW, etc.). Vários autores manifestam a preocupação quanto à energia transferida para o solo e os possíveis erros que podem ser introduzidos na interpretação dos resultados. Abou-matar e Goble (1997) em sua pesquisa perceberam que o aumento da área da seção da haste afeta o número de golpes, mas não apresentam conclusões definitivas e sugerem maiores investigações.

Matsumoto e Matsubara (1982) realizaram pesquisa visando avaliar a influência da rigidez da haste no valor de N_{spt} . Os autores realizaram ensaios em hastes com diâmetros de 60mm (9,14kg/m), 50mm (7,28kg/m) e 40,5mm (4,34kg/m). Os ensaios foram realizados através da cravação do amostrador em solo residual de elevada resistência (rigolito intemperizado), com hastes variando de 37 a 47 metros de comprimento, obtendo penetrações de 2 a 4 mm por golpe, ou seja, 10cm/50golpes e 20cm/50golpes respectivamente. Os autores citados concluíram que não havia diferença estatística significativa que pudesse apontar para uma

efetiva influência da seção da haste no valor de N_{spt} . É interessante observar que na formulação proposta nesta pesquisa a influência da seção da haste é mais pronunciada em solos de menor resistência. No caso da pesquisa de Matsumoto e Matsubara a variação da energia potencial gravitacional da haste varia entre 3,15J ($\Delta EGP_h = 37m \cdot 4,34kg/m \cdot 0,002m \cdot 9,81m/s^2 = 3,15J$) a 16,85J ($\Delta EGP_h = 47m \cdot 9,14kg/m \cdot 0,004m \cdot 9,81m/s^2 = 16,85J$). Esta variação se comparada à energia teórica de referência corresponde respectivamente a 0,6% ($=3,14J / 474J$) e 3,5% ($=16,85J / 474J$), o que é percentualmente insignificante em se tratando de um ensaio como o do SPT acrescido da heterogeneidade normalmente encontrada em solos residuais. Observa-se que o valor de 0,6% é para a haste mais leve, a mais curta e para o menor valor de penetração, o valor de 3,5% é para a haste mais pesada, a mais longa e o maior valor de penetração encontrado. Analisando-se para um mesmo comprimento esta diferença fica desprezível.

Com base na Figura 6.2, e nas equações apresentadas neste capítulo pode-se facilmente demonstrar que quanto maior a seção da haste maior é a sua massa e, para um dado comprimento de haste e uma mesma penetração, maior será a energia transferida ao solo.

6.4.2 – Análise da Rigidez do Martelo

Yokel (1982) apresentou em seu artigo um estudo teórico sobre a influência da seção da haste e para tanto apresentou as equações de tensão gerada devido à aplicação de um golpe, e a partir desta deduziu a equação de força, energia e eficiência. Para simplificar o formulário deduzido, Yokel assumiu que o martelo é rígido, ou seja, $r = Z_h/Z_p = \text{zero}$ (equação 3.50). De fato o martelo não é rígido mas segundo o autor devido a valores de “r” de pequena ordem (valores típicos para equipamentos de sondagem $r = 0,02$ a $0,07$) esta hipótese é razoável.

Com base no resultado do programa implementado, que considera o martelo como elástico, é possível determinar a variação da energia potencial elástica tanto do martelo como da haste. A Figura 6.5 apresenta o resultado desta energia potencial elástica do martelo onde pela simples análise do gráfico é possível verificar que os valores são efetivamente de pequena ordem. Este fato leva a concluir que a hipótese adotada por Yokel, e também empregada em programas de simulação numérica do ensaio SPT, é válida.

6.5 – ANÁLISE DA EQUAÇÃO DE ENERGIA

A análise racional do ensaio SPT depende da correta monitoração e interpretação dos sinais de força e aceleração que resultam na energia efetivamente entregue ao sistema haste-amostrador. Diferentes formulações podem ser utilizadas na interpretação dos sinais, porém parece haver concordância quanto à necessidade de expressar a energia contida na onda longitudinal de tensão através da equação 3.85, que está reescrita abaixo, equação 6.8:

$$E = \int_{t=0}^{t=\infty} FV dt \quad (6.8)$$

Considere-se inicialmente o caso de ondas se propagando nos sentidos descendente e ascendente em uma composição de haste. As ondas ascendentes se originam das reflexões da onda decorrente do golpe, em pontos onde há a variação da impedância, como por exemplo nas luvas que conectam a haste.

Para tanto é importante reproduzir a convenção de sinal adotada, isto é, força positiva quando de compressão e velocidade positiva quando no sentido descendente. Uma onda de compressão viajando no sentido ascendente dará origem a um valor de energia negativo.

O cálculo da energia é efetuado através dos registros finais de força e de velocidade que representam valores finais da superposição dos efeitos das ondas ascendente e descendente. Os valores finais de F e V pelo princípio da superposição dos efeitos podem ser representadas como segue:

$$F = F_d + F_a \quad (6.9)$$

$$V = V_d + V_a \quad (6.10)$$

onde: F_d = Força da onda descendente;

F_a = Força da onda ascendente;

V_d = Velocidade da partícula devido à passagem da onda descendente;

V_a = Velocidade da partícula devido à passagem da onda descendente.

Introduzindo as equações 6.9 e 6.10 na equação 6.8 tem-se:

$$E = \int (F_d + F_a)(V_d + V_a)dt = \int F_d V_d dt + \int F_d V_a dt + \int F_a V_d dt + \int F_a V_a dt \quad (6.11)$$

Como $\downarrow V = \downarrow F/Z$ e $\uparrow V = -\uparrow F/Z$ (equações 3.16 e 3.17) é fácil demonstrar que:

$$\int F_a V_d dt = -\int F_d V_a dt \quad (6.12)$$

Logo a energia, utilizando-se simultaneamente os valores de força e velocidade resultará:

$$E = \int FV dt = \int F_d V_d dt + \int F_a V_a dt \quad (6.13)$$

Portanto, a energia calculada com registro final de força e de velocidade obtidos na célula de carga e nos acelerômetros, é a soma de duas parcelas de energias, da onda descendente com a onda ascendente; porém é interessante lembrar novamente que a parcela da energia da onda ascendente resulta em valor negativo o que implica que as reflexões existentes nas luvas são deduzidas no sinal real e, portanto a energia calculada com a equação 6.8 é a energia realmente transferida para a haste. As equações $E = (Ac/E) \int F^2 dt$ e $E = (c/AE) \int V^2 dt$ também utilizadas na determinação da energia transferida para as hastes não descontam automaticamente o efeito introduzido pelas reflexões nas luvas e portanto apropriam valores de energias incorretos.

6.5.1 – Análise da Velocidade da Partícula.

A partir da lei de Hooke ($\sigma = E\varepsilon \therefore F = EA\varepsilon$) chega-se a equação 3.6 ($F=(EA/c)V$) e conseqüentemente obtém-se $V = -c\varepsilon$.

A Figura 6.8 apresenta a velocidade da partícula calculada pela expressão $V = -c\varepsilon$, onde $\varepsilon = (L_o - L)/L_o$, c velocidade de propagação da onda no aço e L_o comprimento inicial de um elemento de discretização da haste. A velocidade do nó é calculada pela expressão $V = (u_{3i} + u_{3i+1})/\Delta t$, onde u_3 é a equação (5.12) que calcula a cada passo de integração a sua

nova posição e Δt é o incremento de tempo a cada passo de integração. O exemplo apresentado corresponde a sinais simulados numericamente para uma haste de impedância constante com um comprimento total de 12,60m, gerados decorrentes da aplicação de um golpe do martelo, sendo a geometria tanto da haste como do martelo representada de acordo com as recomendações da Norma Brasileira. Os sinais plotados pertencem a um ponto da haste distante 65 centímetros da cabeça de bater. Esta distância corresponde à posição da instrumentação utilizada nos ensaios de campo realizados neste trabalho e apresentados no Capítulo 7.

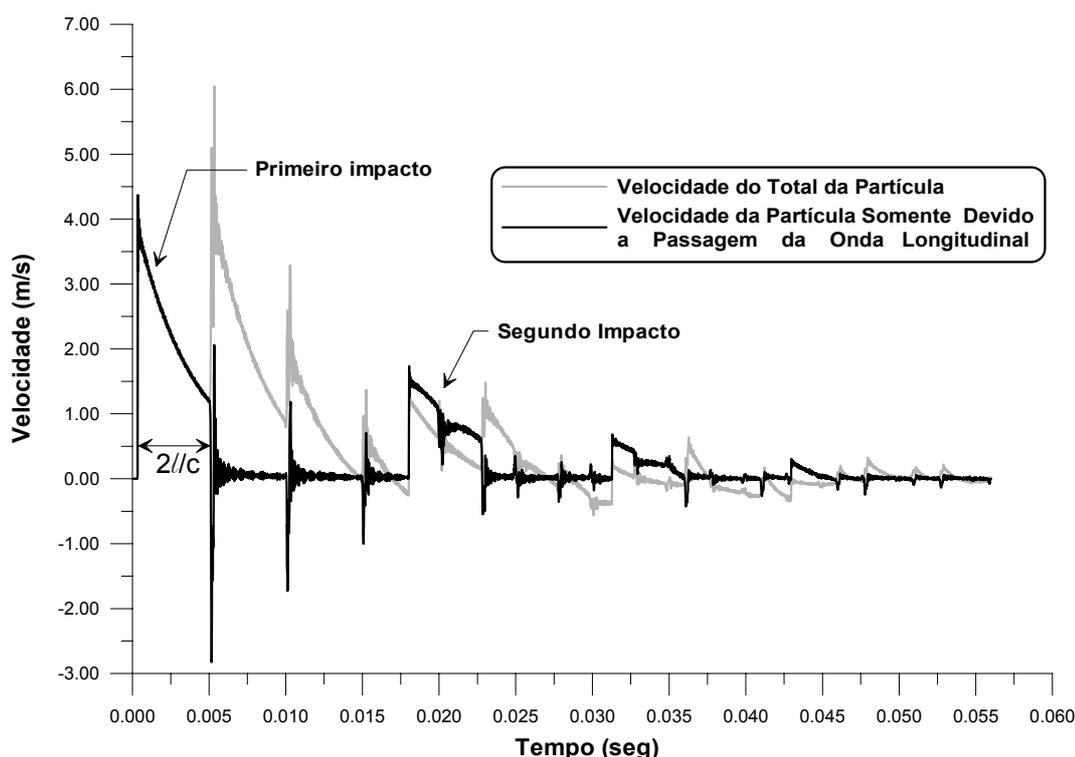


Figura 6.8 – Gráfico de velocidade $V = -c\varepsilon$ e $V = (u_{3i} + u_{3i+1})/\Delta t$.

Observa-se pela análise da Figura 6.8 que, durante o primeiro impacto, a velocidade da partícula devido à passagem da onda longitudinal corresponde à velocidade total da partícula. Após o término do primeiro impacto a velocidade da partícula devido à passagem da onda longitudinal é praticamente nula, ou seja, $L = L_0$. Após decorridos o tempo $2l/c$ a partícula ainda experimenta uma certa velocidade e nessa situação a barra não está mais se deformando elasticamente ($L=L_0$ ou $\varepsilon = 0$). Esta velocidade corresponde à velocidade de deslocamento da partícula como um corpo rígido. Como se dispõe da velocidade total da partícula e a velocidade referente à passagem da onda longitudinal é possível determinarmos a velocidade de corpo rígido da haste, Figura 6.9.

A velocidade total da partícula é a velocidade experimentada devido à passagem da onda longitudinal mais a velocidade de corpo rígido, também denominada de velocidade absoluta. Esta é a velocidade efetivamente medida através da instrumentação desenvolvida e apresentada no Capítulo 4.

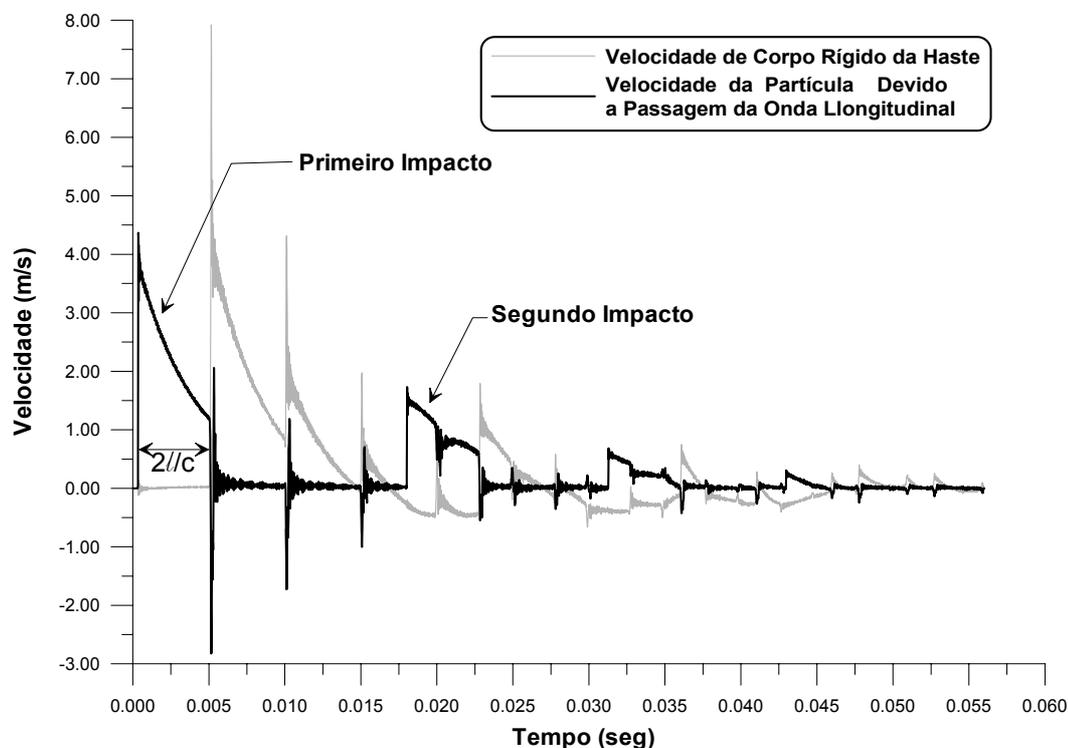


Figura 6.9 – Velocidade de corpo rígido de uma haste.

Um comentário sobre o trabalho de Matsumoto et al. (1992) deve ser efetuado. A instrumentação de *strain gauges* colados à haste registram somente a velocidade da partícula. Esse sistema de instrumentação não é capaz de perceber a velocidade de corpo rígido da haste. Este fato pode trazer implicações importantes no método de *Two-Strain Point Measurement* proposto pelos citados autores, tais como restrição do método somente para pequenos deslocamentos.

6.5.2 – Análise do Valor da Energia Obtido com o Auxílio da Instrumentação.

Com base nos itens 6.2 e 6.5 é de se esperar que o valor da energia calculada pela expressão 6.8 deva ser superior aos 478J, tendo em vista que o martelo tem um deslocamento total maior que os 75 cm (correspondente à altura de queda que produz o primeiro impacto).

Para analisar esta questão utilizou-se novamente o programa desenvolvido e apresentado no Capítulo 5 desta tese, simulando-se numericamente a aplicação de um golpe de martelo sobre uma haste de 35,80m, com geometrias conforme NBR 6484. Nesta simulação foram registrados, ao longo de todo o processo de integração numérica, os valores de força e velocidade em três pontos distintos da haste, a saber: 2 centímetros abaixo da cabeça de bater (denominado junto à cabeça de bater); no centro da haste (denominado de centro) e a 2 centímetros acima do término da haste (denominado junto ao amostrador).

As figuras 6.11 apresentam os sinais de força e $F=VZ_h$ obtidos numericamente para as três posições e as figuras 6.11 e 6.12 apresentam a evolução ao longo do tempo do cálculo da energia utilizando a equação 6.8 e a penetração da haste no solo.

Pela análise da Figura 6.10 é possível observar que o valor da energia computada a partir da equação 6.8, nas três posições, é distinto. Quanto mais próximo do amostrador maior a energia obtida. Como a velocidade média da partícula decorrente da passagem da onda e a velocidade de corpo rígido da haste são constantes nos distintos pontos da haste a diferença no valor da energia está associada ao valor da força. Este fato é lógico, pois quanto maior for a massa da haste, sobre o ponto considerado, maior será a força de massa nesse ponto. Por exemplo, para a haste considerada na simulação numérica efetuada e para o ponto de registro localizado a 2 centímetros do término da haste, a força de massa nesse ponto é de 1159N. $((36,60m - 0,02m) * 3,23kg/m * 9,81)$.

O acima exposto é de fundamental importância para a correta interpretação e aquisição de sinais de força. É procedimento consagrado em instrumentação zerar a leitura inicial da célula de carga imediatamente antes do início da aquisição do sinal. Este procedimento é decorrente de inúmeros fatores que provocam um desvio do zero da célula de carga (aquecimento do strain gages, variações da temperatura ambiente, variações na fonte de alimentação, etc.). Este procedimento é muitas vezes efetuado eletronicamente no próprio circuito de amplificação e condicionamento do sinal ou numericamente no instante do processamento do sinal. Este procedimento faz com que a força de massa, decorrente do peso da haste localizado acima do ponto de instrumentação, seja eliminado. Ao se eliminar este valor de força um erro no computo da energia obtida com a equação 6.8 é efetuado. Este erro pode ser desprazível quando a instrumentação está localizada junto à cabeça de bater ou o comprimento e massa da

haste são muito pequenos acima do ponto instrumentado. Já em se tratando de hastes longas e instrumentação posicionado no centro ou junto ao amostrador esta força não pode ser desprezada.

Com base no acima exposto, os dados obtidos com instrumentação posicionada junto a cabeça de bater são proporcionais somente ao golpe ($0,75m + \Delta\rho$), já para os dados obtidos com a instrumentação posicionada junto ao amostrador é incorporado ao valor da energia a massa da haste e conseqüentemente são proporcionais a energia do sistema (equação 6.5). Esta constatação é demonstrada experimentalmente no Capítulo 7.

$$E^* = 0,75M_m g = 0,75m \ 65kg \ 9,81m/s^2 = 478J$$

A parcela do martelo que desceu 0,065 metros além dos 0,75m:

$$\Delta EPG_m = \Delta\rho M_m g = 0,065m \ 65kg \ 9,81m/s^2 = 41J$$

E a parcela referente à haste:

$$\Delta EPG_h = \Delta\rho M_h g = 0,065m \ 3.23kg/m \ 36.60m \ 9,81m/s^2 = 75J$$

Observa-se que a soma das parcelas de energias referentes ao martelo leva exatamente aos 519J (478+41) que foram obtidos em um ponto junto à cabeça de bater (Figura 6.11). Já em um ponto próximo ao amostrador a energia calculada acima foi de 594J (478+41+72), ligeiramente superior à energia obtida pela equação 6.8, que resultou em 592J, Figura 6.11. Esta diferença de 2J corresponde à energia de amortecimento dinâmico interno da haste e do martelo.

Conclui-se, portanto, que a energia efetivamente entregue ao solo é dada pela equação (6.5) e pode se escrita como segue:

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = (0,75 + \Delta\rho)M_m g + \Delta\rho M_h g \quad (6.14)$$

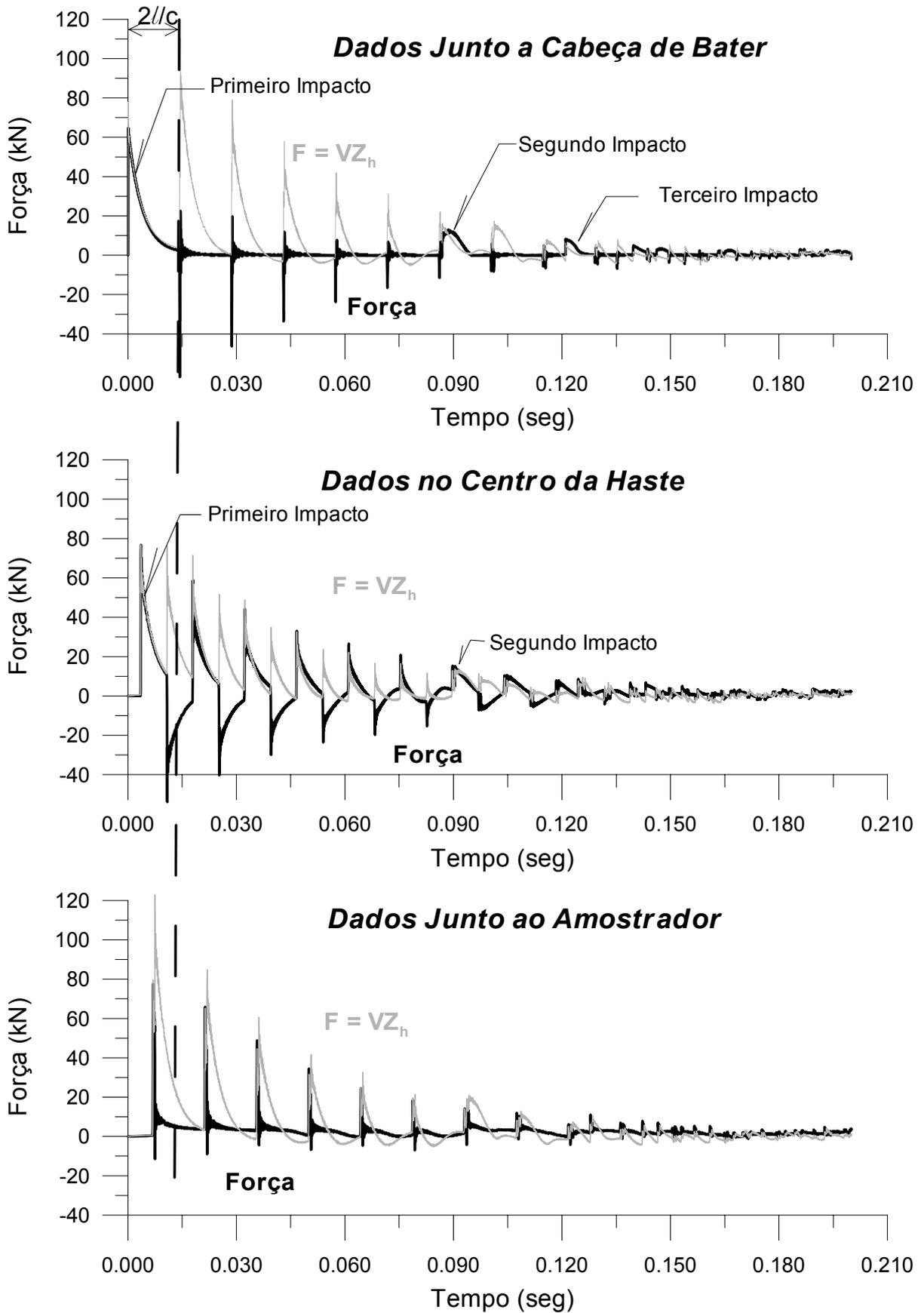


Figura 6.10 – Sinal de força de $F=VZ_h$ junto à cabeça de bater.

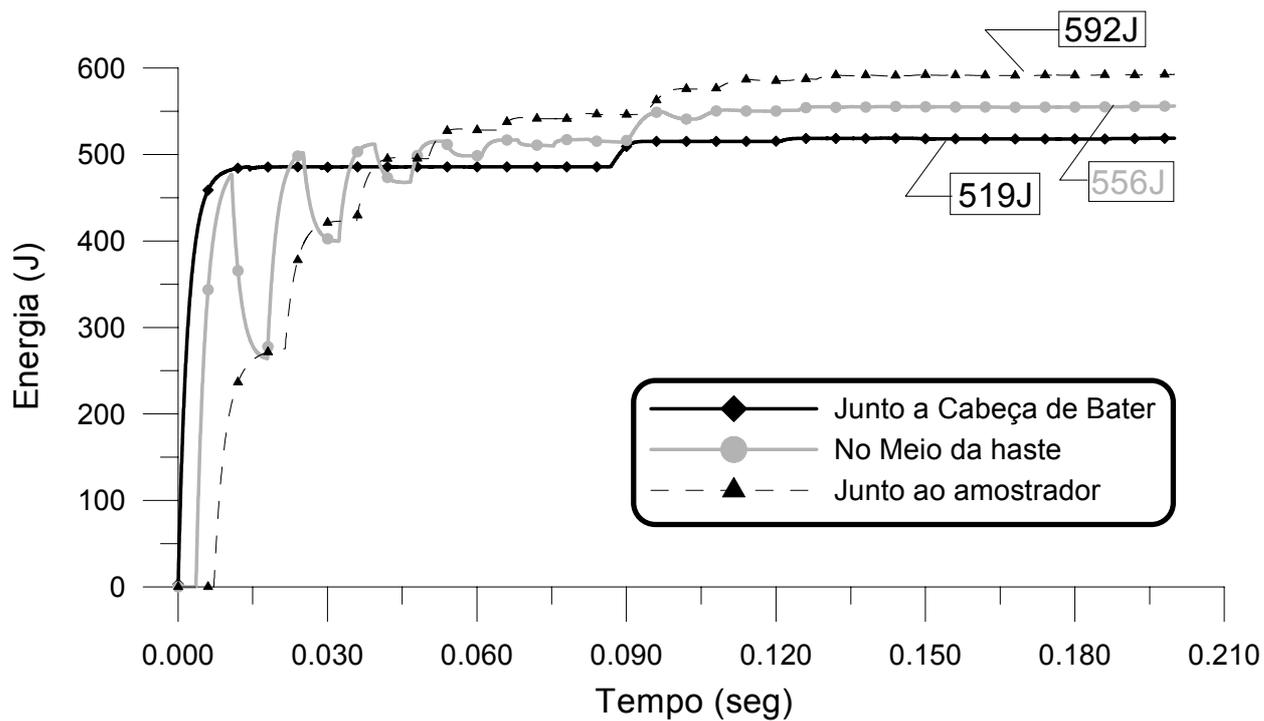


Figura 6.11 – Evolução do valor da energia ao longo do tempo obtido para as três posições.

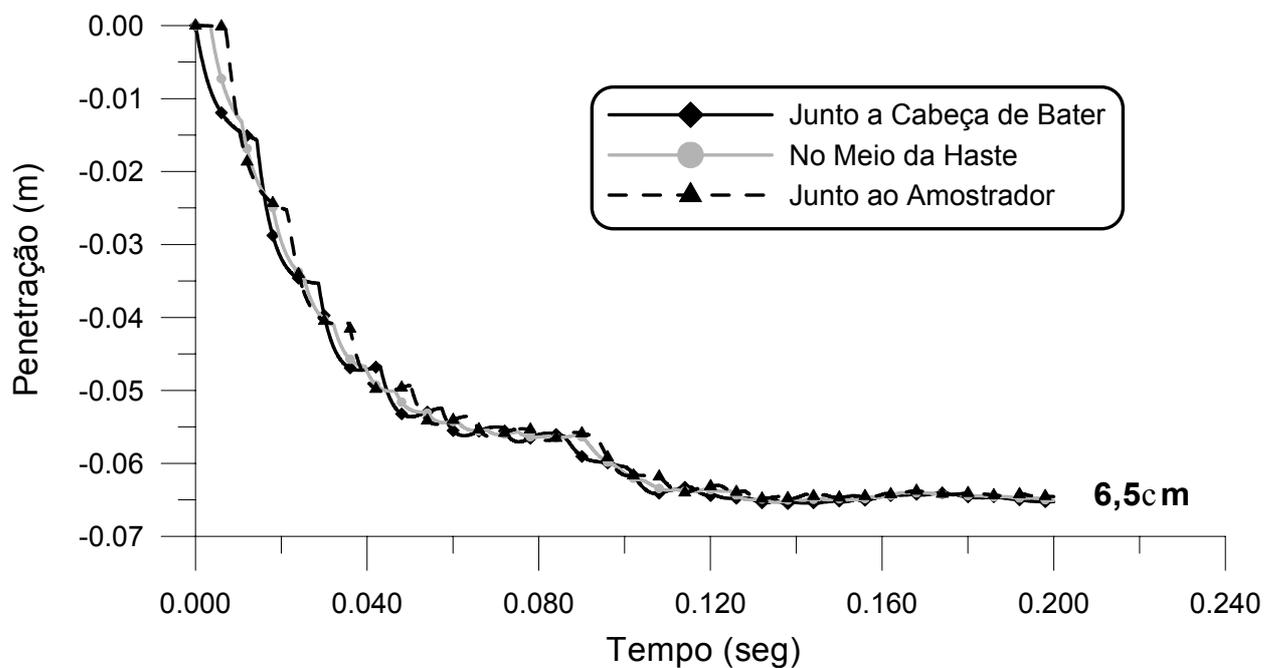


Figura 6.12 – Evolução da penetração ao longo do tempo obtido para as três posições.

6.5.3 – Correção do Valor da Energia Quando a Leitura Inicial da Célula de Carga Foi Zerada.

A energia calculada pela equação 6.8 é o trabalho feito pela parte de cima sobre a parte de baixo da haste, onde “de cima” e “de baixo” depende da posição do ponto de observação, Figura 6.13.

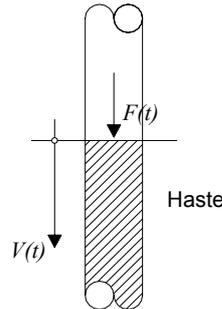


Figura 6.13 – Esquema das forças atuantes em uma seção qualquer de uma haste.

$$F(t) = f(t) + F_H \quad (6.15)$$

Onde: $f(t)$ = é a força na célula de carga, zerada sob o peso da haste;

F_H = é a força decorrente do peso da haste sobre a célula de carga.

$$V(t) = v(t) + \bar{V} \quad (6.16)$$

Onde: $v(t)$ = é o sinal de aceleração integrado e limpo do valor médio;

\bar{V} = é o valor médio do sinal de aceleração integrado que corresponde à velocidade média de corpo rígido da haste.

Introduzindo-se as equações 6.15 e 6.16 na 6.8 tem-se:

$$\int F(t).V(t).dt = \int [f(t) + F_H].[v(t) + \bar{V}].dt = \int f(t).[v(t) + \bar{V}].dt + F_H \int v(t).dt + F_H \bar{V} \int dt$$

Onde: $\int f(t).[v(t) + \bar{V}].dt$ = integral calculada quando a célula de carga é zerada imediatamente antes do início da aquisição do sinal de força;

$F_H \int v(t).dt = 0$, pois $v(t)$ tem média nula por definição;

$F_H \bar{V} \int dt = F_H \bar{V} t_{\text{total}} = \text{é o trabalho realizado pelo peso da haste, que depende do seu comprimento.}$

Como $\bar{V} = \Delta\rho / t_{\text{total}}$ tem-se que $F_H \cdot \bar{V} \cdot t_{\text{total}} = F_H \cdot \Delta\rho$; ou seja, basta somar à energia calculada pela equação (6.8) com o sinal da célula de carga inicialmente zerado o valor resultante do produto da força de massa da haste posicionada acima da célula de carga (F_H) pelo valor total da penetração permanente. Este procedimento permite a correção do valor final de energia, por exemplo, para a situação em que a célula de carga está posicionada junto ao amostrador. Para a situação em que a célula de carga está posicionada junto à cabeça de bater o erro introduzido ao se zerar a leitura inicial da célula de carga é desprezível, não necessitando tal correção.

Para se plotar a evolução da energia ao longo do tempo, conforme figura 6.11, é necessária à correta aquisição do sinal de força ao longo do tempo onde o valor inicial da célula de carga corresponde ao peso da haste posicionada acima dela. Alternativamente, dispondo-se do sinal de força inicialmente zerado pode-se somar a cada valor registrado o valor da força correspondente ao peso da haste. Nesse caso, estando o valor da força corrigido antes da integração efetuada pela equação (6.8) tem-se a correta evolução da energia ao longo do tempo.

6.6 - COMENTÁRIOS FINAIS

A análise teórica desenvolvida neste capítulo apresentou uma série de considerações que modificam a interpretação do ensaio SPT. A principal constatação é que a interpretação do ensaio quando se consideram os impactos subseqüentes deixa de ser um problema de pequenos deslocamentos para ser um problema de grandes deslocamentos. Neste caso o valor da penetração do amostrador no solo passa a ser relevante e deve ser considerado na avaliação das energias tanto do martelo como da haste. Este fato faz com que o referencial a ser utilizado para a apropriação das energias deve ser fixo e estar fora do sistema.

Esta nova abordagem na interpretação do ensaio permite a determinação da energia efetivamente entregue como posto por Aoki e Cintra (2000), que sugeriu que o ensaio seja interpretado com base no trabalho efetivamente gasto para cravar o amostrador. Neste caso o valor da variação da energia potencial gravitacional da haste deve ser considerado. Com a energia entregue ao solo efetivamente conhecida é possível estimar o valor da força resultante produzida para cravar o amostrador no solo. Este fato abre uma gama de alternativas para a interpretação do ensaio, como, por exemplo, é possível estimar a resistência não drenada das argilas através de métodos de equilíbrio limite e para as areias pode-se buscar uma estimativa das tensões de ruptura do solo.

Outro fato importante verificado é que a energia obtida pela equação 6.8 deve levar em consideração a força de massa da haste localizada acima do ponto considerado, ou seja, do ponto de instrumentação. Este fato é extremamente importante, pois na prática de instrumentação é usual zerar a leitura inicial da célula de carga imediatamente antes do início do ensaio. O procedimento de zerar a leitura inicial da célula de carga faz com que um erro seja introduzido nos cálculos de energia utilizando a equação 6.8. Este procedimento de zerar a célula de carga, ou considerar a leitura inicial como sendo o zero pode ser efetuada eletronicamente no próprio circuito condicionador e amplificador do sinal ou posteriormente através de procedimentos numéricos, ambos procedimentos muitas vezes alheios à vontade do operador em se tratando de equipamentos fechados.

CAPÍTULO 7

ANÁLISE EXPERIMENTAL

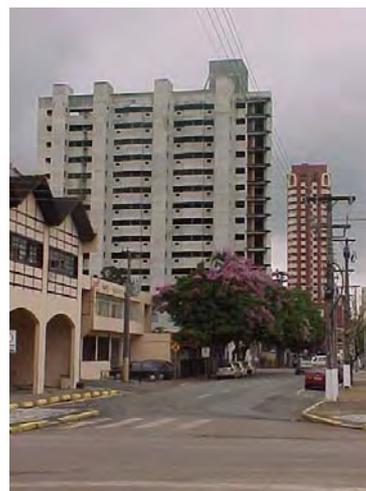
7.1 - INTRODUÇÃO

Para permitir o perfeito entendimento da cravação do amostrador no solo, avaliar a energia efetivamente transferida, a composição de hastes e comprovar experimentalmente algumas conclusões descritas no capítulo anterior foi programada uma campanha de ensaios de campo. Nesta campanha procurou-se minimizar ao máximo as variáveis que poderiam interferir no ensaio. Para tanto foi projetada uma bateria de ensaios utilizando-se quatro comprimentos de haste distintos mantendo-se constantes o equipamento, a equipe, a cabeça de bater, o martelo, o cabo de içar o martelo, o amostrador e o solo.

A campanha foi efetuada em dois prédios em construção, na cidade de Joinville. O primeiro prédio Foto 7.1 A, onde foram executados os ensaios com comprimentos de hastes de 5,80, 11,80 e 18,80 metros possuía 7 andares mais o térreo. Neste prédio foi utilizado o poço do elevador para montar o sistema. No segundo prédio, Foto 7.1 B, que possuía 15 andares, mais o térreo e um sub-solo, foi montada a composição com 35,80 metros. Nesse prédio foi utilizada uma abertura destinada à coluna de água dos banheiros.



A



B

Foto – 7.1 – Prédios utilizados na campanha experimental.

7.2 - METODOLOGIA

7.2.1 – Montagem do equipamento

O equipamento de sondagem foi montado conforme o esquema indicado na Figura 7.1. Com este sistema foi possível a execução de ensaios onde somente o comprimento da composição da haste sofria mudanças.

A haste foi instalada dentro do tubo de revestimento normalmente utilizado em sondagem. Este procedimento tornou o ensaio o mais próximo do real. Na parte central da haste, onde era instalada a célula de carga, foi deixado um pequeno espaço sem revestimento.

Para cada comprimento de haste, com exceção do de 5,80 metros, foram adquiridos sinais junto à cabeça de bater, junto ao amostrador e no centro da composição. As Figuras 7.2, 7.3, 7.4 e 7.5 mostram os comprimentos de hastes, posição das luvas e posição da instrumentação para os comprimentos de haste de 5,80; 11,80; 18,80 e 35,80 metros respectivamente. Esses comprimentos são referente às hastes, célula de carga e um elemento de meio metro de haste utilizado para afastar a zona instrumentada da cabeça de bater. Não está computado nessas dimensões o comprimento do amostrador. Ressalta-se que sempre o comprimento do amostrador foi levado em conta quando das análises teóricas e experimentais. Portanto, ao comprimento acima deve ser acrescido o comprimento total do amostrador que é de 80,0 centímetros. Para a composição de 5,80 metros foram adquiridos somente sinais junto à cabeça de bater e junto ao amostrador.

7.2.2 - Equipamento

O tripé utilizado possui uma articulação em meia altura, o que permitiu a utilização somente da sua parte superior. Esta facilidade possibilitou a montagem da torre em distintos andares, o que proporcionou a execução de ensaios com diferentes comprimentos de hastes em um mesmo prédio. 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.

As luvas e o amostrador do tipo Terzaghi Peck foram adquiridos na empresa Maquesonda Máquinas e Equipamentos de Sondagem Ltda. As dimensões do amostrador são de 15,7 centímetros, 56 centímetros e 7,6 centímetros para a cabeça, corpo e sapata respectivamente. As hastes foram confeccionadas, com comprimentos exatos de 2 e 3 metros, a partir de tubo

schedule 80 sem costura. O martelo utilizado era do tipo pino guia e de forma prismática conforme da figura 4a da NBR 6484 de 2001 e dispunha de um coxim de madeira duro em um estado semi-novo. O pino guia estava bem fixo ao martelo. A cabeça de bater, de forma cilíndrica, possuía uma altura de 8,3 centímetros, diâmetro de 9,0 centímetros, um orifício de 2,5 centímetros para a passagem do pino guia do martelo e uma massa de 3,720 kg estando, portanto, em conformidade com o item 5.2.8 da NBR 6484. A cabeça de bater foi usinada com uma pequena curvatura na sua parte superior a fim de proporcionar golpes os mais concêntricos possíveis.

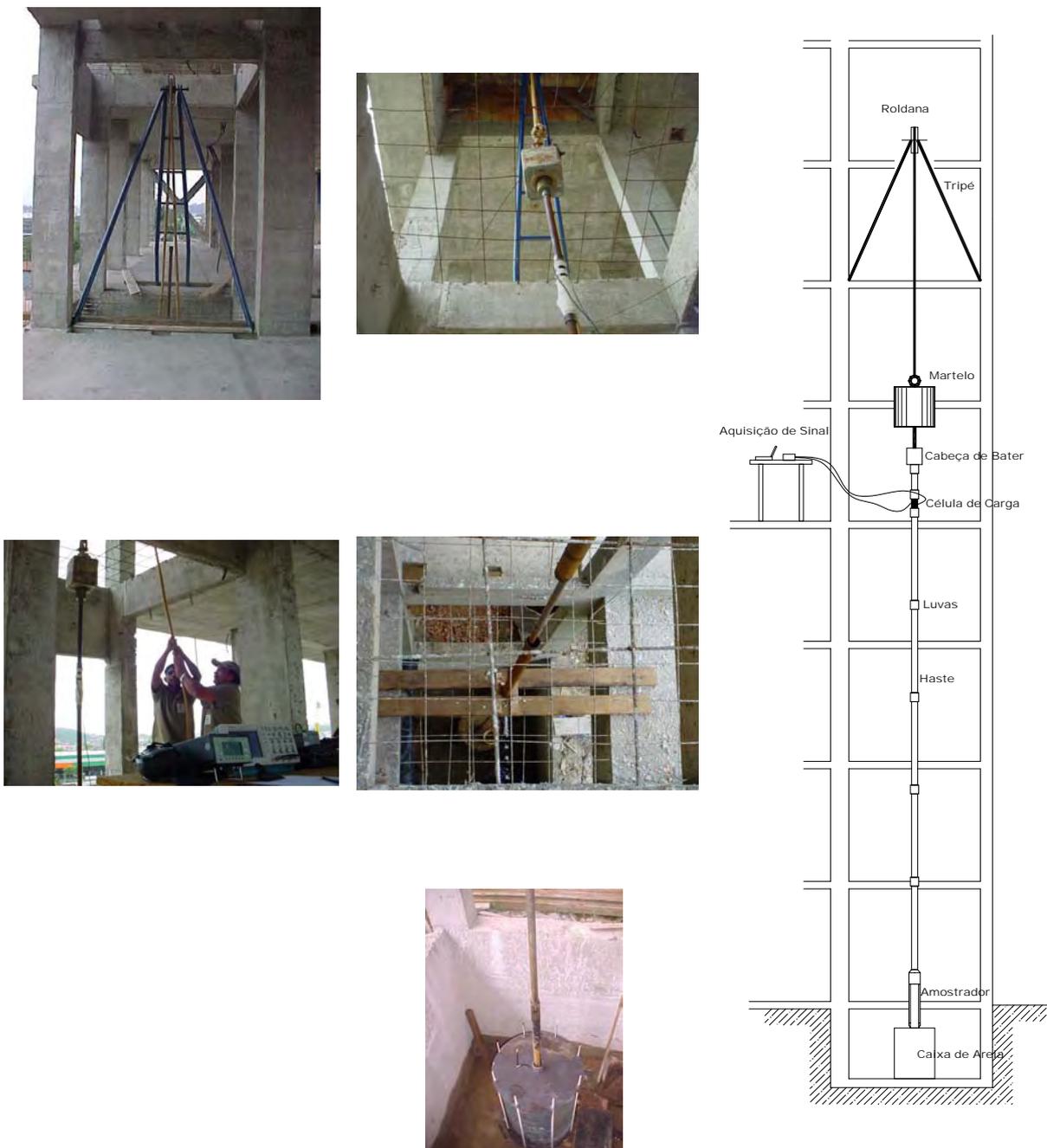


Figura 7.1 – Esquema de montagem dos ensaios.



Figura 7.2 – Composição de haste utilizada nos ensaios com haste de 5,80metros.

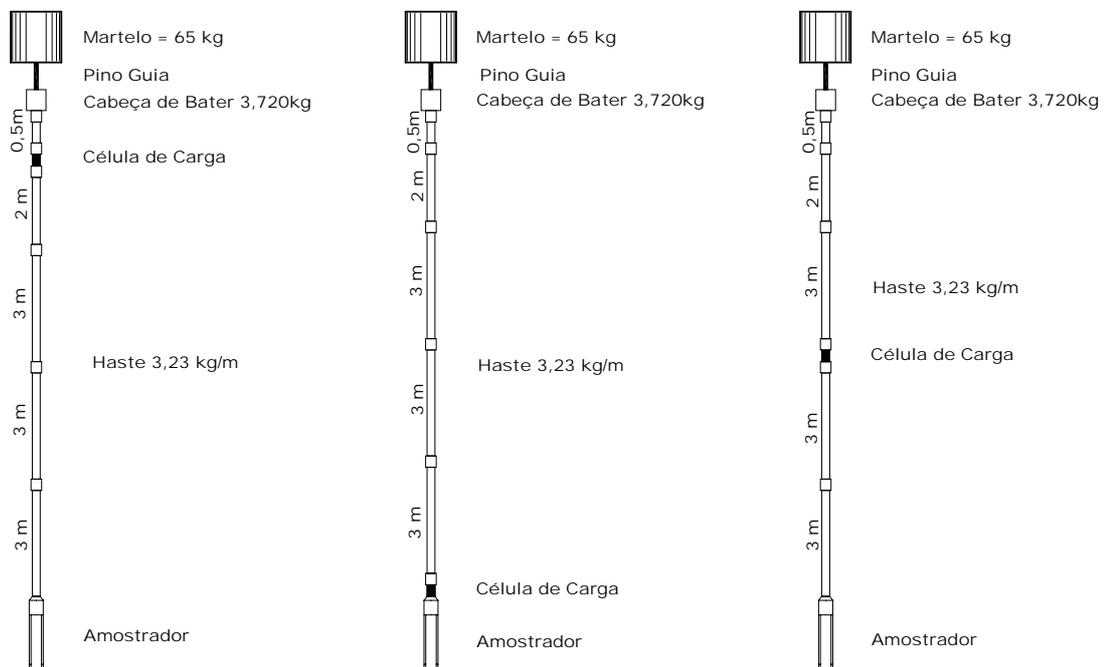


Figura 7.3 - Composição de haste utilizada nos ensaios com haste de 11,80 metros.

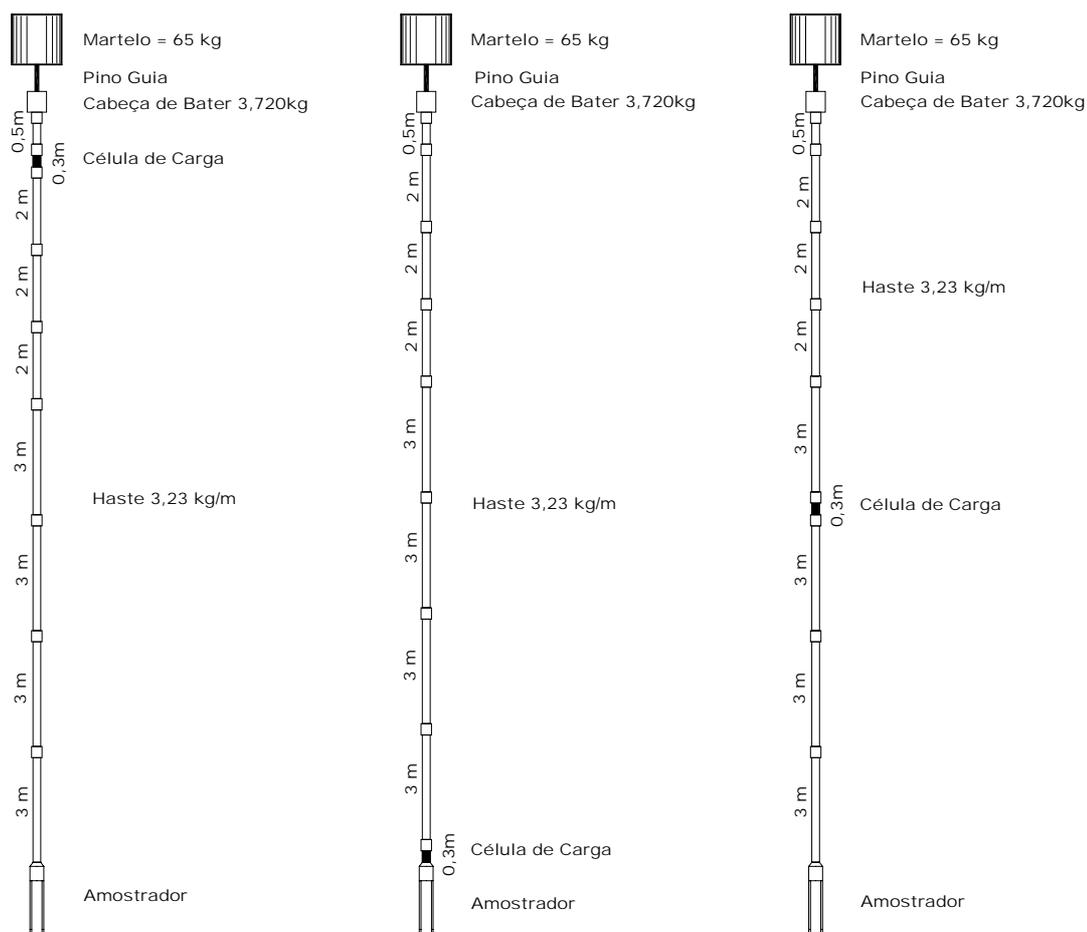


Figura 7.4 - Composição de haste utilizada nos ensaios com haste de 18,80 metros.

7.2.3 - Solo

Em ambos os prédios o amostrador foi cravado em areia disposta em um tambor de 200 litros. A areia era lançada em camadas e cuidadosamente compactada, a sua umidade avaliada e o volume determinado. Ensaio de determinação do índice de vazios máximo foi efetuado seguindo o método B da NBR 12004 e o mínimo também utilizando o método B da NBR 12051. A densidade relativa ao longo de todos os ensaios foi mantida praticamente constante (nas diversas montagens foi de aproximadamente 70% ($\pm 5\%$)) seguindo-se sempre o procedimento acima.

No início da campanha verificou-se que com um pequeno número de golpes o amostrador era totalmente cravado, tornando-se extremamente trabalhoso o processo devido ao elevado

número de vezes que seria necessário o enchimento do tambor com a areia nas condições acima citadas. Este baixo número de golpes é devido à tensão confinante muito pequena. Para permitir um aumento da tensão confinante foi montado, com o auxílio de câmaras de ar, um sistema de aplicação de tensão. Este procedimento permitiu que fosse aplicada na parte superior da areia uma tensão de 277 kPa, o que corresponde a uma pressão de 33 psi na câmara de ar. Entretanto a resposta no aumento da cravação do amostrador não foi proporcional ao esperado, provavelmente decorrente da não rigidez do tambor ou pelas características do sistema montado que não induziu um aumento proporcional na tensão horizontal que efetivamente viesse a colaborar com o aumento da cravação do amostrador. Adicionalmente o amostrador foi sempre mantido embuchado de areia para permitir um maior número de golpes por cravação.

As fotos 7.2 A, B, C, D, E e F apresentam todo o processo de montagem da câmara de areia na qual foi cravado o amostrador. A foto 7.2 A apresenta o término da compactação da areia; a foto 7.2 B a colocação da placa sobre a qual serão colocadas as câmaras de ar; a foto 7.2 C a instalação das câmaras de ar; foto 7.2 D fechamento da câmara; foto 7.2 E aplicação de ar comprimido e finalmente o sistema pronto para início dos ensaios.

Em momento nenhum foi objetivo do trabalho obter parâmetros de correlação da areia ensaiada com o valor do N_{spt} . Este estudo também não seria possível com o tambor utilizado, pois deveria ter um diâmetro maior do que os 60 centímetros adotados, para que as paredes não produzissem interferências nos resultados.

7.2.4 – Ensaios

Para cada composição foram adquiridos sinais de força e aceleração com a utilização do equipamento descrito no capítulo 4. Durante cada golpe foi registrado com o auxílio de uma régua centimétrica a penetração permanente de cada golpe. Este dado foi utilizado para verificar a segunda integração do sinal de aceleração e validar os registros adquiridos.



A



B



C



D



E



F

Foto 7.2 – Seqüência de montagem da câmara de areia.

7.3 – RESULTADOS

7.3.1 – Sinais de Força e de Velocidade

A seguir são apresentados resultados típicos de sinais adquiridos com a instrumentação desenvolvida. Para cada comprimento de haste são apresentados os sinais com a instrumentação posicionada junto à cabeça de bater, com a instrumentação posicionada no centro da composição da haste e com a instrumentação posicionada junto ao amostrador. Para cada sinal são apresentados separadamente três gráficos sendo o primeiro de força ao longo do tempo cujo sinal é o obtido junto à célula de carga e os sinais de $F=VZ_h$ obtidos através da integração do sinal do acelerômetro 1 e acelerômetro 2, o segundo de penetração ao longo do tempo e o terceiro a variação da energia obtida pela equação 3.85. Em cada figura foi utilizada a cor azul para representar a resposta do acelerômetro 1 e a cor vermelha para representar a resposta do acelerômetro 2. O valor da penetração permanente registrado no campo, com auxílio de uma trena, é apresentado.

Os sinais correspondentes à haste de 5,8m com a instrumentação posicionada junto à cabeça de bater e junto ao amostrador são apresentados nas figuras 7.6 e 7.7. Observa-se que no caso particular da haste de 5,8m não foram efetuados os ensaios com a instrumentação posicionada no centro da haste. Os sinais correspondentes à haste de 11,8m, para as três posições da instrumentação, a saber: junto à cabeça de bater, centro da haste e junto ao amostrador estão apresentadas nas figuras 7.8, 7.9 e 7.10 respectivamente. De igual forma, para a haste de 18,8m, os sinais estão apresentados nas figuras 7.11, 7.12 e 7.13. Para o último comprimento de haste ensaiado, o de 35,8m, os sinais estão apresentados nas figuras 7.14 a 7.16.

No item 7.4, onde é efetuada a análise dos resultados, são apresentadas as tabelas 7.1 e 7.2 que contêm os valores das energias obtidas para diversos golpes e para os distintos comprimentos de hastes ensaiadas. Nesta tabela apresenta-se a média dos valores de energia e o desvio padrão correspondente. Com base nestes resultados efetua-se a análise experimental deste capítulo.

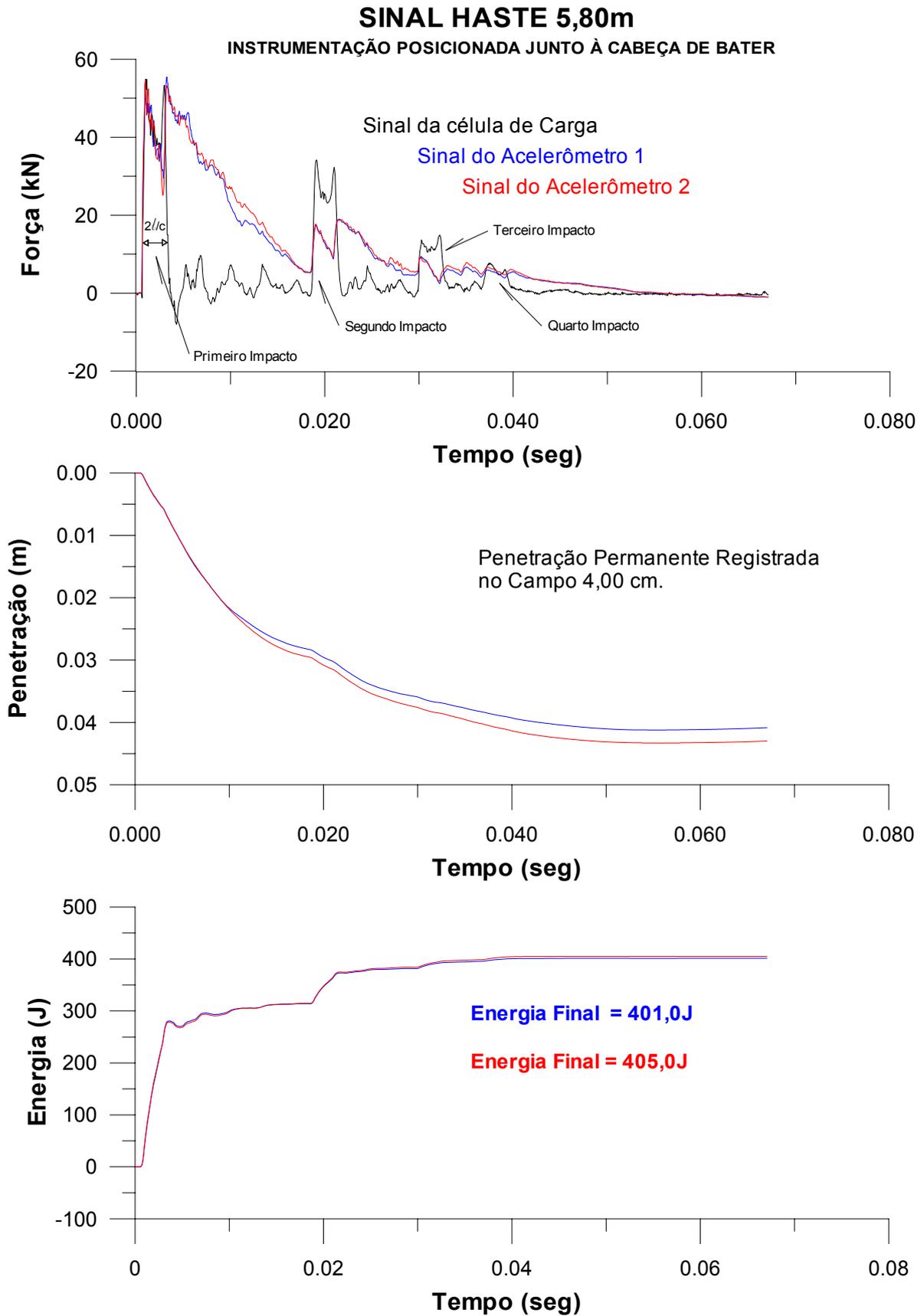


Figura 7.6 – Sinais com instrumentação instalada junto à cabeça de bater. – Haste 5,8m.

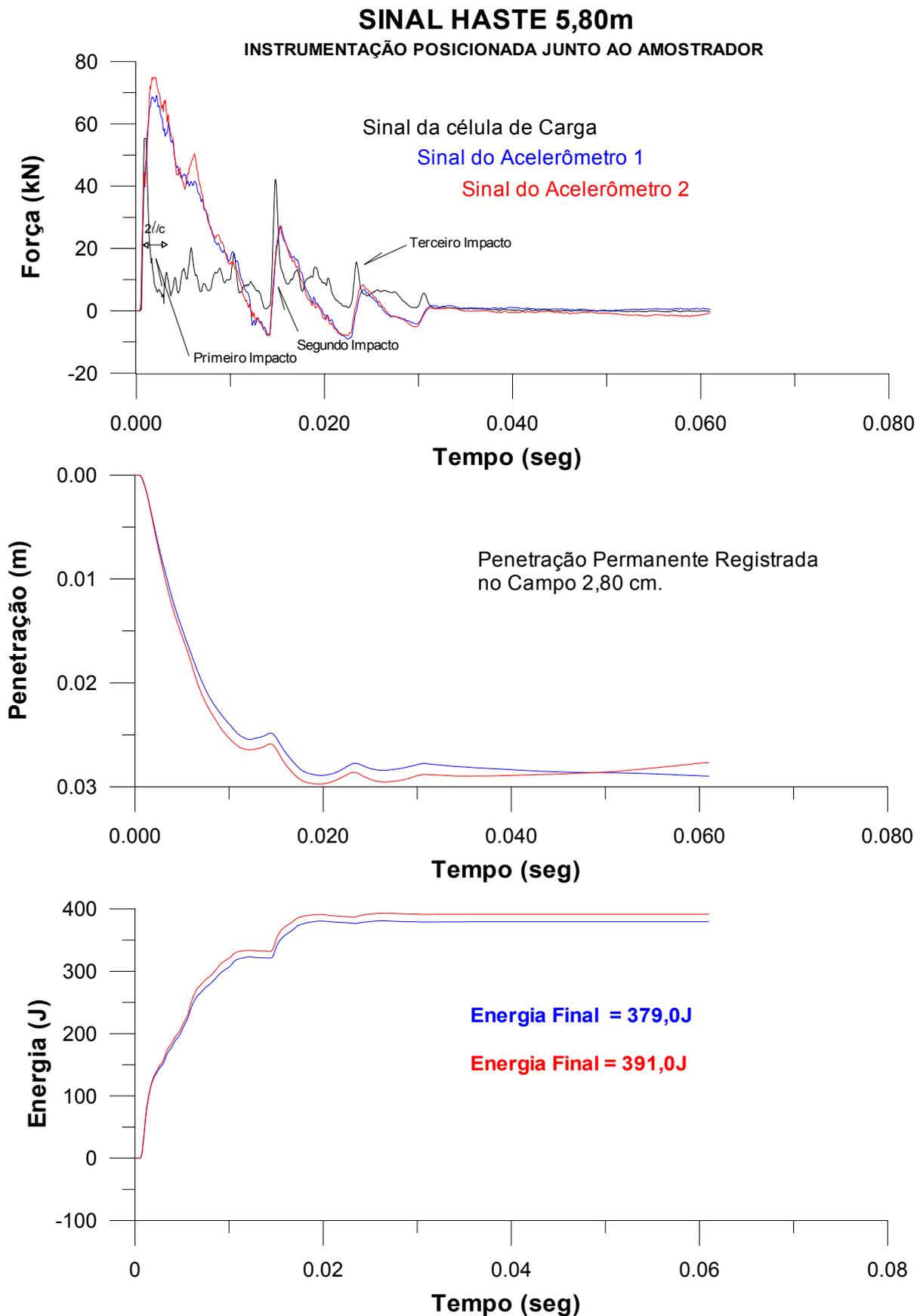


Figura 7.7 – Sinais com instrumentação instalada junto ao amostrador. – Haste 5,8m.

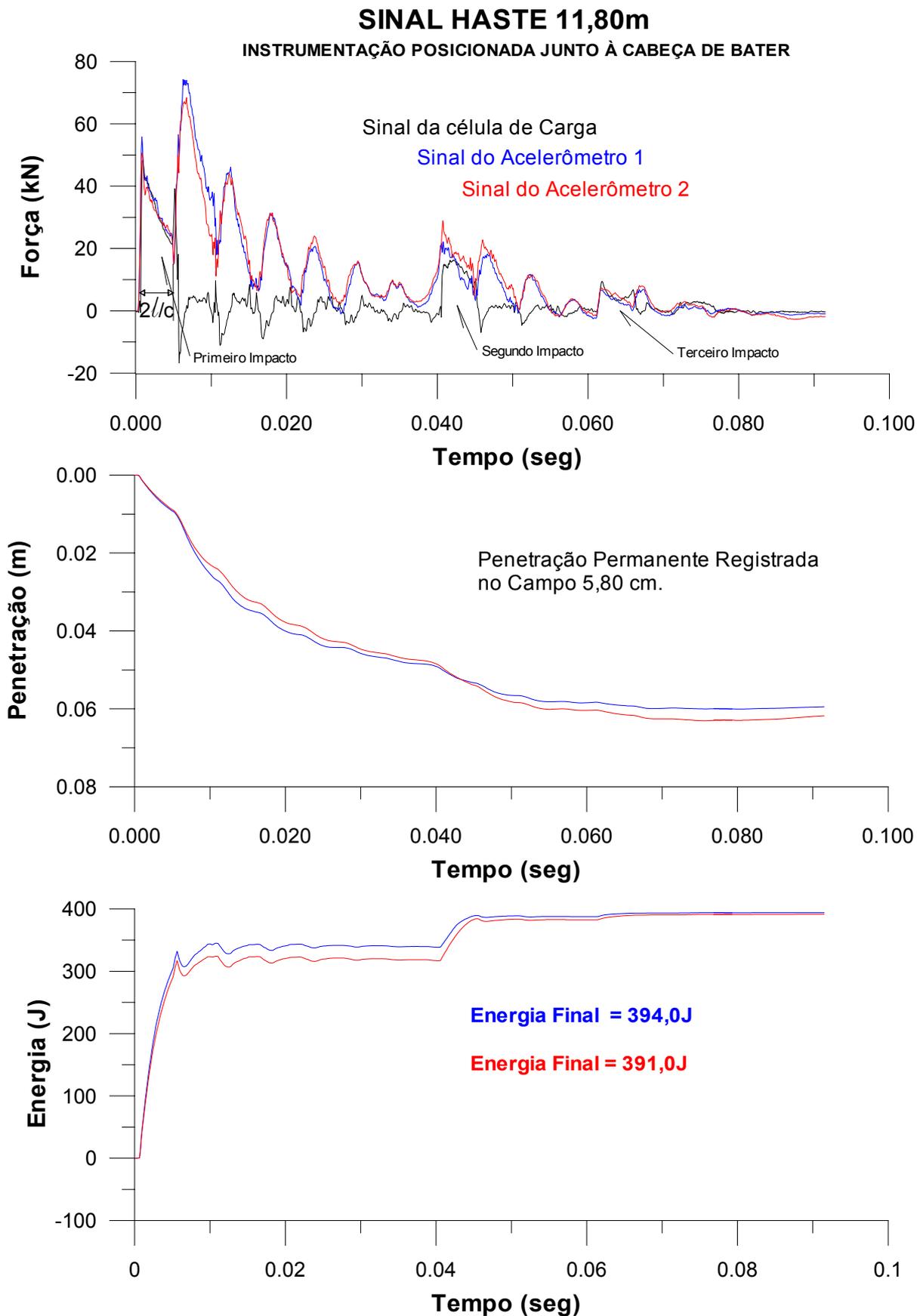


Figura 7.8 – Sinais com instrumentação instalada junto à cabeça de bater. – Haste 11,8m.

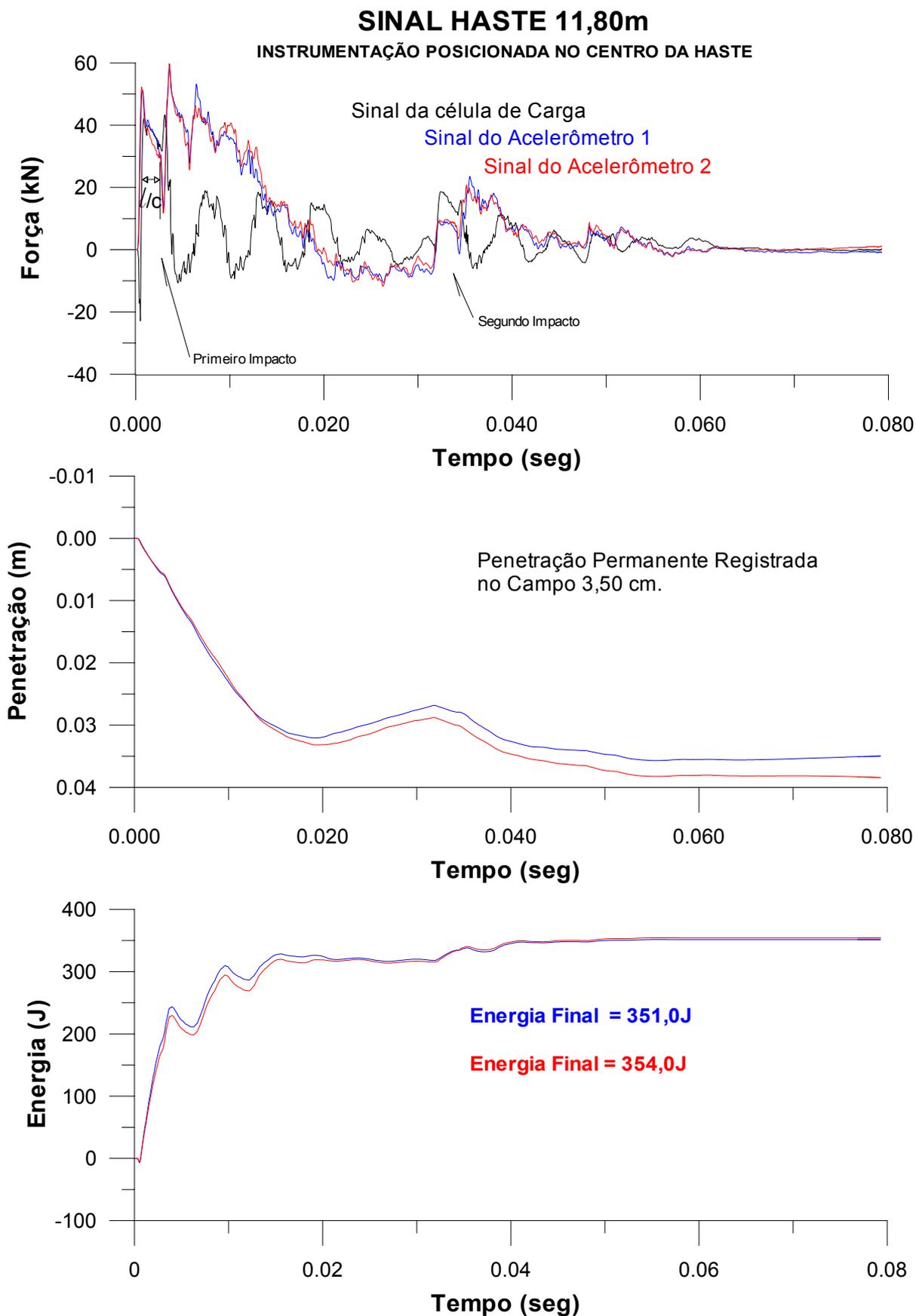


Figura 7.9 – Sinais com instrumentação instalada no centro da haste. – Haste 11,8m.

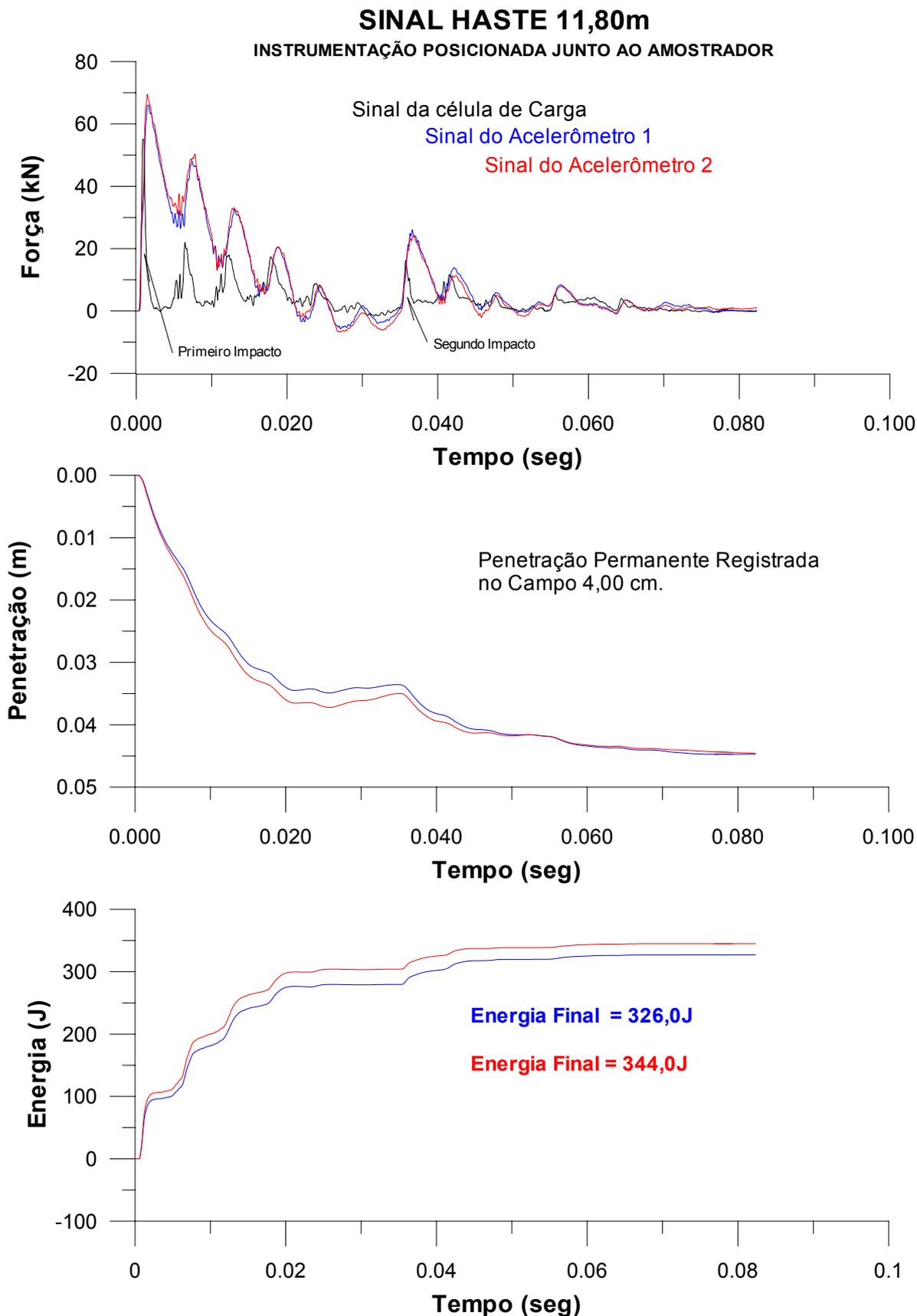


Figura 7.10 – Sinais com instrumentação instalada junto ao amostrador. – Haste 11,8m.

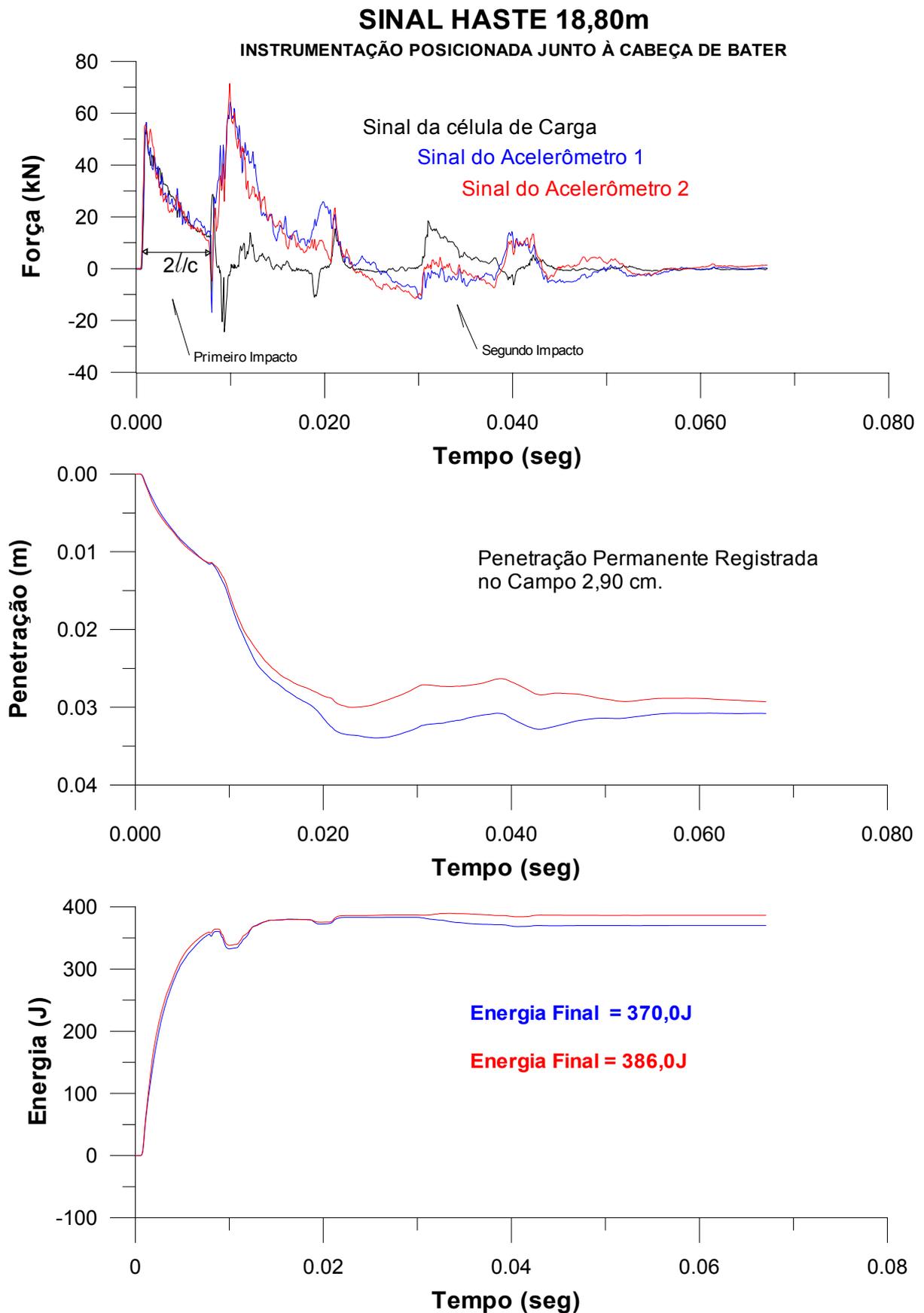


Figura 7.11 – Sinais com instrumentação instalada junto à cabeça de bater. – Haste 18,8m.

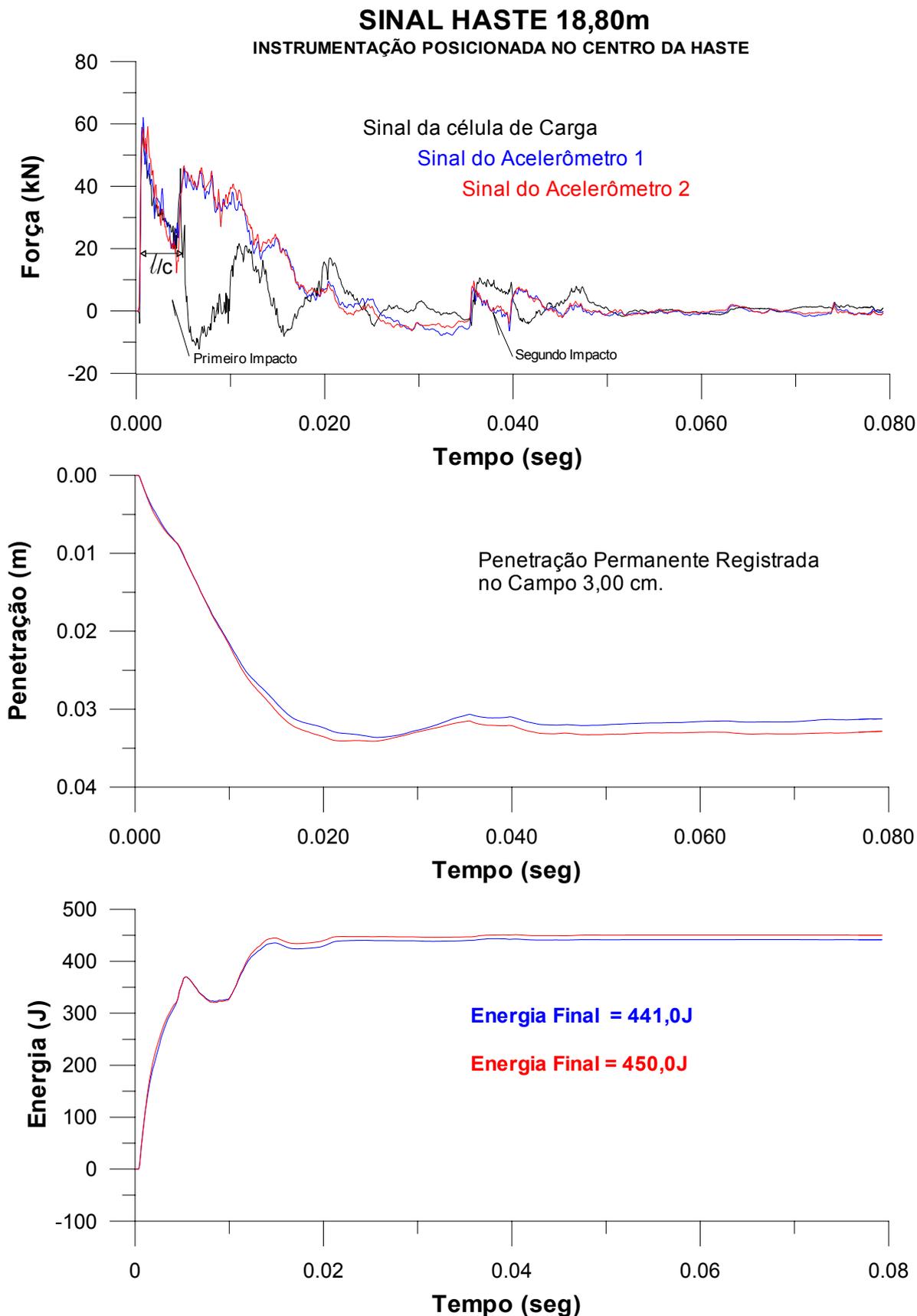


Figura 7.12 – Sinais com instrumentação instalada no centro da haste. – Haste 18,8m.

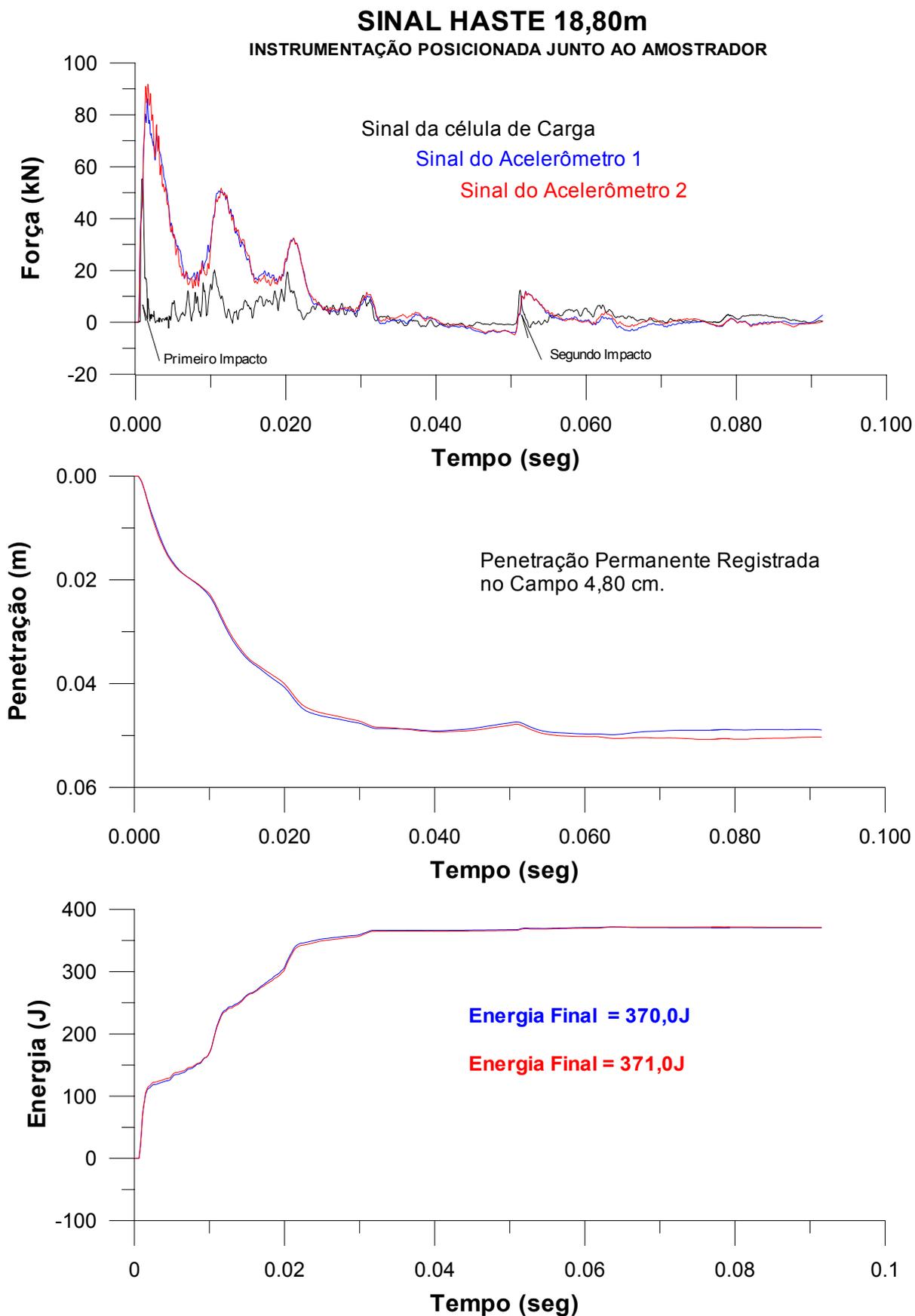


Figura 7.13 – Sinais com instrumentação instalada junto ao amostrador. – Haste 18,8m.

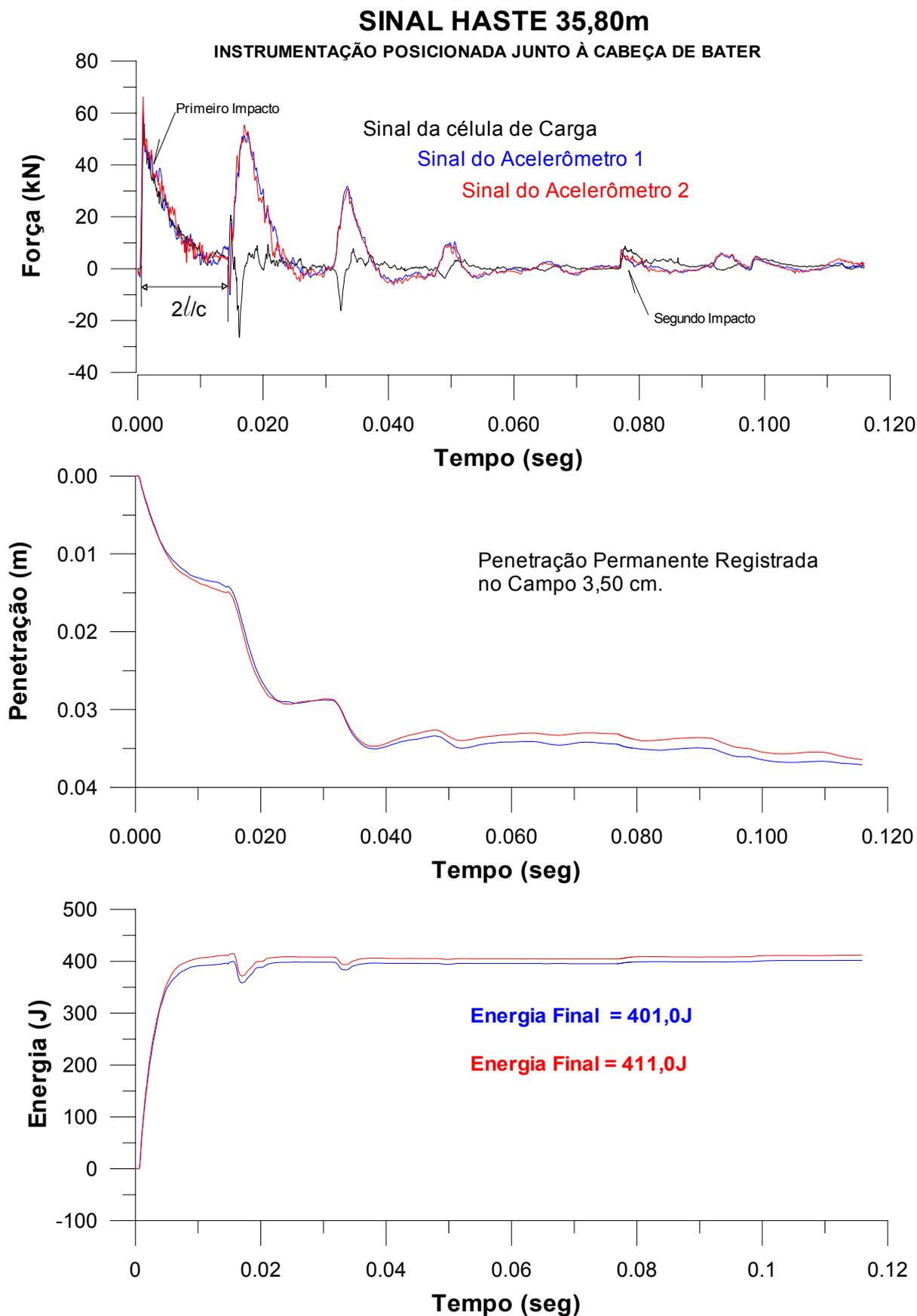


Figura 7.14 – Sinais com instrumentação instalada junto à cabeça de bater. – Haste 35,8m.

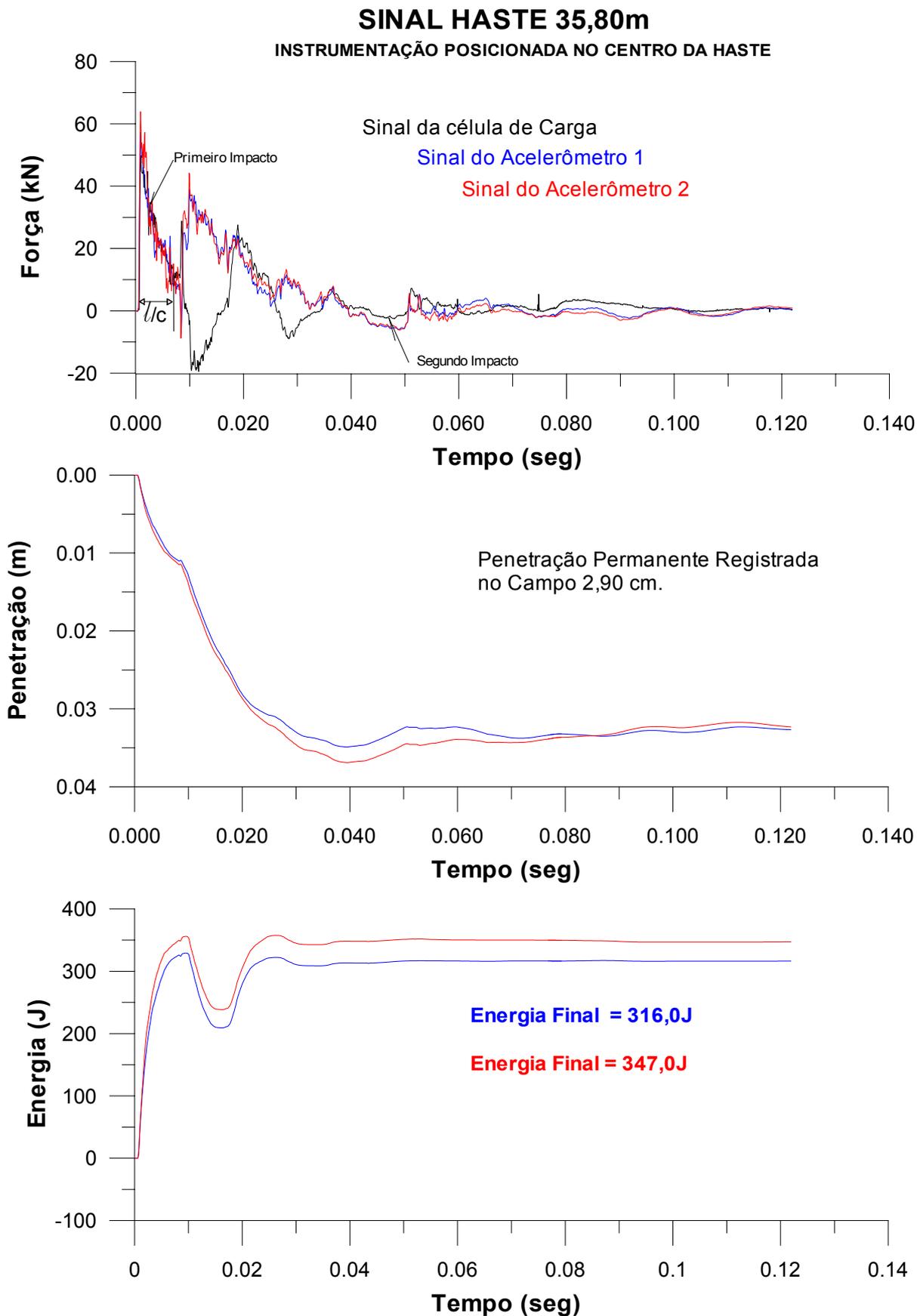


Figura 7.15 – Sinais com instrumentação instalada no centro da haste. – Haste 35,8m.

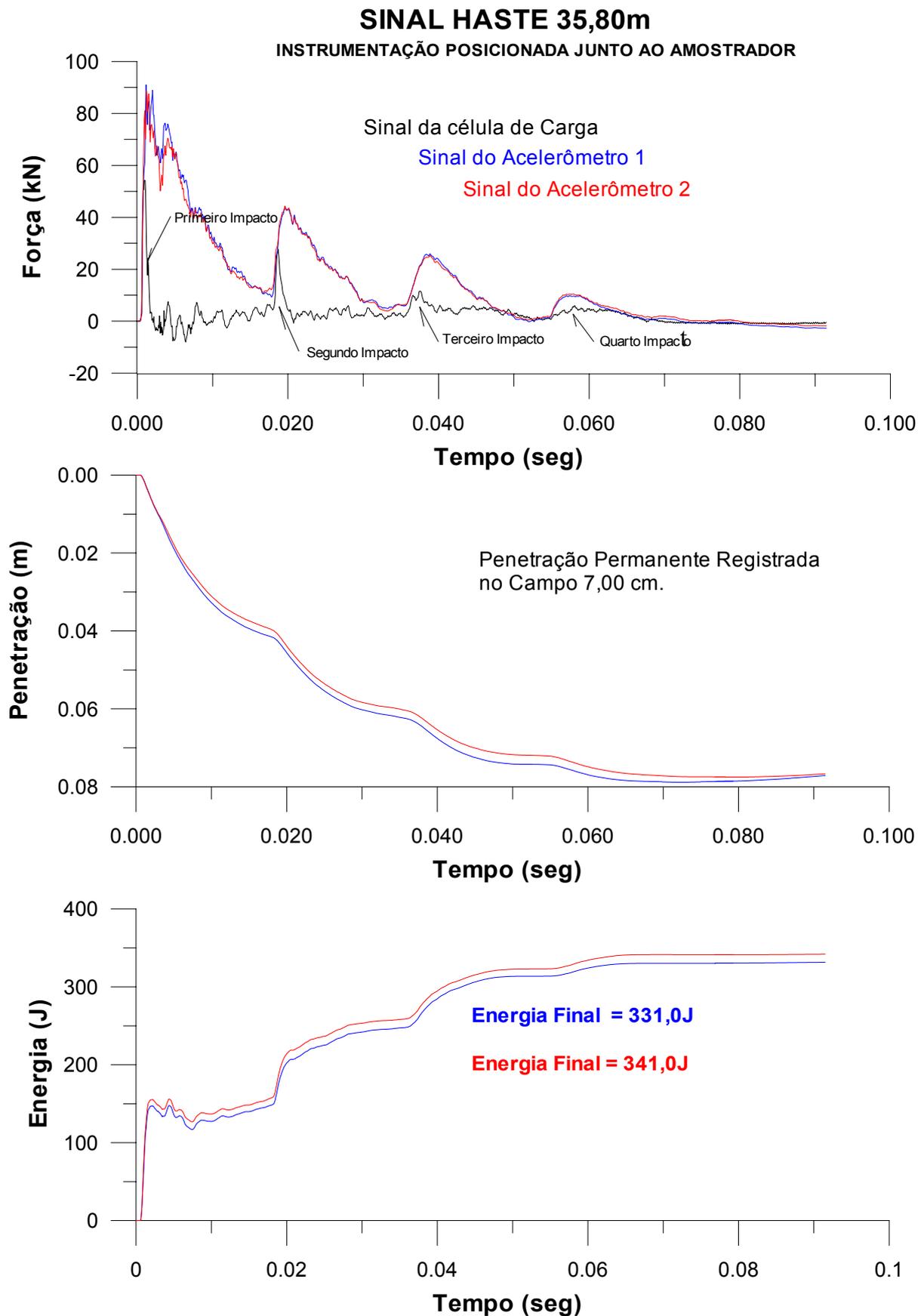


Figura 7.16 – Sinais com instrumentação instalada junto ao amostrador. – Haste 35,8m.

7.4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.4.1 – Instrumentação Posicionada junto à cabeça de bater

Para cada sinal adquirido com o sistema desenvolvido e apresentado no Capítulo 4 e para os diferentes comprimentos de hastes utilizadas e descritas no início deste capítulo, determinou-se a energia da onda de compressão pela integração do sinal de força versus aceleração ao longo do tempo, equação 3.85. O resumo dos resultados para a situação em que a célula de carga está instalada junto à cabeça de bater está apresentado na Tabela 7.1. Nesta tabela está apresentado da esquerda para a direita o nome dado ao sinal, o comprimento da haste, a penetração permanente obtida pela dupla integração do sinal de cada acelerômetro, a média da penetração, a energia calculada pela integração do sinal de força com a resposta de acelerômetro 1 e com o acelerômetro 2, a respectiva média das energias, a energia obtida pela primeira parcela da equação 7.1, denominada **energia do martelo** ou parcela de energia referente ao martelo $[(0,75 + \Delta\rho)M_m g]$, a energia calculada pela segunda parcela da equação 7.1, denominada **energia da haste**, ou parcela referente à haste $[\Delta\rho M_h g]$, e finalmente a variação da **energia do sistema** equação 7.1 obtida pela soma da parcela referente ao martelo e a referente a haste.

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = (0,75 + \Delta\rho)M_m g + \Delta\rho M_h g \quad (7.1)$$

Com base na Tabela 7.1 elaboraram-se as Figuras 7.17 a 7.20, onde para cada comprimento de haste ensaiada é plotada a energia contida na onda longitudinal (equação 3.85) dos diversos sinais, a correspondente energia do sistema (equação 7.1) e a parcela referente à energia do martelo versus a penetração permanente observada. Para cada conjunto de pontos citado traçou-se a linha de tendência dos pontos.

Pela análise do gráfico da Figura 7.17 é possível perceber que existe uma relação entre a energia da onda obtida pela integração do sinal de força e velocidade ao longo do tempo com a energia do sistema ou com a energia do martelo. Para hastes curtas, as energias do sistema e a parcela referente ao martelo quase que se sobrepõem devido à pequena parcela de energia referente à haste, decorrente do pequeno comprimento. A variação dos golpes é decorrente da posição do amostrador dentro do tanque de areia. No início da penetração a resistência à penetração é dada pela resistência de ponta do amostrador. No decorrer da cravação soma-se à

resistência de ponta o atrito lateral e, como decorrência, observa-se uma ligeira redução na magnitude da penetração ao longo da cravação do amostrador na câmara. Este processo também é observado no campo, incluindo-se os efeitos de embuchamento durante a penetração.

Tabela 7.1 – Resumo dos resultados da instrumentação posicionada junto à cabeça de bater.

Sinal	Comprimento da Haste (h) (m)	Penetração (m)			$E = \int_{t=0}^{t=\infty} FVdt$ (J)			$E_1 = (0,75 + \Delta p)65g$ (J)	$E_2 = \Delta pg3,23hc$ (J)	$E = E_1 + E_2$ (J)
		Acele. 1	Acele. 2	Média	Acele. 1	Acele. 2	Média			
S0105	5,80	0,039	0,041	0,040	385,0	382,0	383,5	503,6	8,3	512,0
S0205		0,032	0,032	0,032	409,0	394,0	401,5	498,6	6,7	505,3
S0305		0,035	0,032	0,034	432,0	419,0	425,5	499,6	7,0	506,6
S0405		0,023	0,025	0,024	393,0	403,0	398,0	493,5	5,0	498,6
S0505		0,027	0,029	0,028	395,0	407,0	401,0	496,1	5,9	501,9
S0605		0,037	0,037	0,037	391,0	400,0	395,5	501,8	7,7	509,5
S0805		0,028	0,026	0,027	378,0	379,0	378,5	495,5	5,6	501,1
S0905		0,023	0,022	0,023	361,0	357,0	359,0	492,6	4,7	497,3
Média das Energias - Haste 5,80m							392,8			
Desvio Padrão das Energias - Haste 5,80m							19,6			
S4011	11,80	0,024	0,026	0,025	370,0	391,0	380,5	494,1	10,0	504,1
S5011		0,048	0,049	0,048	413,0	414,0	413,5	509,1	19,3	528,5
S5111		0,037	0,044	0,041	369,0	430,0	399,5	504,1	16,2	520,2
S5211		0,038	0,040	0,039	388,0	423,0	405,5	503,1	15,6	518,7
S5311		0,030	0,029	0,030	348,0	354,0	351,0	497,0	11,8	508,8
S5511		0,059	0,060	0,060	394,0	391,0	392,5	516,3	23,8	540,1
S5611		0,026	0,028	0,027	334,0	349,9	342,0	495,5	10,8	506,2
S5711		0,027	0,027	0,027	371,0	352,0	361,5	495,4	10,7	506,1
S6011		0,047	0,047	0,047	386,0	377,0	381,5	508,2	18,8	527,0
S6111		0,031	0,033	0,032	370,0	368,0	369,0	498,6	12,8	511,4
S6211		0,027	0,029	0,028	340,0	360,0	350,0	496,1	11,2	507,2
S6311		0,026	0,027	0,027	391,0	389,0	390,0	495,1	10,6	505,7
Média das Energias - Haste 11,80m							378,0			
Desvio Padrão das Energias - Haste 11,80m							23,4			
S0118	18,80	0,018	0,018	0,018	364,0	381,0	372,5	489,7	10,6	500,3
S0518		0,085	0,085	0,085	418,0	418,0	418,0	532,4	50,1	582,5
S0618		0,059	0,062	0,060	381,0	358,0	369,5	516,7	35,6	552,3
S0718		0,039	0,038	0,039	374,0	354,0	364,0	502,8	22,7	525,5
S0818		0,030	0,029	0,030	370,0	386,0	378,0	497,0	17,4	514,4
S0918		0,019	0,021	0,020	381,0	385,0	383,0	491,0	11,8	502,8
S1018		0,019	0,019	0,019	372,0	372,0	372,0	490,4	11,2	501,6
S1118		0,020	0,021	0,021	371,0	399,0	385,0	491,3	12,1	503,4
S1218		0,015	0,015	0,015	363,0	326,0	344,5	487,8	8,8	496,6
SA818		0,027	0,026	0,027	389,0	386,0	387,5	495,1	15,6	510,8
Média das Energias - Haste 18,80m							377,4			
Desvio Padrão das Energias - Haste 18,80m							18,9			
S0534	35,80	0,037	0,036	0,036	415,0	437,0	426,0	501,5	39,3	540,7
S0634		0,100	0,100	0,100	425,0	436,0	430,5	542,0	107,7	649,7
S0734		0,064	0,066	0,065	415,0	385,0	400,0	519,7	70,0	589,7
S0834		0,040	0,040	0,040	374,8	386,5	380,7	503,7	43,1	546,8
S0934		0,037	0,036	0,037	401,0	411,0	406,0	501,5	39,3	540,8
S1034		0,033	0,034	0,034	397,0	374,0	385,5	499,6	36,1	535,7
S1134		0,029	0,031	0,030	360,0	364,0	362,0	497,4	32,3	529,7
S1234		0,024	0,029	0,027	426,0	388,0	407,0	495,1	28,5	523,7
S2034		0,078	0,075	0,077	428,0	393,0	410,5	527,0	82,4	609,4
S2134		0,089	0,085	0,087	415,0	423,0	419,0	533,7	93,7	627,4
Média das Energias - Haste 34,80m							402,7			
Desvio Padrão das Energias - Haste 34,80m							21,4			

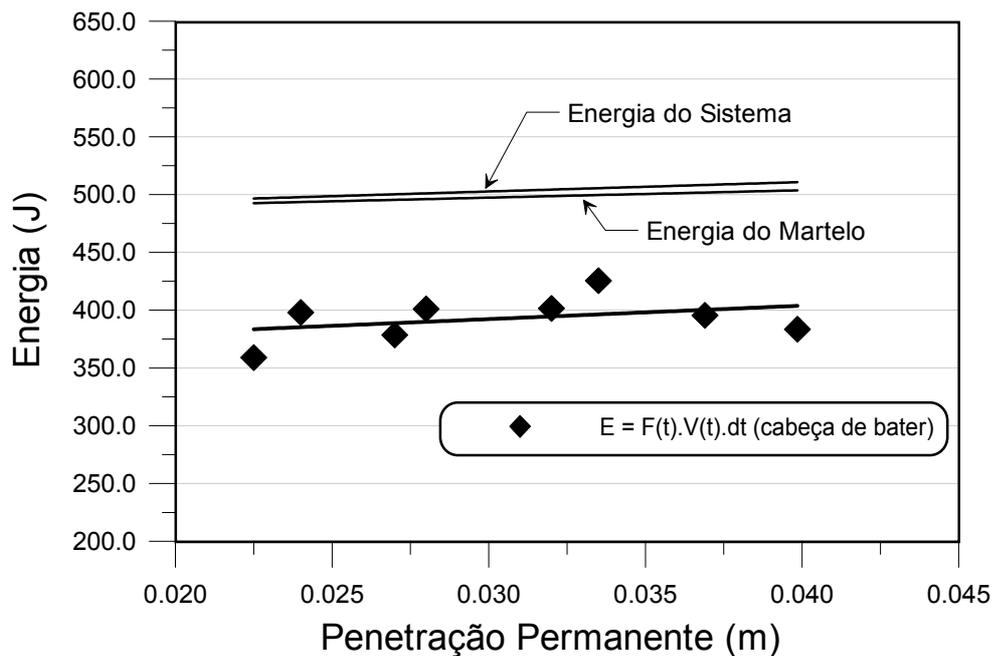


Figura 7.17 – Resultados para haste de 5,8m.

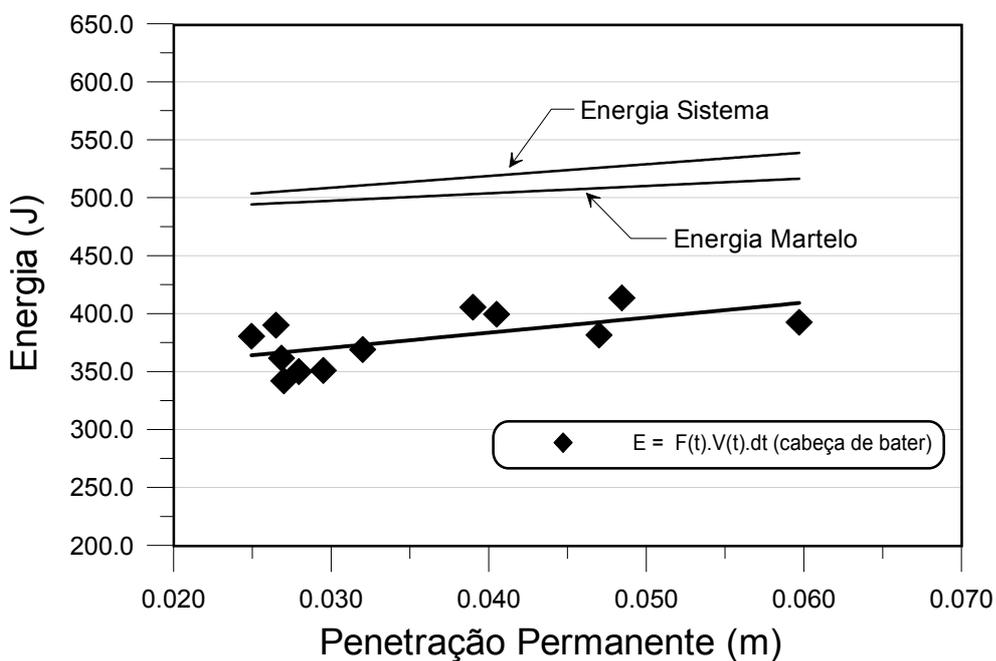


Figura 7.18 – Resultados para haste de 11,8m.

O gráfico da Figura 7.18, de forma análoga, apresenta uma tendência de relação entre as energias obtidas pelas equações 3.85 e 7.1. A reta traçada a partir dos resultados da equação 3.85 possui um coeficiente de regressão linear menos expressivo. Este fato é inerente à própria dispersão de resultados de ensaios SPT que devido à robustez, problemas e

excentricidade, atrito, vibrações, etc., leva a resultados distintos para mesmo comprimento de haste e mesma penetração.

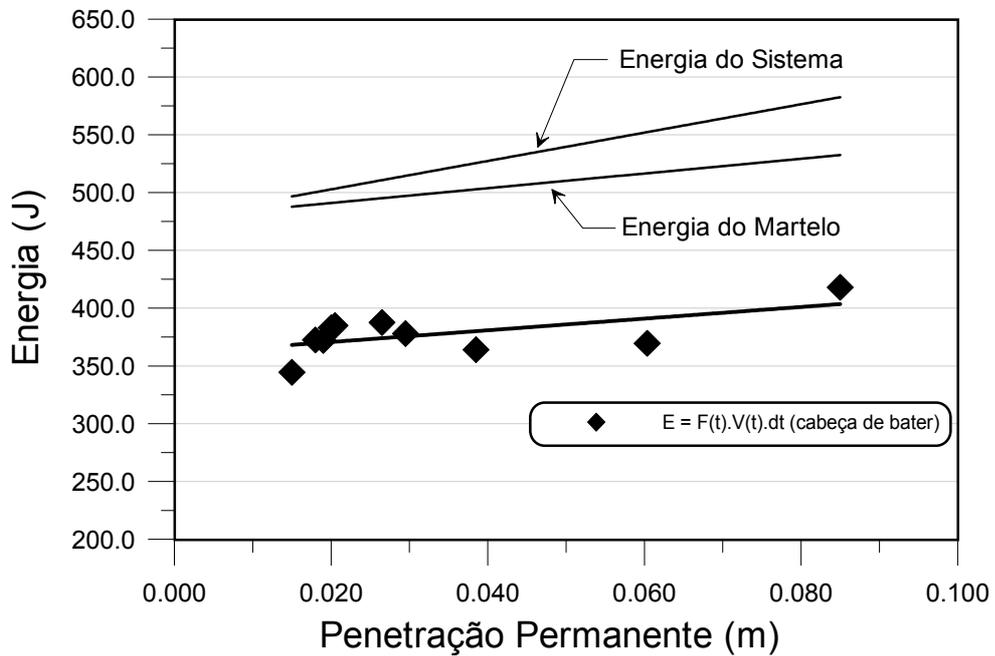


Figura 7.19 – Resultados para haste de 18,8m.

O gráfico da Figura 7.19, que corresponde a uma haste de 18,8m, apresenta uma tendência de relação entre a energia da onda com a energia obtida somente pela primeira parcela da equação 7.1. A linha referente à energia do sistema e a referente ao martelo apresentam uma maior defasagem, demonstrando um aumento da influência do comprimento da haste. Este gráfico mostra um paralelismo entre as linhas da energia da onda e a parcela referente ao martelo. Este fato apresenta uma forte indicação que há uma relação entre a energia da onda medida na cabeça de bater e a energia do martelo. Esta relação sugere que a equação 7.1 possa ser reescrita como segue:

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = \eta_1(0,75 + \Delta\rho)M_m g + \Delta\rho M_h g \tag{7.2}$$

onde: $\eta_1 = \text{eficiência referente à parcela do martelo} = \frac{\int_0^{\infty} F(t).V(t).dt}{(0,75 + \Delta\rho)M_m g}$

No valor de η_1 estão contidas todas as perdas referentes ao atrito no cabo de içar, no martelo com a roldana, perdas no golpe, estado do cabo, tipo de martelo, etc., ou seja todas as perdas referentes ao golpe.

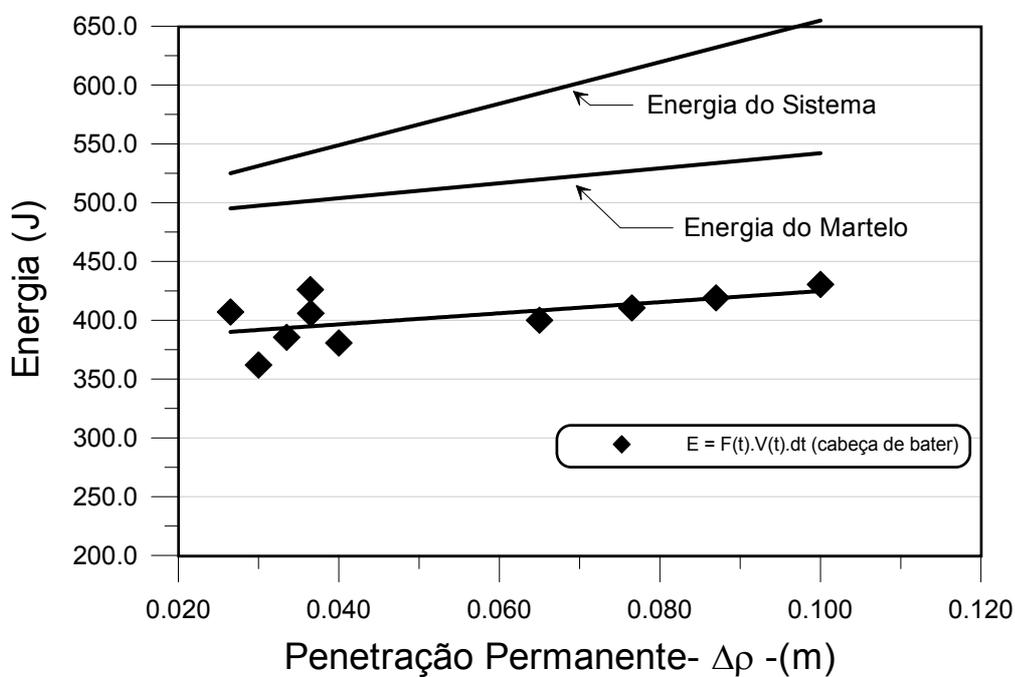


Figura 7.20 – Resultados para haste de 35,8m.

O gráfico da Figura 7.20 confirma a tendência observada na Figura 7.19. Observa-se que para hastes curtas não há uma definição clara entre a energia contida na onda e a parcela de energia referente ao martelo, mas para haste longas pode-se claramente determinar esta tendência.

Este fato vem comprovar experimentalmente que a energia contida na onda longitudinal é dependente do tipo de solo, ou seja, o valor de N_{spt} depende do equipamento, da equipe e do solo, conforme demonstrado numericamente no Capítulo 06.

Para enriquecer o estudo apresenta-se a Figura 7.21 que incorpora todos os sinais da Tabela 7.1. Observa-se claramente nesta tabela que há uma tendência de relação entre a linha correspondente aos pontos da energia contida na onda longitudinal e a parcela referente ao martelo, e que esta relação independe do comprimento da composição.

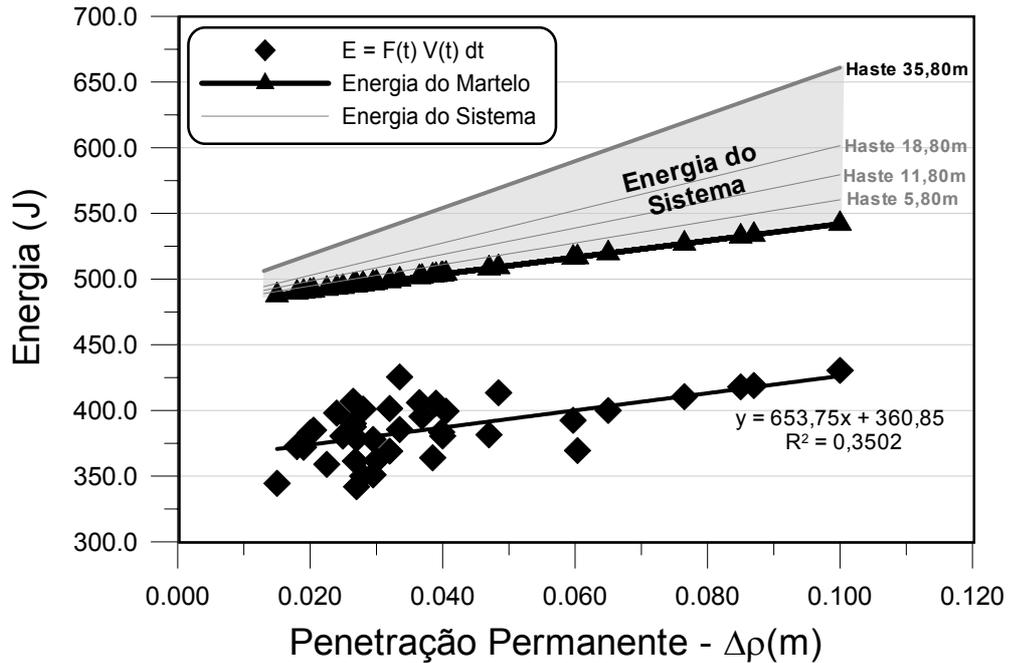


Figura 7.21 – Energia versus penetração.

Com base nas evidências experimentais acima observadas e considerando que existe uma relação linear entre a energia contida na onda longitudinal e a respectiva parcela referente ao martelo pode-se concluir 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_1 pela razão das duas energias. O valor obtido na presente análise é de 0,764 com desvio padrão de 0,036. Deve-se notar que o valor de η_1 não corresponde ao valor de eficiência proposto por Schmertmann & Palacios (1979) na medida em que a presente proposição considera todas as ondas de compressão e portanto um referencial de grandes deformações.

Observa-se que o coeficiente de regressão linear para os valores de energia obtidos é baixo em decorrência das características dos ensaios SPT conforme já apresentado.

A Figura 7.22 apresenta o valor da eficiência η_1 obtido para os dados da tabela 7.1 e apresentados na Figura 7.21 em função do comprimento da haste. Observa-se que o valor de η_1 independe do comprimento da haste.

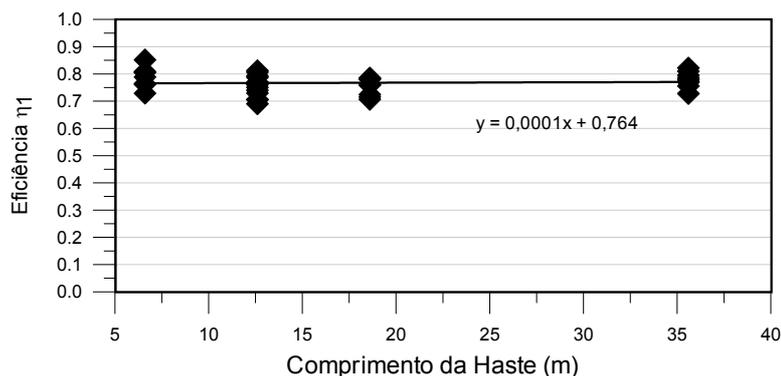


Figura 7.22 – Eficiência η_1 em função do comprimento da haste.

7.4.1.1 – Instrumentação Posicionada Junto a Cabeça de Bater – Re-análise dos Resultados de Cavalcante (2002).

À luz da análise acima descrita pode-se re-analisar os resultados da pesquisa efetuada por Cavalcante (2002). Nesta pesquisa foram utilizados equipamentos e equipes distintas, com características executivas de duas regiões do Brasil (Rio de Janeiro e João Pessoa), em diferentes tipos de depósitos. Estes resultados estão resumidos na Tabela 7.2, onde na primeira coluna é citada a tabela numerada por Cavalcante (2002), a segunda coluna o valor de N_{spt} , seguindo-se do valor da penetração calculado a partir do N_{spt} , o comprimento da haste, a energia da onda longitudinal obtida pela integração dos sinais de força e velocidade ao longo do tempo e as energias referentes ao sistema e a parcela referente ao martelo.

A Figura 7.23 apresenta os resultados de Cavalcante com a mesma representação da Figura 7.21. Este gráfico, entretanto, não contém os resultados para N_{spt} menores e igual a 4 golpes, uma vez que para estes casos os valores de energia medidos por Cavalcante são baixos. Atribui-se no presente trabalho que os baixos valores de energia são decorrente da incompleta integração dos sinais de força e velocidade ao longo do tempo (o sistema SPT ANALYSER utilizado por Cavalcante, por ser um sistema fechado, somente adquire sinais durante 102 ms). Os impactos subsequentes decorrentes do golpe em solos de baixa resistência ($N_{spt} \leq 4$) ocorrem após decorridos um intervalo de tempo maior que 100 ms. Como já foi demonstrado que os golpes subsequentes são representativos na cravação do amostrador e conseqüentemente devem ser computados no cálculo da energia. Em conclusão, considera-se que os valores de energia apresentados por Cavalcante para N_{spt} abaixo de 4 golpes não estão corretos quando se deseja integrar todas as ondas de compressão e portanto não foram considerados.

Tabela 7.2- Dados experimentais de Cavalcante (2002) – instrumentação posicionada junto à cabeça de bater.

Fonte Tabelas Cavalcante (2002)	N_{spt} (Golpes/30cm)	Penetração (m)	Comprimento da Haste (h) (m)	$E = \int_{t=0}^{t=\max} FVdt$ (J)	$E_i = (0,75 + \Delta\rho)65g + \Delta\rho 3,23gh$ (J)	$E_i = (0,75 + \Delta\rho)65g$ (J)
Tabela 6.13	3		12,390	349,7	581,3	542,0
Tabela 6.13	2	0,150	12,390	339,5	632,8	573,9
Tabela 6.13	3	0,100	14,390	339,5	587,6	542,0
Tabela 6.13	18	0,017	15,390	371,7	497,0	488,9
Tabela 6.13	9	0,033	16,390	360,9	516,8	499,5
Tabela 6.13	6	0,050	2,390	350,8	513,9	510,1
Tabela 6.13	24	0,013	3,400	348,6	487,6	486,2
Tabela 6.13	19	0,016	4,390	349,7	490,5	488,3
Tabela 6.13	18	0,017	5,390	346,0	491,7	488,9
Tabela 6.13	12	0,025	6,390	350,5	499,2	494,2
Tabela 6.13	8	0,038	7,380	354,0	510,9	502,1
Tabela 6.13	5	0,060	8,380	393,0	532,4	516,5
Tabela 6.13	4	0,075	9,380	382,2	548,4	526,1
Tabela 6.13	2	0,150	10,390	351,5	623,3	573,9
Tabela 6.13	2	0,150	11,380	356,5	628,0	573,9
Tabela 6.13	3	0,100	12,390	371,0	581,3	542,0
Tabela 6.13	2	0,150	13,390	347,5	637,5	573,9
Tabela 6.13	3	0,100	14,390	323,0	587,6	542,0
Tabela 6.13	23	0,013	15,390	348,2	492,9	486,6
Tabela 6.15	19	0,016	1,340	394,5	489,0	488,3
Tabela 6.15	7	0,043	2,380	366,9	508,8	505,6
Tabela 6.15	3	0,100	4,380	382,0	555,9	542,0
Tabela 6.15	5	0,060	5,400	403,2	526,8	516,5
Tabela 6.15	2	0,150	6,360	397,5	604,1	573,9
Tabela 6.15	3	0,100	11,310	385,7	577,8	542,0
Tabela 6.15	3	0,100	12,310	424,5	581,0	542,0
Tabela 6.17	3	0,100	2,960	379,7	551,4	542,0
Tabela 6.17	4	0,075	3,960	395,5	535,5	526,1
Tabela 6.17	4	0,075	4,980	396,9	537,9	526,1
Tabela 6.17	4	0,075	5,990	368,8	540,3	526,1
Tabela 6.17	4	0,075	6,970	384,2	542,6	526,1
Tabela 6.17	5	0,060	7,980	401,3	531,7	516,5
Tabela 6.17	8	0,038	7,850	395,8	511,5	502,1
Tabela 6.17	10	0,030	8,980	392,9	505,9	497,4
Tabela 6.17	11	0,027	9,980	338,9	504,3	495,6
Tabela 6.7	11	0,027	2,340	401,0	497,7	495,6
Tabela 6.7	11	0,027	4,360	407,0	499,4	495,6
Tabela 6.7	13	0,023	5,330	409,0	496,8	493,0
Tabela 6.7	18	0,017	6,330	368,0	492,2	488,9
Tabela 6.7	3	0,100	7,330	471,0	565,2	542,0
Tabela 6.7	19	0,016	8,330	394,0	492,5	488,3
Tabela 6.7	19	0,016	9,340	444,0	493,0	488,3
Tabela 6.7	6	0,050	11,340	434,0	528,1	510,1
Tabela 6.7	6	0,050	11,040	407,0	527,6	510,1
Tabela 6.7	4	0,075	12,390	389,0	555,5	526,1
Tabela 6.9	7	0,043	2,350	396,4	508,8	505,6
Tabela 6.9	5	0,060	4,360	425,4	524,8	516,5
Tabela 6.9	5	0,060	5,400	406,6	526,8	516,5
Tabela 6.9	8	0,038	6,400	416,4	509,8	502,1
Tabela 6.9	13	0,023	7,420	427,8	498,4	493,0
Tabela 6.9	19	0,016	8,420	359,1	492,5	488,3
Tabela 6.9	23	0,013	9,400	381,5	490,4	486,6
Tabela 6.9	24	0,013	10,400	382,2	490,3	486,2
Tabela 6.9	42	0,007	11,370	369,0	485,4	482,8
Tabela 6.9	59	0,005	12,370	358,9	483,5	481,5
Média das Energias - Haste com compr. variado				381,6		
Desvio Padrão das Energias - Haste com compr. variado				30,3		

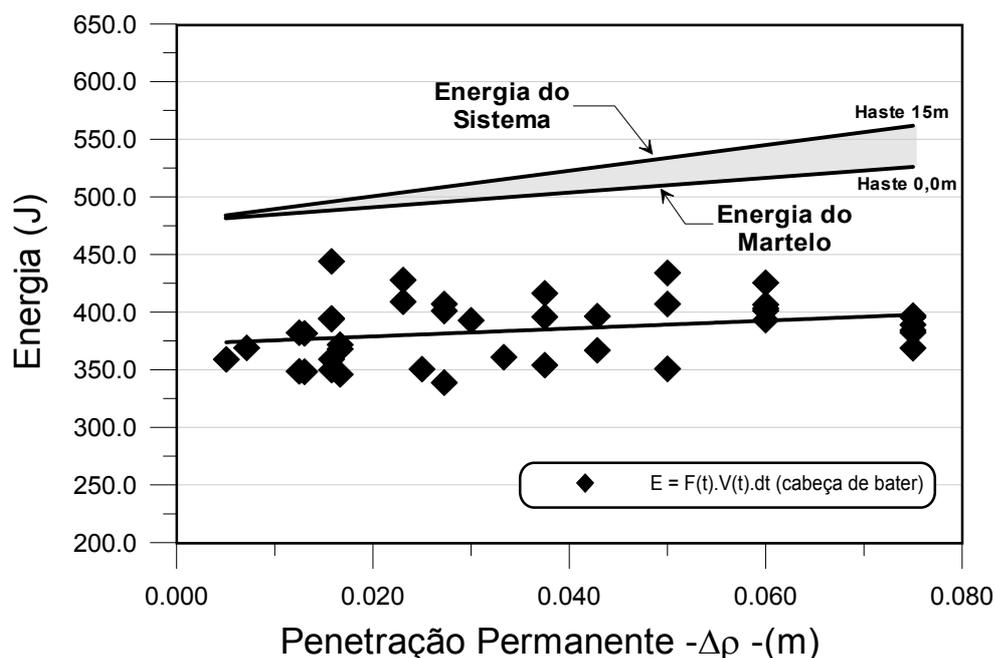


Figura 7.23 – Energia versus penetração – Dados de Cavalcante (2002).

Observa-se que para diferentes equipes, equipamentos e procedimentos há igualmente uma relação linear entre a energia contida na onda longitudinal e a parcela referente ao martelo. Existe uma dispersão elevada nos valores de energia contidos na onda longitudinal. Os dados utilizados e apresentados na Tabela 7.2 são valores médios obtidos Cavalcante (2002) em seu trabalho. O citado autor apresenta, junto ao resultado, o respectivo desvio padrão que varia em faixas de 2% até 17%. Este fato novamente indica que a própria natureza do ensaio SPT faz com que haja uma dispersão considerável nos resultados.

É interessante observar que os padrões de variação de energia obtidos “in situ” são muito semelhantes aos observados no tanque de areia, sendo também possível determinar o valor de η_1 com os dados de Cavalcante (2002). Este valor foi de 0,761 com um desvio padrão de 0,051 muito próximo do valor obtido no tanque de areia. A Figura 7.24 apresenta os valores de η_1 em função do comprimento de haste. É possível observar que, conforme a Figura 7.22 os valores de η_1 independem do comprimento da haste.

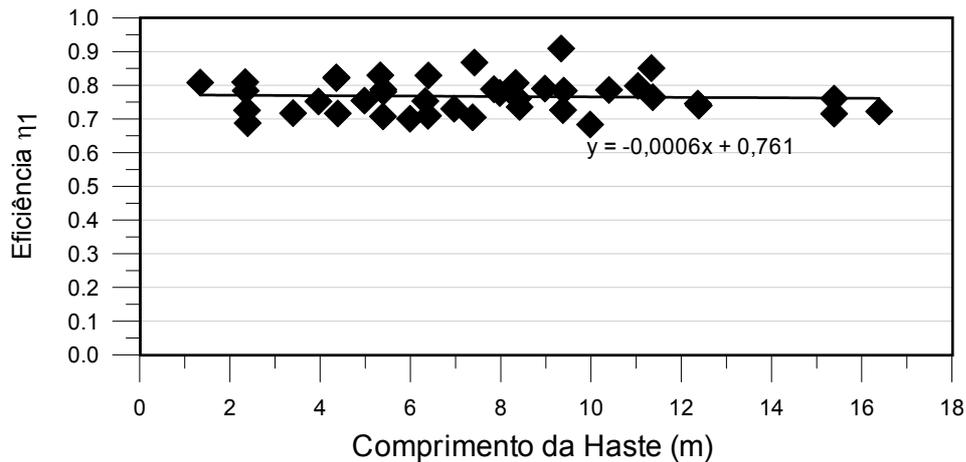


Figura 7.24 - Eficiência η_1 em função do comprimento da haste (Cavalcante,2002).

A proximidade dos valores de η_1 obtidos no presente trabalho (0,764) e por Cavalcante (0,761) indicam, em uma análise inicial, que apesar dos diferentes equipamentos e equipes, o sistema de SPT utilizado no Brasil não conduz a valores muito divergentes e pode ser utilizado na correção da energia transmitida à composição. Este fato é decorrente da análise da eficiência levar em conta a penetração do amostrador no solo, ou seja, equipamentos mais eficientes conduzem a penetrações maiores e vice e versa. Entretanto, o valor de η_1 deve ser monitorado localmente para possibilitar uma eventual generalização que reflita a prática brasileira.

7.4.2 – Instrumentação Posicionada Junto ao Amostrador.

A Tabela 7.3 apresenta os resultados dos valores de energia contida na onda longitudinal obtidos com a instrumentação posicionada junto ao amostrador para os diferentes comprimentos de hastes. A apresentação da tabela 7.3 segue a mesma lógica da tabela 7.1. Com base nos resultados da tabela 7.3 e com os da tabela 7.1 foi possível elaborar os gráficos apresentados nas Figuras 7.25 a 7.28.

Durante o andamento dos trabalhos foi verificado que a energia determinada pela equação 3.85 com a instrumentação posicionada junto ao amostrador é dependente da força de massa decorrente do peso da composição localizada acima da célula de carga, conforme discutido no Capítulo 6. Este fato deve ser alertado tendo em vista que procedimentos normais e consagrados em instrumentação zeram o valor da célula de carga imediatamente antes do início de qualquer ensaio e a força de massa não é computada no valor da energia. Estes procedimentos, em se tratando de equipamentos fechados podem ser efetuados sem o domínio

do operador. Os sinais obtidos no presente trabalho e apresentado na tabela 7.3 levam em consideração esta força inicial.

Tabela 7.3 - Resumo dos resultados da instrumentação posicionada junto ao amostrador.

Sinal	Comprimento da Haste (h) (m)	Penetração (m)			$E = \int_{t=0}^{t=\infty} FVdt$ (J)			$E_1 = (0,75 + \Delta\rho) 65 g$ (J)	$E_2 = \Delta\rho g 3,23 hc$ (J)	$E = E_1 + E_2$ (J)
		Acele. 1	Acele. 2	Média	Acele. 1	Acele. 2	Média			
S2005	5,80	0.022	0.022	0.022	384.6	376.3	380.4	492.3	8.2	500.5
S2105		0.019	0.020	0.020	348.6	376.0	362.3	490.7	7.3	498.0
S2405		0.065	0.066	0.066	438.6	452.2	445.4	520.0	24.5	544.5
S2505		0.040	0.038	0.039	434.4	433.3	433.9	503.1	14.6	517.7
S2605		0.034	0.034	0.034	409.6	430.9	420.3	499.9	12.7	512.6
S2805		0.029	0.027	0.028	384.4	396.3	390.3	496.1	10.5	506.5
S2905		0.025	0.025	0.025	390.1	370.5	380.4	494.1	9.3	503.4
Média das Energias - Haste 5,80m							401.8			
Desvio Padrão das Energias - Haste 5,8m							31.3			
S8011	11,80	0.044	0.044	0.044	343.2	361.0	352.1	506.3	16.5	522.7
S8111		0.040	0.038	0.039	383.9	370.8	377.4	503.1	14.6	517.7
S8211		0.029	0.028	0.028	376.5	359.2	367.8	496.2	10.5	506.7
S8311		0.022	0.022	0.022	342.7	344.8	343.8	492.3	8.2	500.5
S8711		0.066	0.068	0.067	409.1	416.0	412.5	521.0	25.1	546.0
S8811		0.036	0.035	0.035	338.6	347.3	342.9	500.7	13.2	513.8
S8911		0.032	0.030	0.031	350.2	340.7	345.5	497.8	11.5	509.2
Média das Energias - Haste 11,80m							363.1			
Desvio Padrão das Energias - Haste 11,80m							25.4			
S2018	18,80	0.048	0.050	0.049	399.3	400.5	399.9	509.5	18.3	527.8
S2118		0.036	0.035	0.035	369.4	362.4	369.9	500.7	13.1	513.8
S2218		0.030	0.029	0.030	356.7	377.9	367.3	497.0	11.0	508.1
S2318		0.020	0.023	0.022	357.0	366.6	361,8	485.7	4.4	490.0
S2418		0.024	0.022	0.023	378.8	383.4	381.1	492.7	8.5	501.3
S2518		0.024	0.024	0.024	367.4	374.1	370.7	493.6	9.0	502.6
S2618		0.020	0.020	0.020	311.7	307.3	309.5	491.0	7.5	498.5
Média das Energias - Haste 18,80m							365.7			
Desvio Padrão das Energias - Haste 18,80m							27.7			
S7734	34,80	0.028	0.026	0.027	355.3	363.7	359.5	495.4	10.1	505.5
S8134		0.017	0.018	0.018	341.5	322.7	332.4	489.4	6.5	495.9
S8334		0.076	0.077	0.077	418.2	428.1	423.2	527.0	28.6	555.6
S8434		0.036	0.036	0.036	331.9	339.6	335.8	501.4	13.6	515.1
S8534		0.028	0.029	0.028	308.4	332.7	320.6	496.4	10.6	507.0
S8634		0.029	0.029	0.029	346.4	342.7	344.6	496.7	10.8	507.5
S8734		0.024	0.023	0.024	363.3	342.8	353.1	493.2	8.8	502.0
S7634	0.047	0.047	0.047	359.8	359.8	359.8	508.2	17.6	525.8	
Média das Energias - Haste 34,80m							353.6			
Desvio Padrão das Energias - Haste 34,80m							31.2			

Nas figuras 7.25 a 7.28 são apresentados os resultados obtidos no cálculo da energia da onda longitudinal de tensão determinada com a instrumentação instalada junto ao amostrador. Adicionalmente a estas figuras são apresentados os resultados das energias calculadas junto à cabeça de bater, a energia do sistema e a parcela de energia referente ao martelo. Apresenta-se também adicionalmente a título de discussão a energia teórica de referência correspondente a 478 J [$E_{teo} = 0,75M_h g = 0,75 \cdot 65 \cdot 9,81$].

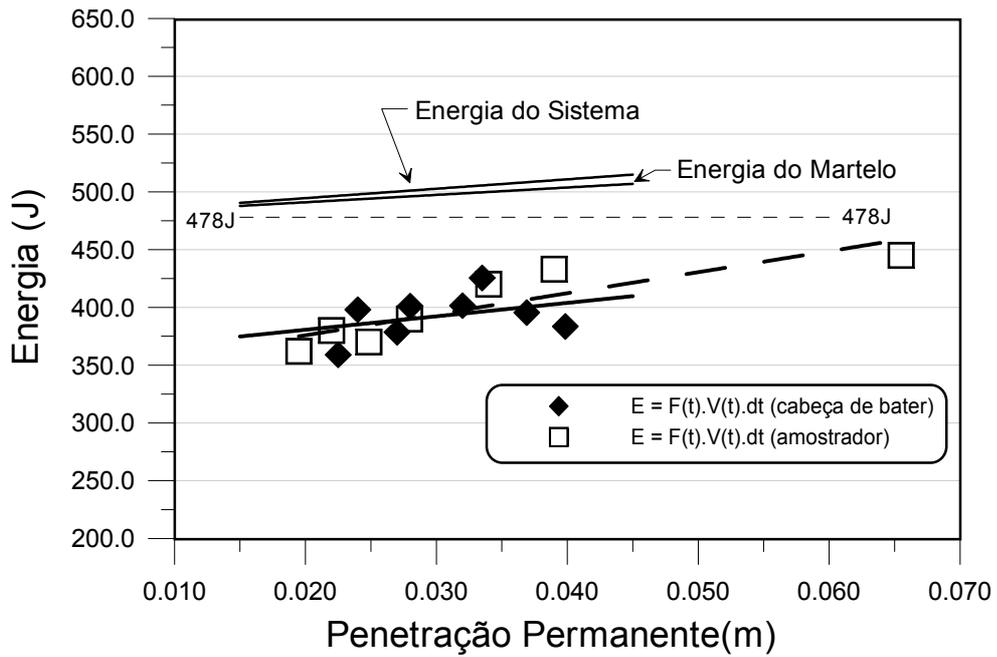


Figura 7.25 – Energia versus Penetração – Haste 5,80m.

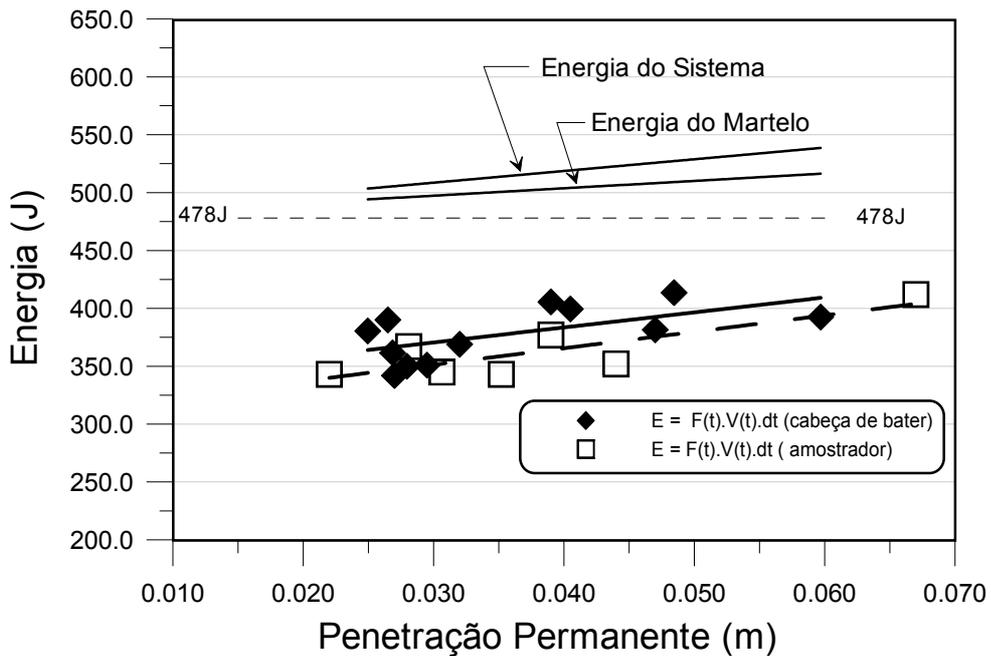


Figura 7.26 - Energia versus Penetração – Haste 11,80m.

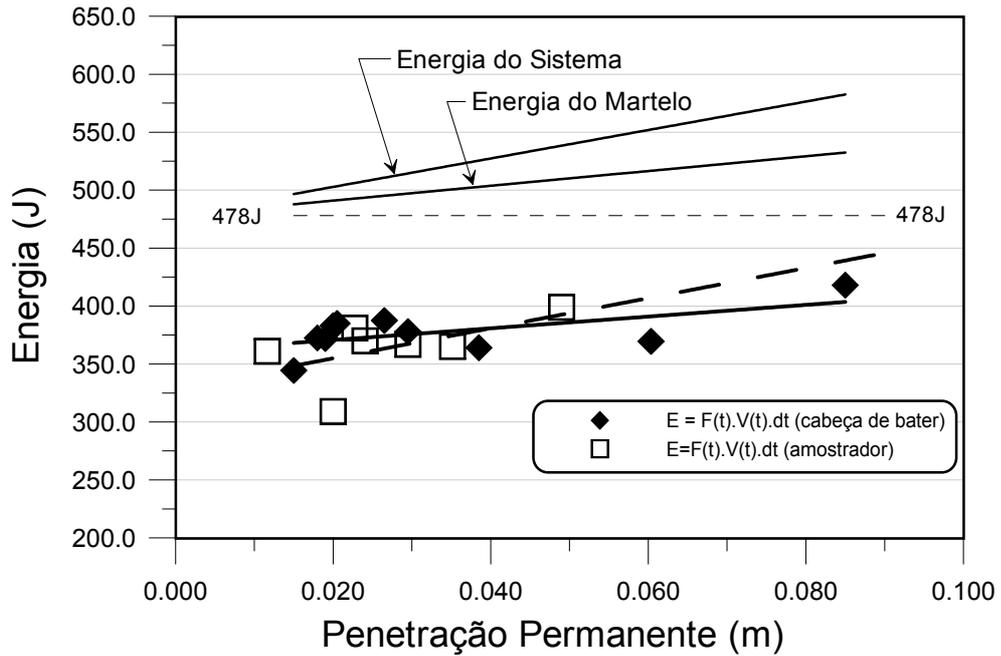


Figura 7.27 - Energia versus Penetração – Haste 18,80m.

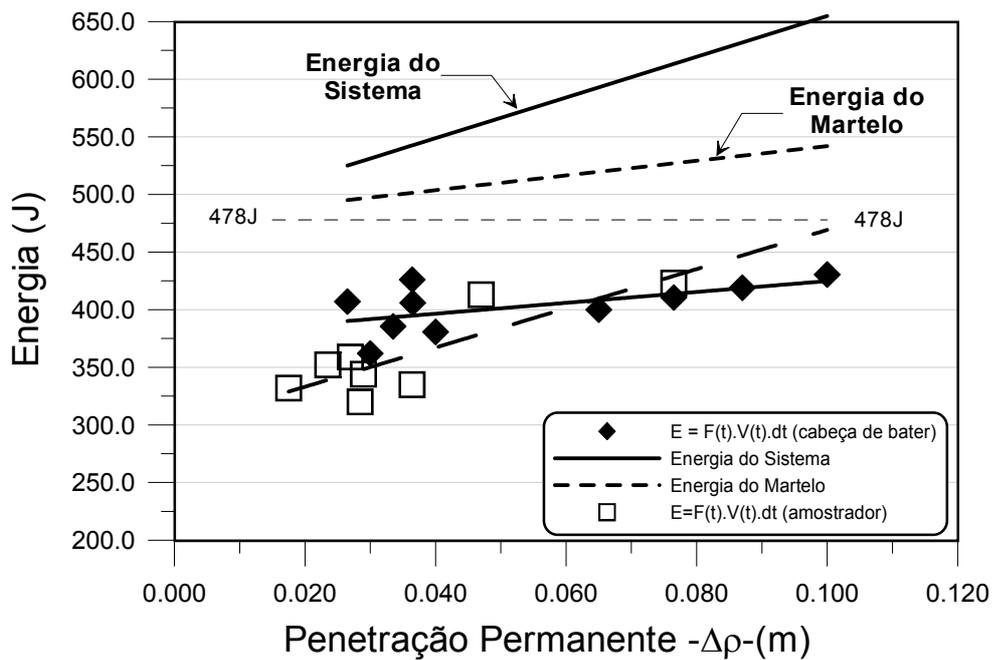


Figura 7.28 - Energia versus Penetração – Haste 35,80m.

Nas figuras 7.27 e 7.28 é nítida a relação existente entre a energia determinada pela equação 3.85 com a instrumentação posicionada junto ao amostrador e a energia do sistema nos mesmos moldes que a relação percebida anteriormente entre a energia da onda obtida com a instrumentação posicionada junto à cabeça de bater e a parcela referente ao martelo. Esta relação já foi demonstrada numericamente no capítulo anterior no item 6.5.2.

Este fato leva a concluir que a energia obtida com a instrumentação posicionada junto ao amostrador incorpora a influência do comprimento da haste. Observa-se, nas figuras 7.25 e 7.26, que esta relação não é tão expressiva, que indica a menor influência do comprimento das hastes.

Um fator de eficiência adicional deve ser incorporado à equação 7.2 a fim de possibilitar a determinação da energia junto ao amostrador. Acredita-se que este fator de eficiência deve ser função do comprimento das hastes. Este novo fator de eficiência não tem uma solução trivial e requer a uma análise cuidadosa para a sua determinação. Considera-se, para tanto, a hipótese de que para uma haste de comprimento nulo não há perdas.

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = \xi(\eta_1 E_m) \quad (7.3)$$

Onde: $E_m = (0,75 + \Delta\rho)M_m g$;

ξ = é um valor adimensional, função de $\Delta\rho$ e l e igual a 1 mais o acréscimo devido à energia potencial da haste; Para haste de comprimento nulo este fator pode ser:

$$\xi = 1 + \frac{E_h}{\eta_1 E_m}$$

Para comprimentos de hastes não nulos a seguinte hipótese pode ser adotada tentativamente:

$$\xi = \left(1 + \frac{\eta_2 E_h}{\eta_1 E_m}\right) \eta_3 \quad (7.4)$$

E considerando $E_h = M_h \cdot \Delta\rho \cdot g$, temos:

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = \eta_3 \left(1 + \frac{\eta_2 E_h}{\eta_1 E_m}\right) (\eta_1 E_m) = \eta_3 (\eta_1 E_m + \eta_2 E_h) \quad (7.5)$$

Ou seja:

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = \eta_3 [\eta_1 (0,75 + \Delta\rho) M_m g + \eta_2 \Delta\rho M_h g] \quad (7.6)$$

O valor de η_1 já foi determinado anteriormente e corresponde a 0,764. E os valores de η_2 e η_3 devem ser determinados de modo a verificar se os mesmos são influenciados pelo comprimento das hastes, portanto escreve-se η_2 e η_3 como segue:

$$\eta_2 = \beta_2 + \alpha_2 \ell \text{ (eficiência da haste)}$$

$$\eta_3 = \beta_3 + \alpha_3 \ell \text{ (eficiência do sistema)}$$

Para cada ensaio “ i ” realizado com a instrumentação posicionada junto ao amostrador, com um comprimento de haste “ ℓ_i ” determina-se os valores de η_2 e η_3 de tal modo que minimize o erro “ \mathcal{E} ” constituído pela diferença entre a energia entregue ao solo ($\Delta EPG_{m+h}^{sistema}$) e a energia obtida pela equação 3.85 medida com a instrumentação posicionada junto ao amostrador.

$$\mathcal{E}^2 = \sum \left\{ \int_0^{\infty} F(t).V(t).dt_{\text{junto ao amostrador}} - \eta_3 [\eta_1 (0,75 + \Delta\rho) M_m g + \eta_2 (M_m \Delta\rho g)] \right\}^2 \quad (7.7)$$

Para determinar os valores efetuou-se várias opções, a saber:

Opção 1: $\eta_2 = \beta_2 + \alpha_2 \ell = 1 + 0\ell = 1$

$$\eta_3 = \beta_3 + \alpha_3 \ell = \beta_3 + 0 = \beta_3$$

O resultado desta análise apontou para um valor de β_3 igual a 0,914 sendo contudo um péssimo ajuste pois o erro ficou dependente do comprimento da haste.

Opção 2: $\eta_2 = \beta_2 + \alpha_2 \ell = 1 + 0\ell = 1$

$$\eta_3 = \beta_3 + \alpha_3 \ell = 1 + \alpha_3 \ell$$

O resultado desta análise apontou para um valor de α_3 igual a -0,00,42 sendo que o erro ficou independente do comprimento da haste o que é desejável.

Opção 3: $\eta_2 = \beta_2 + \alpha_2 \ell = \beta_2 + 0\ell = \beta_2$

$$\eta_3 = \beta_3 + \alpha_3 \ell = 1 - 0,0042\ell$$

O resultado desta análise apontou para um valor de β_2 maior que um sendo esta consideração ilógica.

Opção 4: $\eta_2 = \beta_2 + \alpha_2 \ell = 1 + \alpha_2 \ell$

$$\eta_3 = \beta_3 + \alpha_3 \ell = 1 - 0,0042\ell$$

O resultado desta análise apontou para um valor de α_2 menor do que 1 sendo esta consideração também ilógica.

Finalmente conclui-se que o melhor ajuste é o da opção 2 que considera $\eta_2 = 1$ e η_3 expresso em função do comprimento das hastes:

$$\eta_3 = 1 - 0,0042 \ell$$

A figura 7.29 apresenta os erros plotados em função do comprimento da haste e em função da penetração. Observa-se que o erro encontrado é da ordem de $\pm 50\text{J}$ e não depende do comprimento da haste e tampouco do valor da penetração do amostrador no solo.

7.4.2.1 – Instrumentação Posicionada Junto ao Amostrador – Re-análise dos Resultados de Cavalcante (2002).

Cavalcante em uma de suas campanhas de investigação efetuou, além dos ensaios com a instrumentação junto à cabeça de bater, uma campanha no mesmo perfil geotécnico e com os mesmos comprimentos de haste, com a instrumentação posicionada junto ao amostrador. Esta campanha está relatada no trabalho do citado autor e descrita como a campanha efetuada com a equipe A da empresa 2 cujos ensaios foram executados no bairro de Mangabeira, João Pessoa, PB. Os resultados destes ensaios estão reproduzidos, no presente trabalho, e apresentado nas Tabelas 7.2, nomeado por Tabela 6.17 e destacado em negrito. O nome designado a estes dados corresponde ao nome da tabela original dos dados no trabalho de

Cavalcante (2002). Na tabela 7.4 são apresentados os resultados da instrumentação posicionados junto ao amostrador.

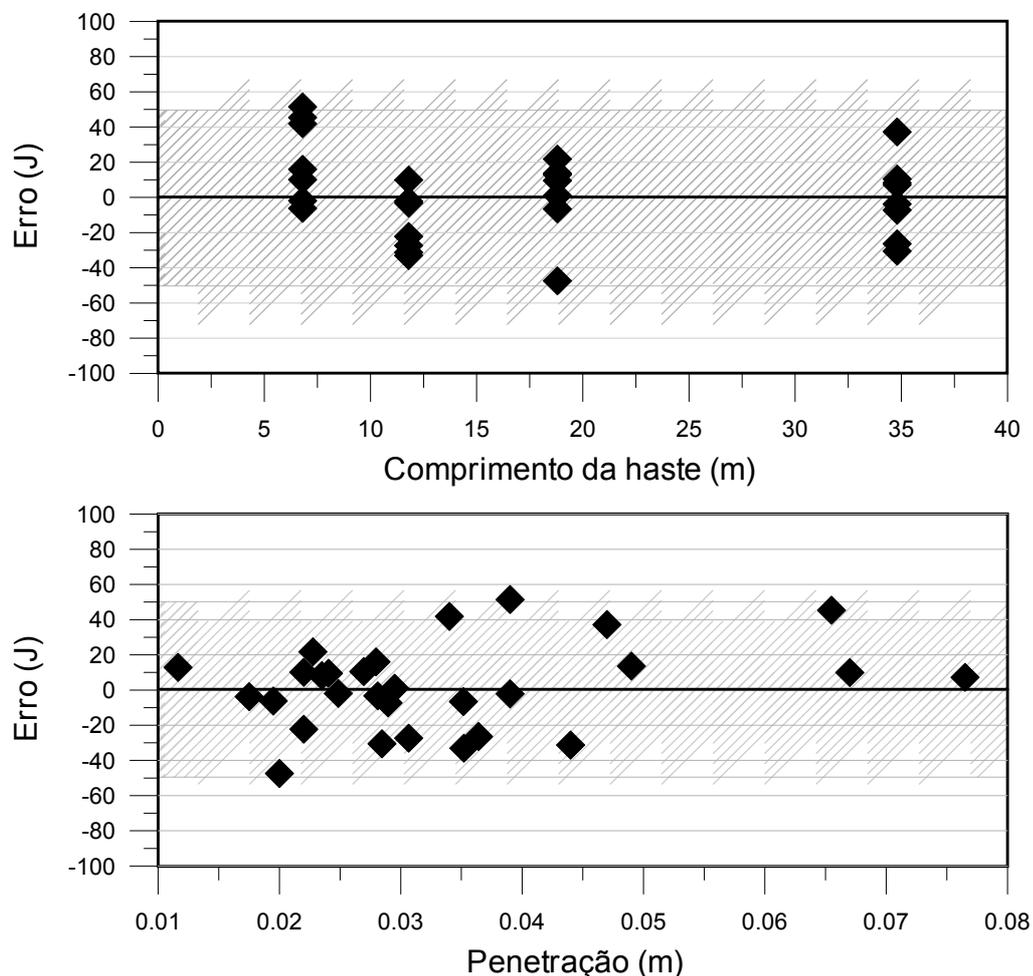


Figura 7.29 – Erro na estimativa da energia entregue ao solo versus comprimento da haste e penetração.

Os valores de energia obtidos por Cavalcante com a instrumentação posicionada junto ao amostrador foram corrigidos a fim de se considerar a força decorrente da massa das hastes posicionada acima da instrumentação, conforme demonstrado no item 6.5.2. Adotou-se este procedimento, pois se considerou que os dados foram adquiridos tomando-se a leitura imediatamente antes do golpe como referência e igual a zero. Nenhum comentário foi efetuado por Cavalcante com relação a este fato. Portanto a análise que segue está sujeita a esta incerteza. Contudo esta correção não foi tão pronunciada tendo em vista que os comprimentos de hastes utilizados por Cavalcante eram relativamente curtos.

Tabela 7.4 - Dados experimentais de Cavalcante (2002) – instrumentação posicionada junto ao amostrador.

Fonte Tabelas Cavalcanti (2002)	N_{spt} (Golpes/30cm)	Penetração (m)	Comprimento da Haste (h) (m)	$E = \int_{t=0}^{t=\max} FVdt$ (J)	$E_1 = (0,75 + \rho) * 65 * g + \rho * 3,23 * g * h$ (J)	$E_1 = (0,75 + \rho) * 65 * g$ (J)
Tabela 6.18	5	0.060	1.97	326.5	520.2	516.5
Tabela 6.18	4	0.075	3.96	367.4	535.5	526.1
Tabela 6.18	4	0.075	4.98	360.8	537.9	526.1
Tabela 6.18	4	0.075	5.99	364.5	540.3	526.1
Tabela 6.18	4	0.075	6.97	360.5	542.6	526.1
Tabela 6.18	5	0.060	7.98	354.1	531.7	516.5
Tabela 6.18	8	0.038	7.95	337.4	511.6	502.1
Tabela 6.18	10	0.030	8.98	364.5	505.9	497.4
Média das Energias - Haste com compri. variado				354.4		
Desvio Padrão das Energias - Haste com compri. variado				13.7		

A figura 7.30 apresenta de forma gráfica os resultados de Cavalcante com a mesma apresentação das figuras anteriores.

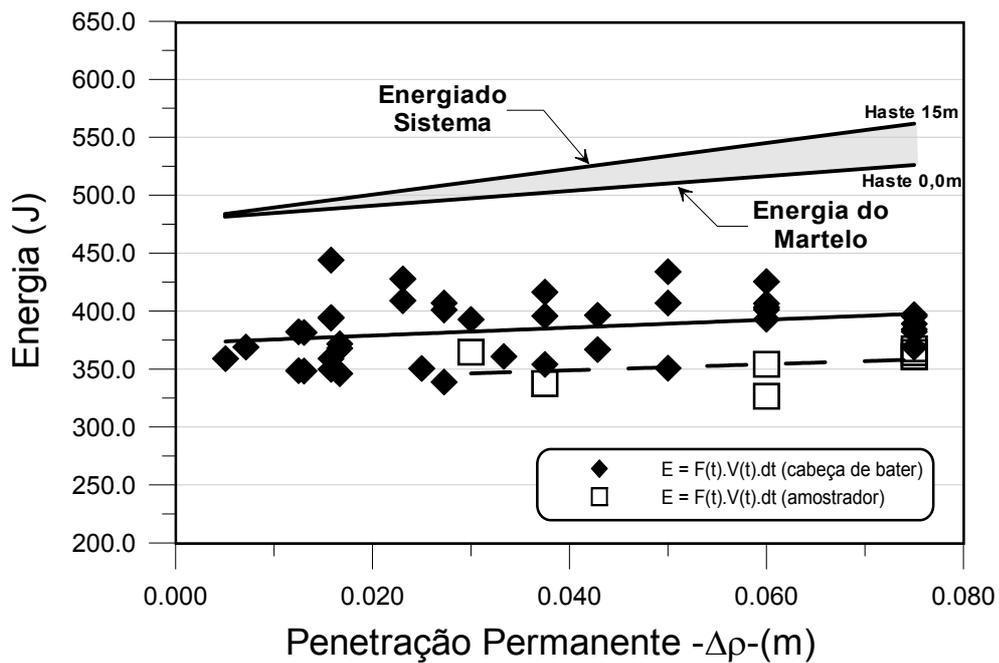


Figura 7.30 – Energia versus Penetração – Comprimento de Haste Variável – Dados Cavalcante (2002).

O mesmo procedimento adotado na determinação dos parâmetros η_2 e η_3 para os dados do presente trabalho foi adotado para os dados de Cavalcante. O resultado obtido foi para $\eta_2 = 1$ e para $\eta_3 = 0,907 - 0,0066\ell$. O valor de η_3 obtido está sujeito a críticas tendo em vista que

para um comprimento de haste nulo há perdas da ordem de 10% o que não é razoável. No presente trabalho não se obteve uma justificativa apropriada para este resultado a não ser o reduzido número de dados. A figura 7.31 apresenta de forma análoga à figura 7.29 o erro obtido para os dados de Cavalcante. Observa-se que devido ao reduzido número de dados o ajuste conduziu a erros baixos, contudo acredita-se que para um bando de dados maior a faixa de erro também será maior.

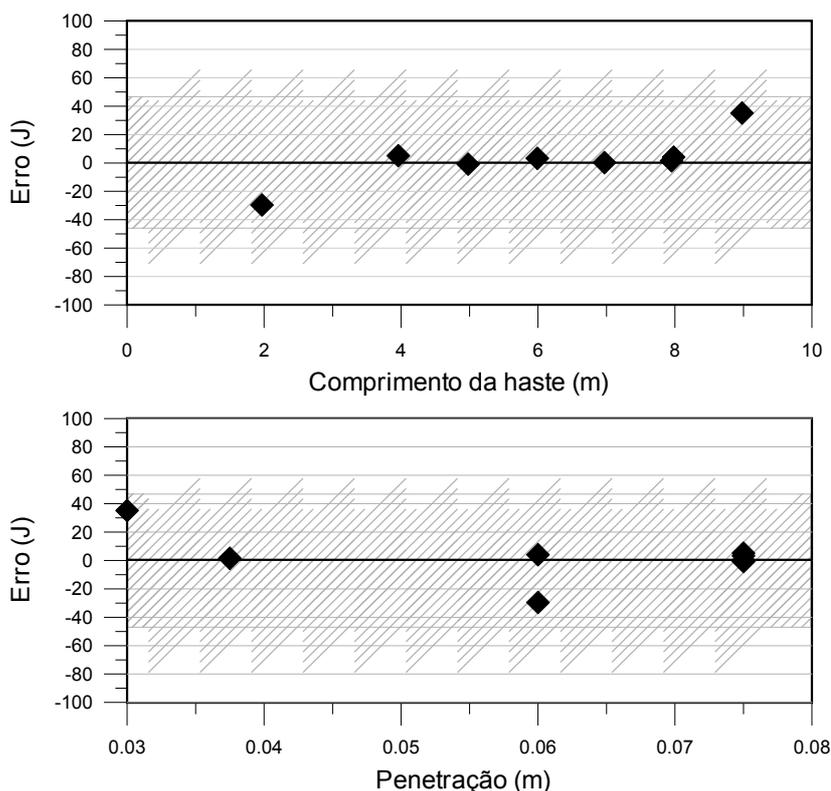


Figura 7.31 - Erro na estimativa da energia entregue ao solo versus comprimento da haste e penetração, dados de Cavalcante (2002).

7.5 – COMENTÁRIOS FINAIS

Com base nos resultados da campanha experimental apresentada neste capítulo foi possível verificar, como demonstrado no Capítulo 6, que a energia da onda longitudinal contida na haste decorrente da aplicação de um golpe do martelo é proporcional à variação da energia do sistema e permitiu determinar a equação 7.6 que possibilita determinar a energia entregue ao solo.

A instrumentação posicionada junto ao amostrador indicou que há perdas de energia ao longo da haste provavelmente decorrente de distintas causas como à presença das luvas, flambagens, atrito da haste com a parede do furo etc..

Com base no acima exposto pode-se concluir que quanto menor o comprimento das hastes menores serão as perdas ao longo das hastes e para golpes idênticos a eficiência é maior em hastes curtas conforme indicou Aoki & Cintra (2000).

Outra conclusão importante é que dependendo do comprimento das hastes e ou do valor da penetração do amostrador no solo (resistência do solo) o tempo de integração no computo da energia (equação 6.8) deve ser adequado (muitas vezes maior que 100 milésimos de segundo) para que os golpes subseqüentes sejam considerados e o valor da energia corretamente avaliado.

CAPÍTULO 8

APLICAÇÃO À PRÁTICA DE ENGENHARIA

8.1 – INTRODUÇÃO

Os Capítulos 6 e 7 denominados de Análise Teórica e Análise Experimental desta tese apresentaram uma nova metodologia para a interpretação do ensaio SPT, na qual a energia entre ao solo é determinada. Com base neste valor é possível conhecer o valor da força dinâmica (F_d) de reação do solo. O conhecimento desta força abre uma gama de alternativas para a interpretação do ensaio fundamentada em análises racionais que podem substituir correlações de natureza essencialmente empíricas hoje empregadas a nível nacional e internacional. Em um primeiro exemplo, sugere-se ser possível estimar a resistência ao cisalhamento não drenado, S_u , através de métodos de equilíbrio limite. Em areias, pode-se buscar uma estimativa das tensões admissíveis do solo ou obter parâmetros de resistência (ângulo de atrito). Estabelecer estas correlações não é objetivo do presente trabalho. Procura-se nesta tese apenas indicar, através de estudo de casos, os princípios necessários à fundamentação de métodos de interpretação dos resultados do SPT em argilas e areais.

8.2 – EXEMPLO EM ARGILAS

A capacidade de carga última de uma estaca em argilas pode ser obtida pela equação 8.1:

$$F_e = (N_c A_b S_u + \gamma D A_b) + (S_u \alpha A_s) \quad (8.1)$$

Onde: F_e = força estática;
 N_c = Coeficiente de capacidade de carga;
 A_s = Área lateral;
 A_b = Área de ponta;
 S_u = Resistência não drenada;
 γ = Peso específico do solo;
 D = Profundidade da ponta;
 α = Coeficiente de adesão;

Da equação 8.1 é possível isolar o valor de S_u :

$$S_u = \frac{F_e - \gamma D A_b}{(N_c A_b + \alpha A_s)} \quad (8.2)$$

Sabe-se, contudo, que o solo reage de forma distinta quando a penetração do amostrador é efetuada de forma dinâmica ou quando a penetração é efetuada de forma “quase estática”. Convencionalmente, este efeito é levado em consideração assumindo um incremento de carga proporcional à resistência estática conforme equação 8.3. Este fator de incremento de carga poder ser obtido na tabela 8.1. Valores, estes sugeridos por Hermansson e Grävare (1978), citados por Bernardes et al (2000).

$$F_d = v F_e \quad \text{ou} \quad F_e = F_d (1/v) \quad (8.3)$$

Tabela 8.1 – Fatores de Incremento de carga. (Hermansson e Grävare, 1978; citados por Bernardes et al 2000).

Tipo de Solo	v	$1/v$
Areias	1,00 – 1,15	1,00 – 0,95
Areia Siltosa	1,15 – 1,25	0,95 – 0,87
Silte Arenoso	1,20 – 1,45	0,87 – 0,77
Argila Siltosa	1,40 – 1,70	0,77 – 0,60
Argila	1,70 – 2,10	0,60 – 0,48

O valor de F_d pode ser obtido como segue (ver Capítulo 7):

$$\Delta EPG_{\text{martelo+haste}}^{\text{sistema}} = W_{nc} = F_d \Delta \rho \quad (8.4)$$

E conseqüentemente F_e pode ser obtido como:

$$F_d = F_e v = \frac{\Delta EPG_{\text{martelo+haste}}^{\text{sistema}}}{\Delta \rho} \quad (8.5)$$

ou

$$F_e = \left(\frac{\Delta EPG_{\text{martelo+haste}}^{\text{sistema}}}{\Delta \rho} \right) \left(\frac{1}{v} \right)$$

Adotando-se na equação (7.6) os valores de η_1 igual 0,764; η_2 igual a 1; $\eta_3 = (1 - 0,0042\ell)$; g igual a $9,81\text{m/s}^2$; massa da haste por metro linear igual a $3,23 \text{ kg/m}$ e z igual ao comprimento da haste tem-se:

$$\Delta EPG_{\text{martelo+haste}}^{\text{sistema}} = (1 - 0,042 \ell)[0,764(0,75 + \Delta\rho)65 \cdot 9,81 + z \cdot 3,23 \cdot 9,81] \quad (8.6)$$

Para todos os exemplos apresentados a seguir o valor de “ $1/\nu$ ” adotado é igual a 0,6 que corresponde a um solo argiloso, tabela 8.1. O valor utilizado e sugerido na tabela 8.1 refere-se a estacas. Poucos são os trabalhos na literatura que analisam o efeito de velocidade de penetração na estimativa de resistência não drenada, além do que estes estudos não são aplicados ao SPT. Assim no futuro sugere-se a necessidade de validação do valor de “ $1/\nu$ ” através de estudos de casos verificando-se eventuais influências dos índices físicos e da história de tensões, ou a utilização de uma outra metodologia.

Outro ponto que não se tem uma definição precisa é qual a área da ponta e qual a área lateral a ser considerada na equação 8.2. Em se tratando de solos argilosos de baixa resistência é razoável considerar que a parcela da área lateral A_s , que contribui na resistência de atrito lateral, é composta das áreas internas e externas do amostrador. Já a área de ponta A_p é composta somente pela área referente à seção maciça da parede do amostrador. No caso de areias, esta consideração pode não ser de todo correta, tendo em vista que a partir de uma certa penetração do amostrador no solo o mesmo embucha passando então a ter uma área que corresponde à ponta fechada. Isto é, uma área de ponta correspondente ao diâmetro externo e a área lateral referente somente à parte externa do amostrador. Por ser este um questionamento polêmico considerou-se uma única situação para todos os casos estudados no presente trabalho, onde a área da ponta é considerada como sendo a área referente ao diâmetro externo do amostrador (ponta fechada), e a área lateral somente à área externa do amostrador definida por uma penetração média de 30cm multiplicada pelo perímetro externo do amostrador.

Uma aplicação de particular interesse ocorre em situações nas quais a sondagem indicou um valor de golpes igual a zero, ou seja, o conjunto haste mais martelo penetrou no solo por peso próprio. Nestas condições o ensaio SPT não possibilitava uma previsão de S_u , pois esta era

estimada, até então, por correlação a partir da razão entre S_u/N_{spt} . Na abordagem proposta neste trabalho, a equação 8.6 é redefinida como:

$$\Delta EPG_{\text{martelo+haste}}^{\text{sistema}} = (65,981 \Delta \rho + z 3,23 9,81 \Delta \rho) \quad (8.7)$$

Na medida em que o amostrador penetra a uma velocidade muito inferior ao caso em que a composição recebeu a aplicação de um golpe do martelo, ou seja com velocidades de penetração com valores próximos ao do CPT, condição “quase-estática”, não há a necessidade de se multiplicar o valor da força dinâmica pelo coeficiente “ $1/v$ ”.

O valor do coeficiente de adesão (α) pode ser obtido pelo conhecimento prévio dos valores da resistência não drenada e ou do valor do índice de plasticidade (IP), conforme as figuras 8.1 e 8.2, seguindo procedimentos consagrados, análogos ao adotado em projetos de capacidade de carga de estacas.

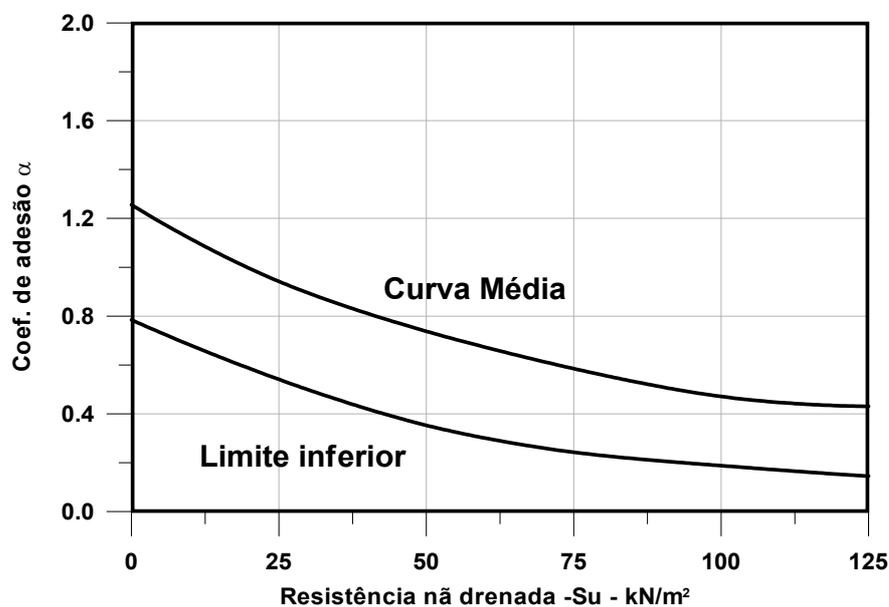


Figura 8.1 – Relação entre o coeficiente de adesão para estacas cravadas e a resistência não drenada das argilas, segundo Tomlinson (1969).

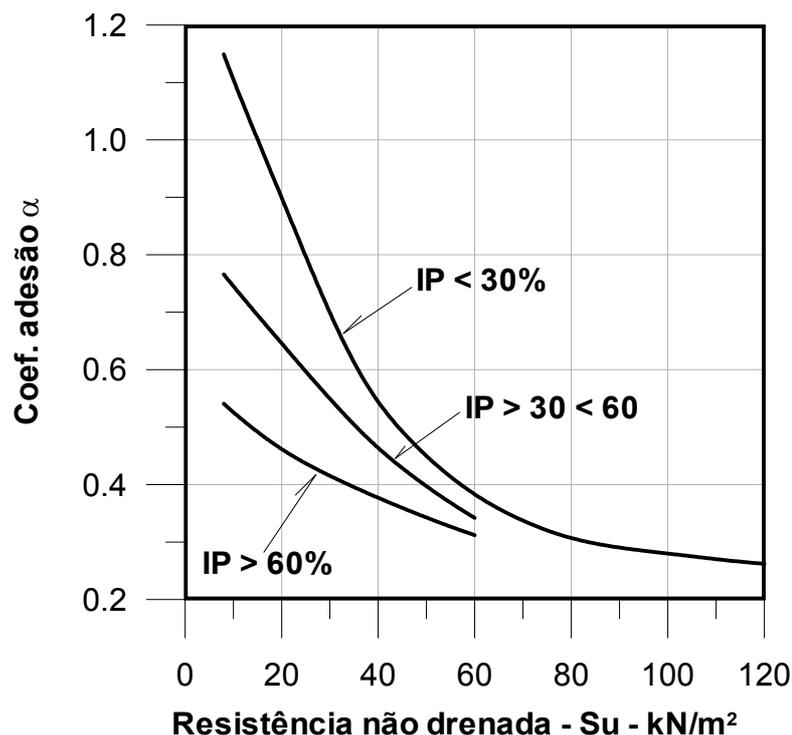


Figura 8.2 - Relação entre o coeficiente de adesão para estacas cravadas e a resistência não-drenada das argilas, segundo Flaate, (1968) (a partir de Simons & Menzies, 1981).

O procedimento acima descrito pode, portanto ser adotado na previsão da resistência ao cisalhamento não-drenada de depósitos de argilas mole. Exemplos de aplicação são apresentados a seguir para casos bem documentados que refletem a prática brasileira. Busca-se com estes exemplos verificar a aplicabilidade de uma abordagem racional para estimativa de S_u que, na opinião do autor, é muito mais confiável que correlações empíricas baseadas na razão entre S_u/N_{spt} . Finalmente o autor reconhece que independentemente da acurácia obtida, os valores estimados são sempre influenciados pelo amolgamento do solo gerado pelo processo de abertura do duro do ensaio SPT.

8.2.1 – Argilas Moles de Porto Alegre – Aeroporto Salgado Filho.

Para exemplificar a utilização das equações acima se estimou a resistência não drenada a partir da sondagem SPT efetuada no local do Aeroporto Salgado Filho em Porto Alegre (Schnaid et al., 2001). O valor da resistência não drenada foi obtido através de ensaios triaxiais

não drenados (UU) efetuados por Soares (1997), e através de ensaios de piezocone efetuados por Schnaid et al. (1998). Com base no perfil de sondagem elaborou-se a tabela 8.2 que apresenta o cálculo dos valores de S_u a partir do SPT. O valor do coeficiente de adesão (α) utilizado nesse caso foi 0,8 obtido a partir da Figura 8.1 considerando uma resistência não drenada de aproximadamente 12,5 kPa e uma curva intermediária dentro da faixa proposta.

A figura 8.3 apresenta o perfil de sondagem obtido a partir de sondagem SPT e a figura 8.4 apresenta os resultados compilados de S_u obtidos por Soares, Schnaid et al. e os estimados a partir dos resultados da sondagem SPT.

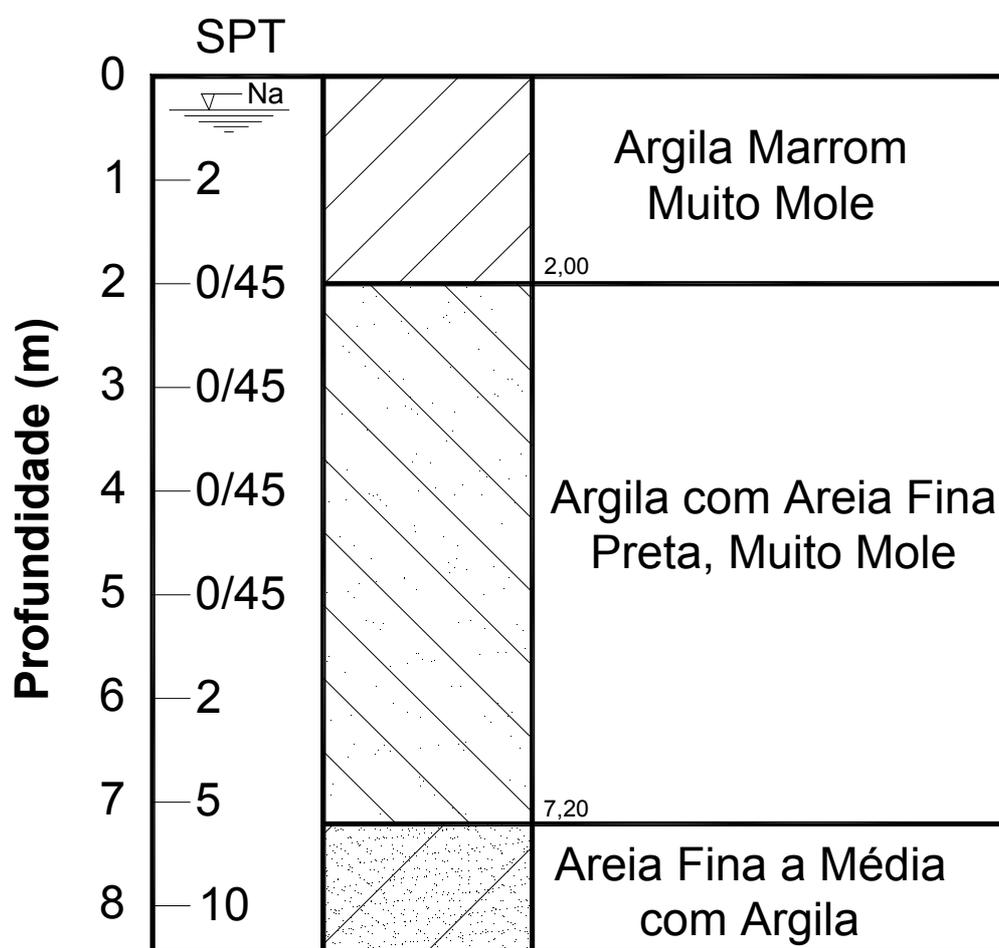


Figura 8.3 – Perfil de sondagem SPT – Aeroporto Salgado Filho (Schnaid et al, 2001).

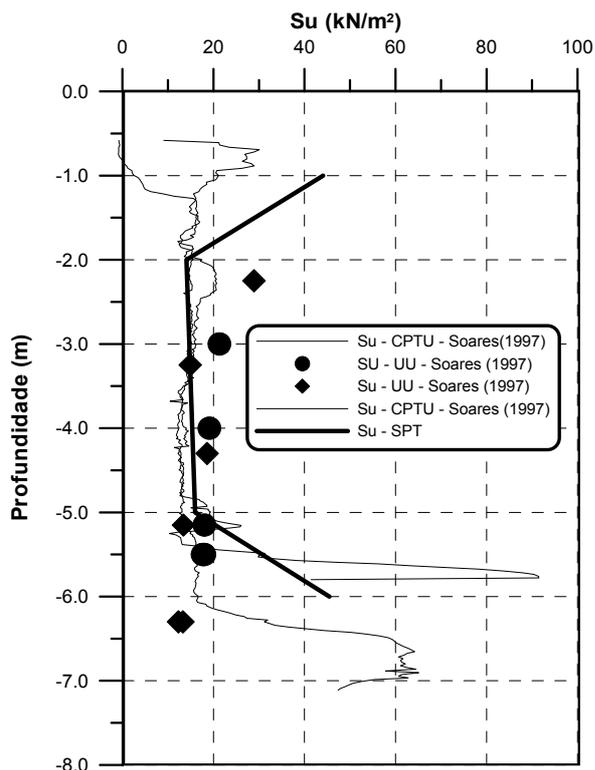


Figura 8.4 – Compilação de resultados de S_u obtidos por ensaios UU e CPTU e a partir da presente proposta.

Tabela 8.2 – Cálculo de S_u a partir do SPT. – Aeroporto Salgado Filho – Porto Alegre.

Massa da haste	3,23 (kg/m)
Diâmetro do Amostrador	0,053 (m)
N_c argila	9
α	0,8
$1/\nu$	0,6
η_1	0,76

Prof. (m)	γ (kN/m ³)	γ_w (kN/m ³)	σ'_v (kN/m ²)	N (spt)	Penetração (cm)	Penetração (m)	Energia (J)	Força (kN)	S_u (kN/m ²)
1	17	9,81	7,19	2	30	0,15	438,87	1,76	44,07
2	15	9,81	12,38	0	45	0,45	315,33	0,70	14,06
3	15	9,81	17,57	0	45	0,45	329,58	0,73	14,70
4	15	9,81	22,76	0	45	0,45	343,84	0,76	15,33
5	15	9,81	27,95	0	45	0,45	358,09	0,80	15,97
6	15	9,81	33,14	2	30	0,15	452,78	1,81	45,46

8.2.2 – Argilas Moles de Recife – Clube Internacional do Recife.

Com base no perfil de sondagem SPT efetuado no Clube Internacional do Recife (Coutinho et al, 2000), figura 8.5, estimou-se, utilizando a metodologia apresentada, o valor da resistência não drenada do solo argiloso. A tabela 8.3 apresenta o cálculo destes valores de S_u , bem como os demais dados utilizados nos cálculos. Valores de S_u obtidos em ensaios triaxiais UU apresentados por Coutinho et al (1993) e resultados obtidos em ensaios de Vane apresentados por Oliveira (2000) estão apresentados na Figura 8.6 juntamente com os valores estimados a partir do SPT. O valor do coeficiente de adesão utilizado na estimativa do S_u foi de 0,32 obtido a partir da Figura 8.2 considerando uma resistência não drenada de no entorno de 45 kPa e um índice de plasticidade de maior que 60% (IP>60% obtido por Coutinho et al, 1993).

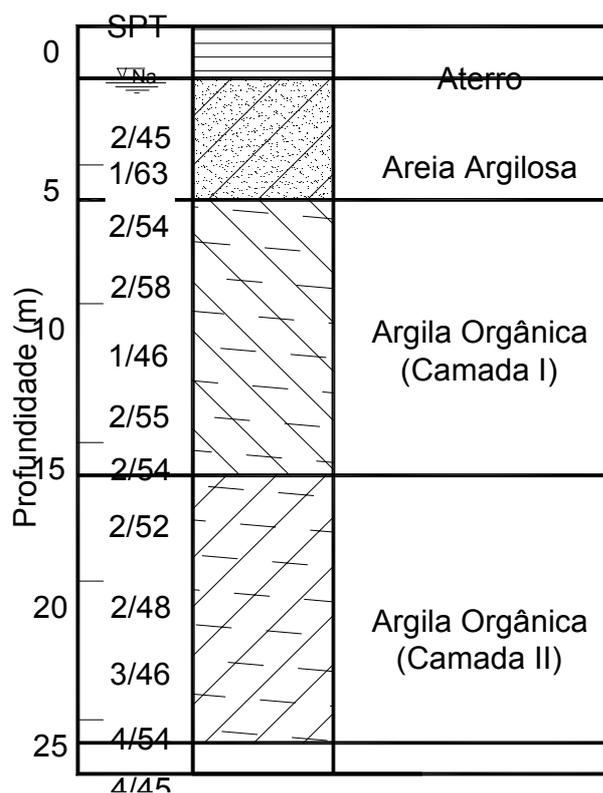


Figura 8.5 – Perfil de sondagem SPT – Clube Internacional do Recife (adaptado de Coutinho et al.,2000).

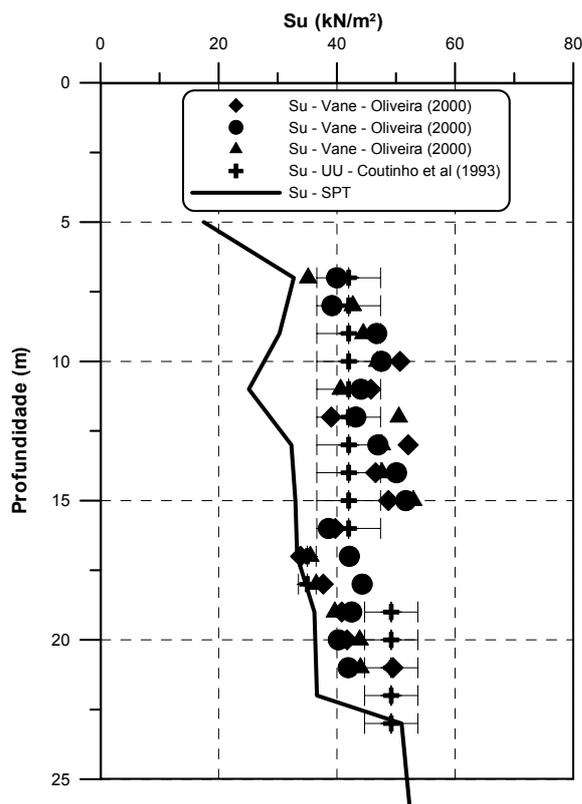


Figura 8.6 – Compilação de resultados de S_u obtidos por ensaios UU e Vane e a partir da presente proposta.

Tabela 8.3 – Cálculo de S_u a partir do SPT. – Clube Internacional do Recife.

Massa da haste/m	3,23
Diâmetro do Amostrador	0,053
N_c argila	9
α	0,3
$1/v$	0,6
η_1	0,764

Prof. (m)	g (kN/m3)	g w (kN/m3)	s'v (kN/m2)	α	N (spt)	Penetração (cm)	Penetração (m)	Energia (J)	Força (kN)	S_u (kN/m2)
5	17	9,81	35,95	0,32	1	63,00	0,63	755,58	0,72	17,48
7	15	9,81	72,28	0,32	2	54,00	0,27	540,20	1,20	32,72
9	15	9,81	118,99	0,32	2	58,00	0,29	566,84	1,17	30,30
11	15	9,81	176,08	0,32	1	46,00	0,46	714,87	0,93	25,12
13	15	9,81	243,55	0,32	2	55,00	0,28	578,94	1,26	32,29
13	15	9,81	311,02	0,32	2	55,00	0,28	578,94	1,26	32,29
15	15	9,81	388,87	0,32	2	54,00	0,27	585,61	1,30	32,99
17	16	9,81	494,1	0,32	2	52,00	0,26	586,72	1,35	33,28
19	16	9,81	611,71	0,32	2	48,00	0,24	576,53	1,44	36,21
22	16	9,81	747,89	0,32	3	61,00	0,20	549,94	1,62	36,62
23	16	9,81	890,26	0,32	3	46,00	0,15	498,31	1,95	50,94
26	16	9,81	1051,2	0,32	4	54,00	0,14	482,94	2,15	52,31

8.2.3 – Aterro Experimental de Sarapuí

Outro caso disponível na literatura técnica é o do aterro de Sarapuí. Nesse local foram executados além da sondagem SPT, ensaios de Vane e ensaio traixiais UU.

A figura 8.7 apresenta o perfil de sondagem SPT obtidos por Ortigão (1980) e a figura 8.8 apresenta os resultados compilados de S_u obtidos por Ortigão e Collet (1986) e estimados no presente trabalho. Os valores de S_u estimados no presente trabalho estão apresentados na tabela 8.4, 8.5 e 8.6 para os perfis denominados de S1, S2 e S3 respectivamente (Figura 8.7). O valor do coeficiente de adesão utilizado no caso do aterro de Sarapuí foi de 0,5 obtido da Figura 8.2 considerando uma resistência não drenada no entorno de 15 kPa e um índice de plasticidade maior que 60%.

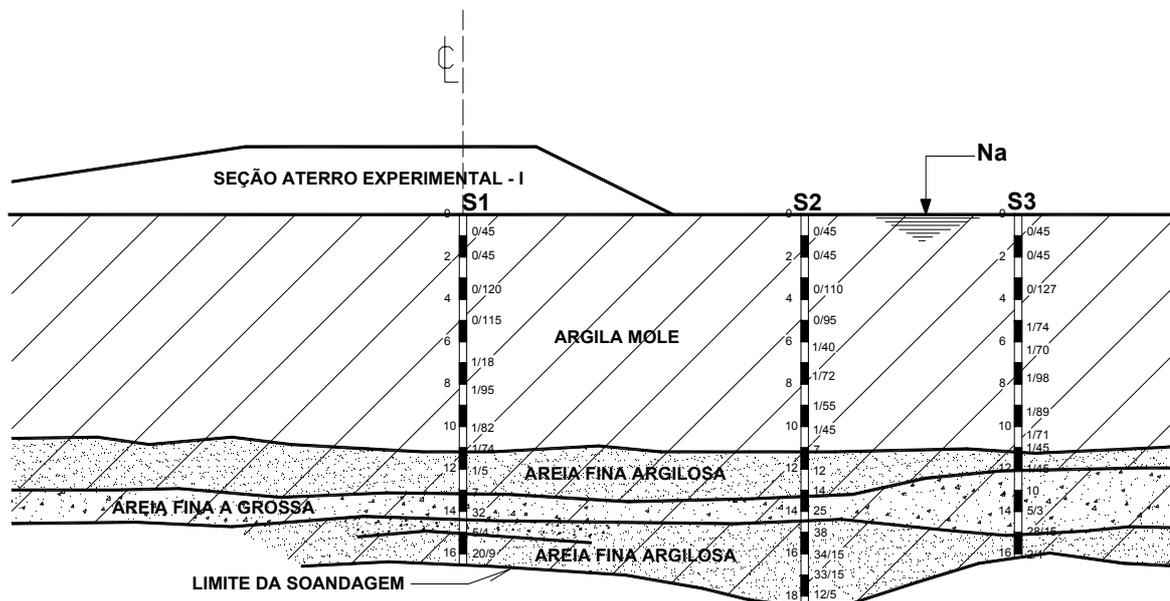


Figura 8.7 – Perfil de sondagem SPT – Aterro Experimental de Sarapuí, (Ortigão, 1980).

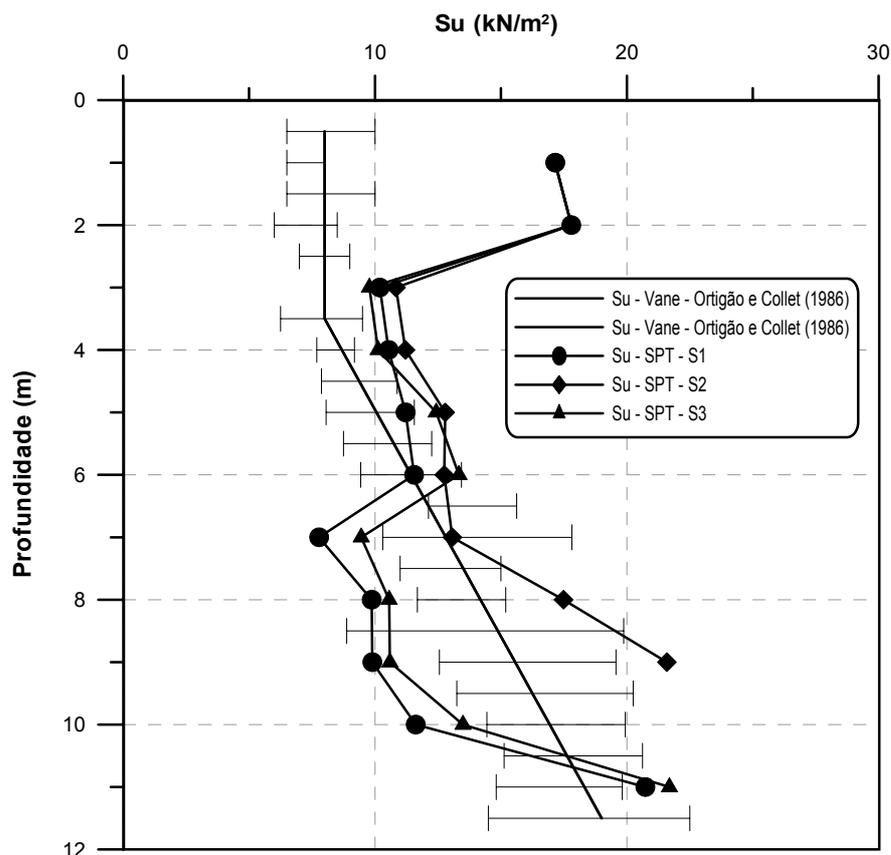


Figura 8.8 – Compilação de resultados de S_u obtidos por ensaio de Vane e a partir da presente proposta.

Tabela 8.4 – Cálculo de S_u a partir do SPT. – Aterro experimental de Sarapuú. - *S1*

Massa da haste	3,23 (kg/m)
Diâmetro do Amostrador	0,053 (m)
Nc argila	9
α	0,5
$1/v$	0,6
η_1	0,764

Prof. (m)	γ (kN/m ³)	γ_w (kN/m ³)	σ_v (kN/m ²)	N (spt)	Penetração (cm)	Penetração (m)	Energia (J)	Força (kN)	S_u (kN/m ²)
1	13,00	9,81	13,00	0	45	0,45	301,08	0,67	17,16
2	13,00	9,81	39,00	0	45	0,45	315,33	0,70	17,79
3	13,00	9,81	78,00	0	120	1,20	878,89	0,73	10,19
4	13,00	9,81	130,00	0	120	1,20	916,90	0,76	10,54
5	13,10	9,81	195,50	0	115	1,15	915,12	0,80	11,21
6	13,20	9,81	274,70	0	115	1,15	951,54	0,83	11,55
7	13,30	9,81	367,80	1	118	1,18	1161,37	0,59	7,78
8	13,40	9,81	475,00	1	95	0,95	1028,47	0,65	9,87
9	13,70	9,81	598,30	1	95	0,95	1052,95	0,67	9,90
10	13,80	9,81	736,30	1	82	0,82	977,40	0,72	11,62
11	14,00	9,81	890,30	1	47	0,47	719,87	0,92	20,73

Tabela 8.5 – Cálculo de S_u a partir do SPT. – Aterro experimental de Sarapuú. – **S2**

Massa da haste	3,23 (kg/m)
Diâmetro do Amostrador	0,053 (m)
N_c argila	9
α	0,5
$1/v$	0,6
η_1	0,764

Prof.	γ	γ_w	σ_v	N	Penetração	Penetração	Energia	Força	S_u
(m)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ²)	(spt)	(cm)	(m)	(J)	(kN)	(kN/m ²)
1	13,00	9,81	13,00	0	45	0,45	301,08	0,67	17,16
2	13,00	9,81	39,00	0	45	0,45	315,33	0,70	17,79
3	13,00	9,81	78,00	0	110	1,10	805,65	0,73	10,84
4	13,00	9,81	130,00	0	110	1,10	840,49	0,76	11,21
5	13,10	9,81	195,50	0	95	0,95	755,97	0,80	12,79
6	13,20	9,81	274,70	1	73	0,73	834,10	0,69	12,75
7	13,30	9,81	367,80	1	72	0,72	846,10	0,71	13,07
8	13,40	9,81	475,00	1	55	0,55	743,26	0,81	17,48
9	13,70	9,81	598,30	1	45	0,45	682,75	0,91	21,59

Tabela 8.6 – Cálculo de S_u a partir do SPT. – Aterro experimental de Sarapuú. – **S3**

Massa da haste	3,23 (kg/m)
Diâmetro do Amostrador	0,053 (m)
N_c argila	9
α	0,5
$1/v$	0,6
η_1	0,764

Prof.	γ	γ_w	σ_v	N	Penetração	Penetração	Energia	Força	S_u
(m)	(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kN/m ²)	(spt)	(cm)	(m)	(J)	(kN)	(kN/m ²)
1	13,00	9,81	13,00	0	45	0,45	301,08	0,67	17,16
2	13,00	9,81	39,00	0	45	0,45	315,33	0,70	17,79
3	13,00	9,81	78,00	0	127	1,27	930,16	0,73	9,78
4	13,00	9,81	130,00	0	127	1,27	970,39	0,76	10,12
5	13,10	9,81	195,50	1	74	0,74	821,35	0,67	12,43
6	13,20	9,81	274,70	1	70	0,70	814,38	0,70	13,33
7	13,30	9,81	367,80	1	98	0,98	1024,29	0,63	9,45
8	13,40	9,81	475,00	1	89	0,89	985,69	0,66	10,56
9	13,70	9,81	598,30	1	89	0,89	1008,53	0,68	10,59
10	13,80	9,81	736,30	1	71	0,71	892,98	0,75	13,49
11	14,00	9,81	890,30	1	45	0,45	703,98	0,94	21,69

Em todos os casos apresentados o ensaio SPT foi capaz de produzir valores de resistência não drenada dentro da faixa de dispersão estabelecida a partir de outros ensaios de campo e de laboratório. O SPT é reconhecido com uma ferramenta inadequada à estimativa de S_u devido ao amolgamento produzido pelo processo de perfuração. A abordagem proposta não elimina esta limitação, porém possibilita uma análise racional dos resultados que pode melhorar a confiabilidade das estimativas.

8.3 – EXEMPLO EM AREIAS.

A mesma metodologia utilizada para o caso das argilas pode ser empregada para as areias. Porém, neste caso decidiu-se por verificar se o método proposto pode reproduzir padrões de comportamento consagrados na literatura, seja através de análises estatísticas de bando de dados ou através de resultados de ensaios em câmara de calibração. No exemplo compara-se estimativas reproduzidas pela proposta desta tese com resultados obtidos por de Mello (1971). No seu trabalho, de Mello (1971), correlaciona o valor de N_{spt} com o ângulo de atrito de areias com a tensão efetiva. O estudo apresentado por Mello (1971) é fundamentado em uma análise estatística efetuada no banco de dados da U.S.B.R. (United States Bureau of Reclamation, Gibbs & Holtz, 1957, citados por de Mello, 1971).

Na análise de Mello (1971) postula que sendo a intenção básica meramente estabelecer uma correlação empírica estatisticamente válida em cima de uma tendência teoricamente aceitável, é razoável, como um primeiro passo, que atrito lateral e a resistência de ponta tenham uma mesma tendência. Postula ainda que as diferenças dos métodos de capacidade de carga em areias, largamente discutidos na literatura, são absorvidas pelo tratamento estatístico. Assim sendo, de Mello (1971) empregou a teoria idealizada por Prandtl-Cauchot-Buisman de capacidade de carga e assumiu que resultado do ensaio o SPT pode ser interpretado pela equação geral de resistência ao cisalhamento definida por: $\tau = c + \sigma \tan \phi$.

Com base no cálculo da capacidade de carga da ponta do amostrador (equação 8.8) e embasado na análise estatística de Mello (1971) chegou a equação 8.9.

$$q = c N_c + \sigma N_q \quad (8.8)$$

Onde: $N_c = (N_q - 1) \frac{1}{\tan \phi}$

$$N_q = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi}$$

c = coesão;

σ = tensão total.

$$N_{spt} = 4 + 0,015 \left\{ 2,4 \left[\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi} - 1 \right] \cdot \frac{1}{\tan \phi} + \sigma \left[\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi} \right] \right\} \pm 8,7 \quad (8.9)$$

Onde; o valor da coesão é igual a 2,4 t/m² (devido a não linearidade da curva para baixos níveis de tensão) e os valores de 4 e 0,015 foram obtidos segundo o ajuste da análise estatística; o valor de $\pm 8,7$ define a faixa que abrange 90% dos resultados. Nesta equação as unidades utilizadas são de toneladas força (tf) e metros (m).

Os resultados da equação 8.8 deram origem ao gráfico da Figura 8.9.

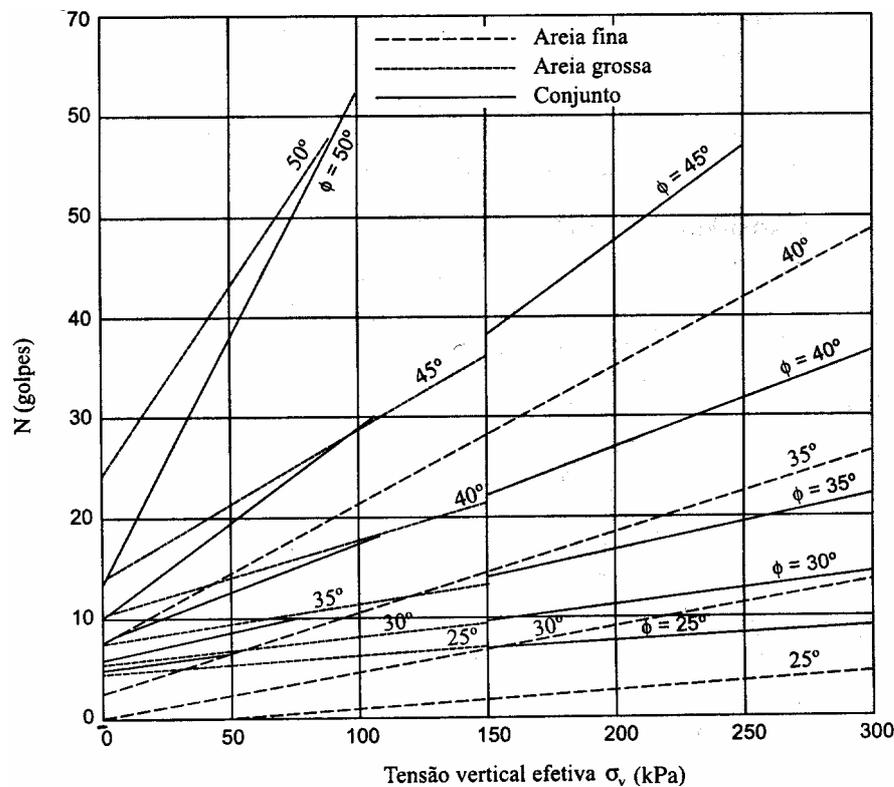


Figura 8.9 – Ângulo de atrito versus N_{spt} (de Mello, 1971).

Com base na metodologia apresentada nesta tese procurou-se reproduzir os dados obtidos por de Mello (1971). Para tanto, a partir da teoria da capacidade de carga de ponta proposta por Vesic e de atrito lateral proposta por Meyerhof estimou-se a força de reação do solo e com esta o valor de N_{spt} utilizando-se as equações abaixo:

$$F_e = A_p (c N_c + \sigma N_\sigma) + A_l (K_s \gamma L \tan \delta) \quad (8.10)$$

Onde: A_p = área da ponta do amostrador;

A_l = área lateral do amostrador = $\pi \cdot D \cdot h_a$;

h_a = 0,3 metros;

c = coesão;

N_c e N_σ = fatores de capacidade de carga;

$$\sigma_{oct} = \frac{1 + 2 \cdot K_o}{3} \cdot \sigma_v'$$

K_o = coeficiente de empuxo = $1 - \text{SEN}(\phi)$;

σ_v' = tensão efetiva vertical junto ao amostrador.

$K_s = 0.8$ (valores sugeridos por Broms (1965) entre de 0,5 a 1,0) (*);

$\delta = 20^\circ$ segundo Aas (1966), (*);

L = profundidade;

γ = peso específico do solo.

(*) - fonte livro de Fundações Profundas, Volume 2, de Velloso & Lopes, 2002;

A adoção dos métodos de Vesic para determinar a capacidade de ponta e de Meyerhof para atrito lateral não tiveram nenhum critério especial de escolha, foram simplesmente utilizados por serem de fácil utilização e disponíveis na literatura consultada.

Da equação 8.4 tem-se:

$$F_d = \frac{\eta_3 \eta_1 (0,75 M_m g) + \eta_3 \eta_1 (\Delta \rho M_m g) + \eta_3 \eta_2 (\Delta \rho M_h g)}{\Delta \rho} \quad (8.11)$$

Re-arranjando a equação 8.11 e introduzindo a equação 8.3, tem-se:

$$\Delta\rho = \frac{0,30}{N_{spt}} = \frac{\eta_3 \eta_1 (0,75 M_m g)}{F_e \cdot v - [\eta_3 \eta_1 (M_m g) + \eta_3 \eta_2 (M_h g)]} \quad (8.12)$$

Introduzindo a equação 8.10 na 8.12 e variando os valores de σ para diferentes valores de ϕ pode-se reproduzir o gráfico apresentado por de Mello (1971).

Os valores de N_c e N_σ utilizados na equação 8.10 são os da tabela 8.7. Para cada valor distinto de ϕ utilizou-se um valor distinto de “Ir” e conseqüentemente um valor de N_c e N_σ que estão apresentados em negrito na tabela 8.7, onde N_c são os valores superiores e N_σ os valores inferiores. O resultado da análise é apresentado nas figuras 8.10 e 8.11. A Figura 8.10 apresenta o resultado dos cálculos assumindo o valor da coesão igual a zero sobreposto aos resultados apresentados por de Mello (1971) para areias finas. A Figura 8.10 apresenta os resultados da presente análise considerando uma coesão de 24 kPa. Estes resultados estão sobrepostos aos resultados apresentados por de Mello (1971) obtidos pela equação 8.9. O valor da coesão adotado nesta segunda análise é o mesmo obtido por de Mello (1971). Porém o termo coesão aqui deve ser entendido com a adoção de uma constante à correção, já que a base de dados parecia sugerir que os valores não convergiam em direção à origem para tensões geostáticas próximas de zero.

Tabela 8.7 – Fatores de capacidade de carga N_c e N_σ segundo Vesic.(fonte Velloso & Lopes, 2002).

ϕ	Ir									
	10	20	40	60	80	100	200	300	400	500
25°	23,84	32,05	42,85	50,69	57,07	62,54	82,98	97,81	109,88	120,23
	12,12	15,95	20,98	24,64	27,61	30,16	39,70	46,61	52,24	57,06
30°	30,03	41,49	57,08	68,69	78,30	86,64	118,53	142,27	161,91	178,98
	18,24	24,95	33,95	40,66	46,21	51,02	69,43	83,14	94,48	104,33
35°	37,65	53,30	75,22	91,91	105,92	118,22	166,14	202,64	233,27	260,15
	27,36	38,32	53,67	65,36	75,17	83,78	117,33	142,89	164,33	183,16
40°	47,03	68,04	98,21	121,62	141,51	159,13	228,97	283,19	329,24	370,04
	40,47	58,10	83,40	103,05	119,74	134,52	193,13	238,62	277,26	311,50
45°	58,66	86,48	127,28	159,48	187,12	211,79	311,04	389,35	456,57	516,58
	59,66	87,48	128,28	160,48	188,12	212,79	312,04	390,35	457,57	517,58

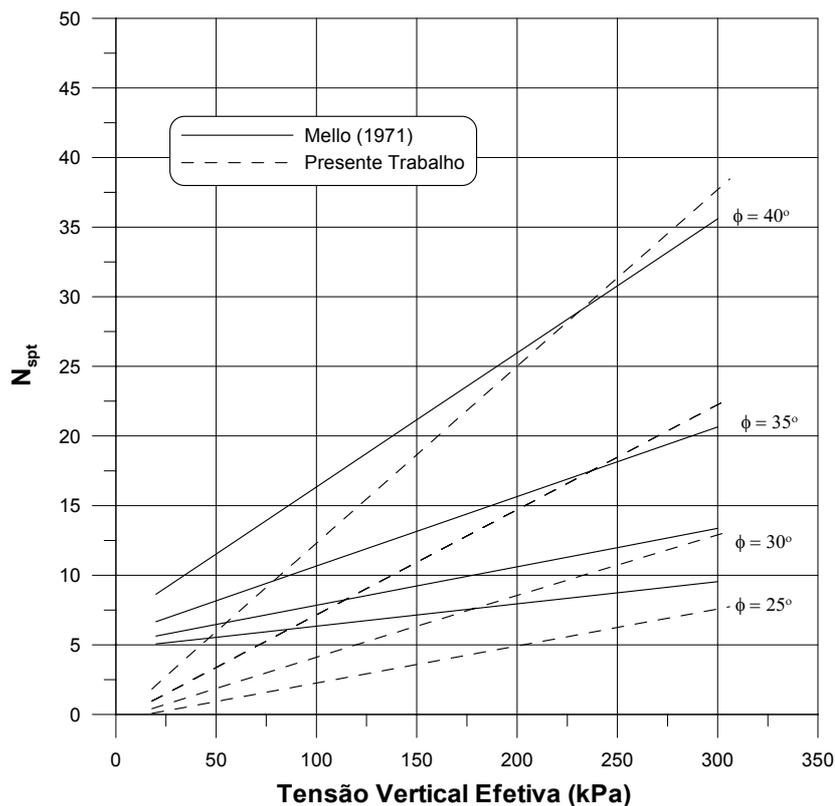


Figura 8.10 – Resultado para Areias (conjunto) com coesão igual a zero.

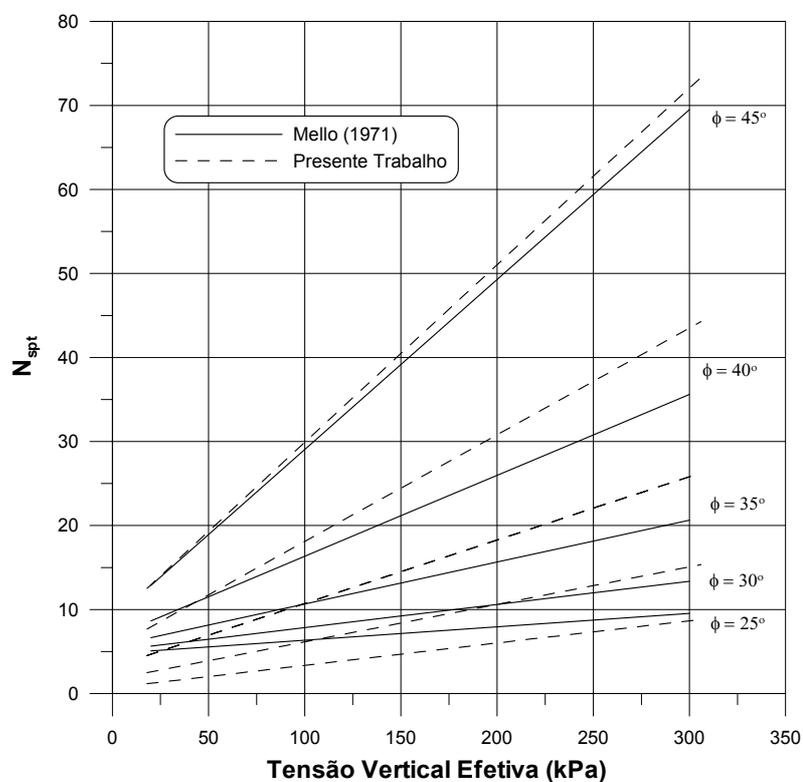


Figura 8.11 – Resultados para Areias (Conjunto) com coesão de 24 kPa.

Novamente observa-se que a abordagem proposta pode, de forma racional, reproduzir os padrões de comportamento estabelecidos a partir da base de dados do *United States Bureau of Reclamation*. A aplicabilidade deste método racional de análise fica claramente evidenciada, não sendo mais necessário ou justificável lançar mão de regressões estatísticas, sem que os coeficientes matemáticos tenham qualquer representação física dos fenômenos envolvidos.

A análise efetuada está sujeita a críticas tendo em vista que o peso da haste, tipo de martelo, sistema de elevação do martelo, ou seja, fatores que afetam o resultado não são conhecidos. Contudo, devido à equação 8.12 ser linear é de se esperar pequenas translações nas retas obtidas no presente estudo. Este fato, contudo não inviabiliza o objetivo deste trabalho que é simplesmente de mostrar a possibilidade de se obter uma interpretação racional do SPT.

8.4 - COMENTÁRIOS FINAIS

O objetivo do presente capítulo está longe de propor correlações de N_{spt} com resistência não drenada das argilas e o ângulo de atrito das areias, mas sim apontar para possíveis caminhos e metodologias a serem seguidos por trabalhos futuros.

Os resultados aqui encontrados tanto para argilas como para areias, segundo o autor desta tese, são extremamente satisfatórios e podem com base em uma pesquisa mais aprofundada conduzir a relações válidas entre S_u ou ϕ com N_{spt} . Uma outra abordagem que pode ser útil à prática de engenharia consiste na estimativa da tensão de ruptura do solo a partir do valor F_d . Este valor de tensão de ruptura poderá ser eventualmente empregado no cálculo de capacidade de carga de fundações nos moldes das propostas de cálculo de capacidade de carga sugeridos para o ensaio de cone.

Conclui-se que a metodologia apresentada nos capítulos 6 e 7 e exemplificada neste abrem uma enorme gama de possibilidades para interpretação do ensaio SPT a partir de métodos racionais de análise, através, por exemplo, de correlações entre parâmetros de resistência e N_{spt} .

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nesta tese são apresentados resultados experimentais e numéricos de ensaios SPT realizados sob condições de contorno rigorosamente controladas ao longo da penetração. Com base nestes experimentos desenvolveu-se uma nova proposta de interpretação do ensaio SPT fundamentada na variação da energia ao longo do processo da cravação do amostrador no solo devido à aplicação de um golpe do martelo, que se constitui na contribuição mais relevante da presente pesquisa.

As diversas etapas de trabalho que compõem a pesquisa produziram informações relevantes ao estado do conhecimento, sendo as principais conclusões itemizadas a seguir:

9.1 - CONCLUSÕES

9.1.1 - Instrumentação

O monitoramento de energia da onda de compressão que percorre a haste devido à aplicação de um golpe do martelo deve necessariamente ser executado através do uso de uma célula de carga de um par de acelerômetros.

A energia transferida deve ser calculada através da integração do produto da força pela velocidade, ao longo do tempo. A velocidade é obtida pela integração do sinal de aceleração obtido nos acelerômetros. O intervalo de tempo em que se efetua a integração, para o cálculo da energia, é tal que todos os impactos subseqüentes contidos em um golpe sejam considerados mesmo para hastes longas. Nesse intervalo de tempo é maior para hastes mais longas e solos menos resistentes.

9.1.2 - Tratamento do sinal

No Brasil e em outros países, a análise dos padrões de energia monitorados durante a penetração do amostrador é realizada através de um software numérico comercializado pela empresa americana PDI (Pile Dynamics Incorporation). Este programa não esclarece aspectos relacionados aos padrões de filtragem, correção e tratamento de sinais. Considerou-se portanto fundamental ao domínio do conhecimento nesta área desenvolver um sistema que adquira o sinal na sua forma primária a fim de que posteriormente este sinal possa através de técnicas numéricas ser filtrado, corrigido e tratado. O sistema de tratamento de sinal (filtragem numérica através da transformada de Fourier; correção apropriada do zero, rebatimento do sinal através da subtração de uma reta) utilizado nesta tese está longe de ser o ideal sob o aspecto de automação, contudo tem-se um total domínio sobre o sinal. O conhecimento das operações efetuadas sobre o sinal é fundamental para o domínio tecnológico.

9.1.3 - Interpretação de sinais

Os trabalhos clássicos de monitoramento de energia no ensaio SPT recomendam que a interpretação seja restrita à primeira onda de compressão, assumindo-se que as ondas subseqüentes não contribuem na cravação do amostrador no solo (e.g. Schmertmann & Palácios, 1979). Os resultados apresentados nesta pesquisa não corroboram esta afirmação. Ao contrário sugere-se necessário integrar os sinais de força e aceleração para tempos superiores a $2\ell/c$, levando-se em consideração os vários impactos produzidos após a liberação do martelo para avaliação da energia efetivamente transferida ao solo. Tem-se assim, como conseqüência direta, a necessidade de se analisar o ensaio como um fenômeno de grandes deslocamentos, o que é consistente com o fato do SPT produzir uma medida de ruptura do solo. Uma vez que se consideram grandes deslocamentos, deve-se obrigatoriamente considerar o deslocamento registrado pelo martelo além dos 75 centímetros de altura de queda inicial. Como conseqüência, os valores de energias transferidos à composição são maiores, salvo perdas, do que aqueles assumidos até então como a máxima energia potencial de referência considerada no meio técnico de 478 J.

Quando se consideram os golpes subseqüentes, e principalmente no caso de solo de baixa resistência, o período de tempo necessário para que todo o processo de cravação do amostrador ocorra é significativamente maior que $2\ell/c$. Nesses casos é fundamental para a

correta avaliação da energia que os sinais de força e de aceleração sejam adquiridos por um período maior de tempo que garanta a aquisição de todos os sinais necessários à interpretação.

Ao se considerar grandes deslocamentos, a variação da energia potencial da haste entre o instante imediatamente antes do impacto até o instante em que toda a energia cinética e elástica já tenha sido dissipada passa a ser relevante. Estudos que visam avaliar a importância do comprimento da haste e ou da seção no valor de N_{stp} devem seguramente levar em consideração esta variação de energia.

A correta avaliação da variação da energia entre os instantes antes do golpe e após a cravação do amostrador possibilita a determinação da energia total entregue ao solo. Com o valor do trabalho determinado é possível obter, considerando a magnitude da penetração, o valor da força dinâmica resultante de reação do solo. Este fato além de dar ao SPT uma base teórica à análise do ensaio, abre um leque para novas interpretações e correlações.

O valor da variação da energia pode ser determinado pela equação apresentada a seguir:

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

onde:

$$\eta_1 = 0,76$$

$$\eta_2 = 1,00$$

$$\eta_3 = 1 - 0,0042\ell \quad (\text{no presente trabalho})$$

$$\eta_3 = 0,907 - 0,0066\ell \quad (\text{dados de Cavalcante (2002) re-analisados no presente trabalho})$$

Com base nos ensaios realizados, e reforçados pela re-análise dos resultados de Cavalcante (2002), pode-se determinar os valores das eficiências η_1 , η_2 e η_3 que consideram as perdas do golpe do martelo sobre a cabeça de bater e as perdas ocorridas ao longo das hastes devido à presença das luvas, possibilidade de flambagem, hastes mal atarraxadas, etc. Como

para a determinação do valor de η_1 se considera a penetração, este valor já vem deduzido das perdas por atrito nos cabos, do pino guia na cabeça de bater, o que implica que no valor de η_1 só são consideradas as perdas efetivamente decorrentes do choque e da transferência de energia. Como os equipamentos utilizados no Brasil são similares é de se esperar valores de η_1 muito próximos para os equipamentos que seguem as recomendações da NBR 6484. Contudo esta observação é prematura e deve ser cuidadosamente avaliada e valores de eficiência regionais devem ser avaliadas.

O valor das perdas ao longo da haste é função do seu comprimento e quanto maior o comprimento da haste maior será o valor das perdas. Portanto, hastes curtas ou tendendo a um comprimento nulo terão eficiências maiores. Esta conclusão vai de encontro com a conclusão apresentada por Aoki e Cintra (2000).

Finalmente, com relação ao comprimento da haste ou a influência da sua massa no valor do N_{stp} , esta só pode ser avaliada corretamente quando se considera a variação da energia ocorrida na haste durante o processo de cravação do amostrador.

9.2 – SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

9.2.1 – Quanto ao equipamento

O equipamento desenvolvido no presente trabalho é uma tentativa de desenvolvimento tecnológico na aquisição dos sinais de força e de aceleração gerados devido à aplicação de um golpe do martelo sobre a haste de sondagem. Este trabalho difere dos trabalhos pioneiros de Belincanta (1985) e posteriormente de Menezes & Sobrinho (1994) ao utilizar sinais de aceleração e força ao invés de somente sinais de força.

Existem aspectos técnicos a serem considerados que podem facilitar ou melhorar o sistema de monitoramento. O equipamento desenvolvido não possui um sistema de disparo para o deflagrar o início da aquisição do sinal. Este sistema que deflagra o início da aquisição dos sinais é denominado de *trigger*. Quanto a amplificador desenvolvido tara-se de um

amplificador de tensão que por isso o sinal é dependente do comprimento do cabo de conexão. Um amplificador de carga seria mais indicado para esta finalidade.

Os acelerômetros adquiridos no presente trabalho são da marca Bruel & Kjaer. São acelerômetros de alta qualidade, extremamente sensíveis e sofrem interferências de movimentos não axiais. Durante a realização dos ensaios percebeu-se que picos de aceleração eram registrados, distorcendo o sinal. Estes picos provavelmente são decorrentes de vibrações não axiais que devido à alta sensibilidade do acelerômetro introduz erros no sistema. Recomenda-se a utilização de outros acelerômetros, talvez mais robustos, e que são projetados para suportar as vibrações laterais que ocorrem normalmente em um ensaio de SPT.

9.2.2 – Quanto ao programa de simulação numérica.

O programa de simulação numérica desenvolvido mostrou ser uma excelente ferramenta para a interpretação e o entendimento de todo o fenômeno de propagação de uma onda na composição do ensaio SPT, a contar desde o início do processo até a o término da cravação do amostrador. Ao longo desse tempo o programa permite conhecer como a onda se propaga, devido à aplicação de um golpe, no interior da haste com toda a evolução das distintas energias e promover o perfeito entendimento de como o amostrador é cravado no solo. Na atual implementação o programa possui para representar a força de reação do solo o modelo original de Smith. Para aumentar sua potencialidade e permitir análises mais realistas sugere-se implementar outros modelos que representem o comportamento do solo.

9.2.3 – Quanto à continuidade do programa experimental

O sistema desenvolvido no presente trabalho não possui um sistema de *trigger* para efetuar o disparo do programa de aquisição de sinal imediatamente antes do início do golpe. Por este motivo muitos golpes foram perdidos aumentando o trabalho de campo. Associados a este fato a provável elevada sensibilidade inerente aos acelerômetros adquiridos fez com que vibrações laterais inerentes ao ensaio proporcionassem sinais distorcidos e conseqüentemente rejeitados. Este fato levou a um número reduzido de sinais aceitos. Portanto, sugere-se novas campanhas de ensaios tanto de campo como sob condições controladas, nos moldes dos

realizados nesta tese, para aumentar o banco de dados e determinar com maior acurácia os valores de η_1 , η_2 e η_3 .

Para uma maior confiabilidade na equação acima descrita, com vista a ser esta uma expressão a ser utilizada na prática da engenharia, é fundamental um maior número de ensaios para efetivamente verificar diferentes equipamentos e suas energias correspondentes. O objetivo desta avaliação é de aferir os valores de η_1 , η_2 e η_3 e determinar valores que representem a prática regional para permitir a transposição de conhecimentos.

9.3 – QUANTO A NBR 6484 DE 2001.

O autor desta tese concorda com os moldes e rigorismos contidos na atual versão da norma brasileira de sondagem. A grande maioria das empresas de sondagens possui equipamentos essencialmente manuais, similares aos desenvolvidos no início do século passado. Estes equipamentos ainda serão utilizados por muitos anos, pois sua robustez e simplicidade fazem com que facilmente o equipamento seja levado a pontos inóspitos onde equipamentos modernos, montados sob chassi de um caminhão, não chegariam. Contudo é fundamental que os equipamentos permaneçam rigorosamente atrelados às especificações da referida norma e obedeçam aos procedimentos de referência internacional. Adicionalmente a comunidade técnica deve exigir que as empresas executoras de sondagem sigam rigorosamente as normas e recomendações.

Para a interpretação da sondagem dentro do exposto neste trabalho é conveniente que seja registrada a penetração para cada golpe. Esta penetração poderá ser registrada com a trena já contida no rol de material básico de uma equipe de sondagem. Esta recomendação contudo elevaria em muito o tempo de sondagem. Objetivando tornar prática esta medida sugere-se que a mesma seja efetuada sistematicamente para solos com valores de N_{spt} menores do que 5 golpes e nos casos em que se desejar estimar os valores de eficiência.

CAPÍTULO 10

BIBLIOGRAFIA

- ABEF (1999) – **Manual de Especificações de Produtos e Procedimentos ABEF** – 2ª edição, Editado pela Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia.
- ABOUT-MATAR. H & COBLE,G.G.(1997), **SPT Dynamic Analysis and Measurements**, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering – ASCE – vol 123. n. 10, pp 921-928.
- ABOUT-MATAR. H & COBLE,G.G.(1999), **Closure by SPT Dynamic Analysis and Measurements**, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering – ASCE – vol 125. n. 6, pp 535-536.
- ABOU-MATAR, H.; RAUCHE, F.; THENDEAN, G.; LINKINS, G.; GOBLE, G. (1996) **Wave equation soil constants from dynamic measurements on SPT**. In: International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, 5.
- AOKI,N.; CINTRA, J.C.A.; (2000) **The application of energy conservation Hamilton's principle to the determination of energy efficiency in SPT tests**. Proceedings of the Sixth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, São Paulo, p. 457 to 460
- ASTM (1992) **Penetration test and split-barrel sampling of soils**. D1586-84, Vol 04.08. – pg 137 até141.
- BELINCANTA, A. (1985) **Energia dinâmica no SPT, resultados de uma investigação teórico experimental**. São Paulo. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da USP.
- BELINCANTA, A. (1989) **Avaliação de Fatores Intervenientes no Índice de Resistência à Penetração do SPT**. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- BELINCANTA, A.; ALVIN, F.M.; NAVAJA, S.S.; RAMIRES SOBRINHO, R. (1984) **Métodos para medida de energia dinâmica no SPT**. Solos e Rochas, ABMS, v.17, n.2, p.93-110, ago.
- BELINCANTA, A.; DIONISI, A.; MACHADO, J.R.A.; ALVIN, F.M.; RAMIRES SOBRINHO, R.; NAVAJA S.S.; TACHIBANA, L.S. (1994) **Medidas de energia dinâmica no SPT, sistema IPT**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 10, Foz do Iguaçu. Anais, ABMS, v.2, p.507-514.

- BERNARDES, GEORGE P. (1989) **Dynamic And Static Testing of Large Model Piles in Sand** – Thesis of Doctor of Engineering - Institutt for Geoteknikk – Norwegian Institute of Technology.
- BOULANGER, R.W. & IDRIS, I.M. (1999), **Discussion on SPT Dynamic Analysis and Measurements**, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering – ASCE – vol 125. n. 6, pp 534-535.
- BROMS, B.B.; FLODIN, N. (1988) **History of penetration testing**. In: International Symposium on Penetration Testing, 1, ISOPT I, Orlando. Proceedings. v.1, p. 157-220.
- BUTLER, J.J.; CALIENDO, J.A.; GOBLE, G.G. (1998) **Comparison of SPT energy measurement methods**. In: International Conference on Site Characterization, ISC'98, Atlanta. Proceeding, v.2. p.901-906.
- CAMPANELLA, R.I.G.; SY, A. (1994) **Recent development in energy calibration of penetration tests at UBC**. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 13, New Delhi. Proceedings, v.4, p.151-157.
- CAVALCANTE, E., H. (2002) **Investigação Teórico-Experimental sobre o SPT**, Rio de Janeiro - Tese de doutorado – COPPE/UFRJ
- CLAYTON, C.R.I (1990), **SPT Energy Transmission: Theory Measurement and Significance**, Ground Engineering, vol. 23, n10, pp. 35-43.
- COUTINHO, R. Q.; OLIVEIRA, J.T.R; DANZIGER, F.A.B. (1993) – “**Caracterização Geotécnica de uma Argila Mole do Recife**”, Revista Solos e Rocha, Vol. 16, n.4, pp. 255-266.
- COUTINHO, R. Q.; OLIVEIRA, J.T.R; OLIVEIRA, A.T.J. (2000) – “**Geotechnical Properties of Recife Soft Clays**”, Revista Solos e Rocha, Vol. 23, n.3, pp. 177-203.
- DÉCOURT, L.; QUARESMA FILHO, A.R. (1994) **Practical applications of the standard penetration test complemented test complemented by torque measurement SPT-T**, present stage and future trends. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 13, New Delhi. Proceedings, v.4, p.143-146.
- FAIRHUST, C. (1961) **Wave Mechanics of Percussive Drilling**, Mine & Quarry Engineering, Vol. 27, n. 3 March, pp. 122-130; vol. 27; n.4; April, pp 169-178; vol., n. 7 , July, pp. 327-328.
- FARRAR, J.A. (1998) **Summary of Standard Penetration Test (SPT) energy measurement experience**. In: International Conference on Site Characterization, ISC'98, Atlanta. Proceeding, v.2, p.919-926.
- FLETCHER, G.F.A. (1965) **Standard Penetration test: its uses and abuses** Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v.91, n.SM4, p.67-77, July.

- FUJITA, K. (2000) – **Keynote lecture: Frequency characteristics of stress wave and penetration during SPT**. Proceedings of the Sixth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, São Paulo, p. 451 to 455.
- FUJITA, K.; OHNO, M. (2000) – **Stress wave theory application to standard test in Japan**. Proceedings of the Sixth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, São Paulo, p. 469 to 475.
- GONÇALVES, C.; ANDREO, C. S.; BERNARDES, G. P.; FORTUNATO, S. G. S. (2000) **Controle de Fundações Profundas Através de Métodos Dinâmicos**, Livro editado pelos próprios autores.
- GEISSER, R.F. (1966) **Discussion of “standard penetration test: its uses and abuses”**. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v.92, n.SM2, p.184-185, mar.
- IRELAND, H.O. (1966) **Discussion of “standard penetration test: its uses and abuses”**. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v.92, n.SM2, p.189-190, mar.
- IRELAND, H.O.; MORETO, O.; VARGAS, M.(1970) **The dynamic penetration test: A standard that is not standardized**. Géotechnique, 20, n.2 p.185-192.
- ISSMFE, (1989) **Technical Committee on Penetration Testing of Soils**, TC 16. Report on Reference Test Procedure CPT-SPT-DP-WST. Rio de Janeiro.
- KOVACS, W.D.; EVANS, S.C.; GRIFFITH, A.L. (1977) **Towards a more standardized SPT**. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 9, Tokio. Proceedings, v.2, p.269-276.
- KOVACS, W.D. (1979) **Velocity measurement of free-fall SPT hammer**. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, v.105, n.GT1, p.1-10, Jan.
- KOVACS, W.D. (1990), **What Constitutes a Turn?**, Geotechnical Testing Journal, vol. 3, n.3, pp. 127-130.
- KOVACS, W.D.; SALOMONE, L.A. (1982) **SPT hammer energy measurements**. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, v.108, n.GT4, p.559-620, apr.
- KOVACS, W. D. & SALOMONE, L. A. (1984), **Closure of Discussion on SPT Hammer Energy Measurements**, Journal of Geotechnical Engineering – ASCE – vol. 110, n.4, pp. 562-563.
- KOWACS, W. D. (1981), **Results and Interpretation of SPT Practice Study**, Technical Note on Geotechnical Testing Journal – ASTM – vol.4, n.3, pp. 126-129
- LIANG, R.Y.; SHENG, Y. (1993) **Wave equation parameters from driven rod test**. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, v.119, n.6, p.1037-1057, Jun.

- LIAO, S.S.C. & WHITMAN, R.V. (1986), **Overburden Correction Factors for SPT in Sand**, Journal of Geotechnical Engineering – ASCE – vol. 112, n.3, pp. 373-377.
- LO PINTO, V. (1966) **Discussion of “standard penetration test: its uses and abuses”**. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v.92, n.SM1, p. 195-196.
- MARCUSON, W.F.; BIEGANOUSKY, W.A. (1977) **Laboratory standard penetration test on fine sands**. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, v.103, n.GT6, p.565-588.
- MATSUMOTO, T.; SERIGUSHI, H.; YOSHIDA, H.; KITA, K. (1992) **Significance of two point strain measurement in SPT**. Soil and Foundation, JSSMFE, v.32,n.2, p.67-82, jun.
- 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.
- MOHR, H.A. (1966) **Discussion of “standard penetration test: its uses and abuses”**. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v.92, n.SM1, p.196-199, Jan.
- NBR 12004 – Solo – **Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos**.
- NBR 12051 – Solo – **Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos**.
- NBR 6484 – Solo – **Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de Ensaio**. – Fev. 2001.
- ORTIGÃO, J. A. R. & COLLET, H.,B. (1986) **“A Eliminação de Erros de Atrito em Ensaios de Palheta”** – Revista Solos e Rocha, Vol. 9, n. 2, pp. 33-45.
- PALACIOS, A (1977) **The Theory and Measurement of Energy Transfer During Standard Penetration Test Sampling**. Florida . Dissertation for the degree of doctor in philosophy – University of Florida.
- PARSON, J.D. (1966) **Discussion of “Standard penetration test: its uses and abuses”**. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, n.SM3, p.103-105, may.
- RAUCHE, F.; THEADEAN, G.; ABOU-MATAR, H.; LIKENS, G.; GOBLE, G. (1994) **Investigation of dynamic and static pile behavior from modified standard penetration test**. In Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações – Cobramsef, 10, Foz do Iguaçu. Anais, ABMS, v.pós-congresso, p.3-32.
- RENAU, F.F. (1966) **Discussion of “standard penetration test: its uses and abuses”**. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v.92, n.SM2, p.187-189, mar.

- RIGGS, C.O., SHMIDT, O.N. & RASSIEUR, C.L. (1983), **Reproducible SPT Hammer Impact Force with an Automatic Free Fall SPT Hammer System**, Geotechnical Testing Journal – ASTM – vol.6, n.3, pp.201-209.
- RIGGS, C. O, MATHES, G.M. & RASSIEUR, C.L. (1984), **A Field Study of an Automatic SPT Hammer System**, Geotechnical Testing Journal – ASTM – vol.7, n.3, pp. 158-163.
- ROBERTSON, P.K., WOELLER, D.J. & ADDO, K.O. (1982), **Standard Penetration Test Energy Measurements Using a System Based Upon The Personal Computer**, Canadian Geotechnical Journal, vol. 29, n.4, pp.551-557.
- ROCHA, M.M. (198
- SCHMERTMANN, J.H. (1966) **Discussion of “standard penetration test: its uses and abuses”**. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, n.SM5, p.130-133.
- SCHMERTMANN, J.H. (1979) **Statics of SPT. Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE, v.105, n.GT5, p.655-670, may.
- SCHMERTMANN, J.H.; PALACIOS, A. (1979) **Energy dynamics of SPT**. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v.105, n.GT8, p.909-926, aug.
- SCHNABEL, J.J. (1966) **Discussion of “standard penetration test: its uses and abuses”**. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v.92, n.SM2, p.184, mar.
- SCHNAID,F.; NACCI, D.; MILITITSKY,J. (2001) – **Aeroporto Internacional Salgado Filho – Infra-estrutura Civil e Geotecnia**, Editora Sagra Luzzatto, 222pp.
- SCHNAID,F; SOARES, J.M.D.; MÁNTARAS, F.M. (1998) – **“Ensaio de Campo: Técnica Insostituível à Engenharia Geotécnica”** – I Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul” – Porto Alegre – pp. 9-41.
- SEED, R.B.; HARDER, L.F. Jr.; YOUNG, T.L. (1988) **Effects of Borehole Fluid on Standard Penetration Test Results**. Geotechnical Testing Journal, ASTM, v.11, n.4, p.248-256, dec.
- SEED, R.B.; TOKIMATSU, K.; HARDER, L.F.; CHUNG, R.M. (1985) **Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations**, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, No. 12, pag 1425 , 1445.
- SIMONS, N.E & MENZIES, B. K. (1981) **“Introdução à Engenharia de Fundação”** – Editora Interciência – pp. 199.
- SMITH, E.A.L. (1960) **Pile-Driving Analysis by the Wave Equation**, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE – vol. 86, n. SM4, pp. 25-61.

- SKEMPTON, A. W. (1986) **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.
- SKOV, R. (1982) **Evaluation of Stress Wave Measurements**, DMT Gründungstechnik, Hamburg, Germany.
- SY, A & CAMPANELLA, R.G. (1993) **Standard Penetration Test Energy Measurements Using a System Based Upon The Personal Computer**, Canadian Geotechnical Journal, n.30, pp.876-882
- STUBBINGS, J. (1966) **Discussion of “standard penetration test: its uses and abuses”.** Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, v.92, n.SM2, p. 185-189, mar.
- TEIXEIRA, A. H. (1947a) **A padronização da sondagem de simples reconhecimento.** In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, 5, São Paulo. Anais, ABMS, v.3, p. 1-22.
- TEIXEIRA, A. H. (1947b) **Sondagens - Relato.** Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, 5, São Paulo. Anais, ABMS, v.4, p.32-42.
- TEIXEIRA, A. H. (1977) **Sondagens.** Prospecção do Subsolo, Recife. Anais, ABMS-NE, v.único, p.39-61.
- TEIXEIRA, A. H. (1993) **Solos do Interior de São Paulo. Um aperfeiçoamento das sondagens de simples reconhecimento à percussão.** São Carlos, ABMS, cap. 4, p.77-93.
- VELLOSO, D.A. & LOPES, F.R (2002) – **Fundações** – Volume 2 – Editora COPPE, 472pag.