

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MEDIDA DE ENERGIA DO DPL COM
INSTRUMENTAÇÃO DINÂMICA**

**LUIZ CARLOS DE FIGUEIREDO
ORIENTADOR: RENATO PINTO DA CUNHA
COORIENTADOR: WILSON CONCIANI**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: G.TD-122/16**

BRASÍLIA/DF: Setembro/2016

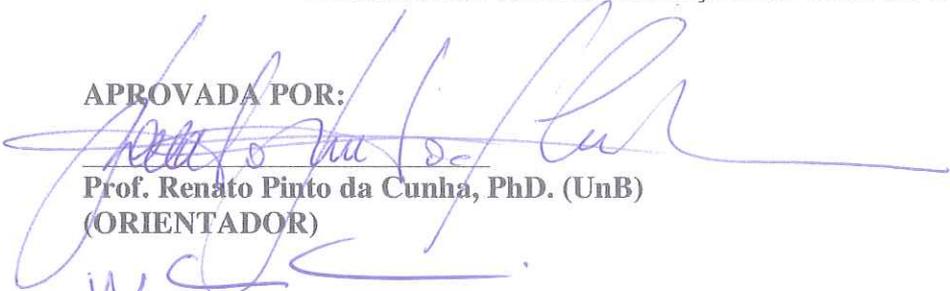
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

MEDIDA DE ENERGIA DO DPL COM
INSTRUMENTAÇÃO DINÂMICA

LUIZ CARLOS DE FIGUEIREDO

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR

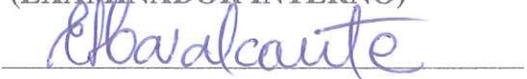
APROVADA POR:


Prof. Renato Pinto da Cunha, PhD. (UnB)
(ORIENTADOR)


Prof. Wilson Conciani, DSc. (IFB)
(COORIENTADOR)


Prof. Juan Félix Rodriguez Rebolledo, PhD. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)


Prof. Gregório Luís Silva Araújo, DSc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)


Prof. Erinaldo Hilario Cavalcante, DSc. (UFCG)
(EXAMINADOR EXTERNO)


Prof. Neusa Maria Bezerra Mota, DSc. (UniCEUB)
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 02 de setembro de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

FIGUEIREDO, LUIZ CARLOS DE.

Medida de Energia do DPL com Instrumentação Dinâmica, 2016

xxvi, p., 215 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2016)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Medida de Energia 2. Penetração Dinâmica 3. DPL

I. ENC/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FIGUEIREDO, L. C (2016). Medida de Energia com Instrumentação Dinâmica. Tese de Doutorado em Geotecnia, Publicação G.TD-122/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 215 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Luiz Carlos de Figueiredo

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Medida de Energia do DPL com Instrumentação Dinâmica.

GRAU: Doutor ANO:2016

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Luiz Carlos de Figueiredo

Rua Tereza Lobo, 60 Apto. 301

Concil - 78.048-670 – Cuiabá/MT - Brasil

lucafi13@gmail.com

DEDICATÓRIA

*A DEUS Provedor de tudo que há e que me permitiu
descobrir a beleza que se extrai dos conhecimentos
acumulados na Geotecnia.*

HOMENAGEM PÓSTUMA

A Carlos e Nelly meus primeiros guias na busca do conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Esta tese de doutorado foi possível devido ao esforço conjunto da Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso e do Programa Dinter patrocinado pela CAPES. Minha gratidão ao Professor Renato pela dedicação na labuta de orientar esta tese, ao professor Conciani pelo estímulo ao estudo realizado, ao professor Fachine que inspirou o uso de dispositivos embarcados de tecnologia MEMS, ao Professor Tony Silva que não mediu esforços para construir uma placa de captura de sinais de célula de carga, ao Professor Irênio Amaro, companheiro de manhãs, tardes e noites na realização dos ensaios, à Professora Silvana Fava Marchezini que compartilhou das angústias mais íntimas deste trabalho. Por último, mas não menos importante a todos aos meus familiares aos quais singularizo na pessoa da minha neta Ana Luiza.

RESUMO

Esta tese de doutorado aborda a medição de energia com instrumentação dinâmica para o penetrômetro leve conhecido como Dynamic Probing Light ou DPL e cujos ensaios são guiados pela *International Reference Test procedure for dynamic probing (DP). Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils – TC 16 with Reference Test Procedures - ISSMFE (1989)*. A região central do planalto brasileiro, apresenta extensas áreas com solos de baixa resistência à penetração dinâmica do SPT que resulta no aumento da incerteza para a estimativa de carga, baseada nesse penetrômetro dinâmico. A presença no cenário da investigação geotécnica do DPL não se constitui em novidade, mas ainda não se conhece os parâmetros oriundos da medição de energia para esse penetrômetro leve. A medição da energia transferida às hastes do DPL foi feita com o uso de células de carga e acelerômetros. As células de carga foram instaladas em dois pontos: no topo e próximo do cone do DPL. Baseado na Equação da onda, foi empregado o método que considera os registros de força e velocidade no mesmo domínio do tempo, denominado EFV. A eficiência da energia do DPL foi considerada em relação à penetração permanente do cone do DPL. A medida da eficiência de energia conduziu a uma formulação da força dinâmica por penetração permanente do DPL, associada ao comprimento da haste penetrada no solo. Por fim, é apresentado um exemplo prático de aplicação da medida de energia do DPL para a engenharia com a formulação de um método para o cálculo da capacidade carga para estaca. O método tem por base a força dinâmica absorvida pelo solo, considerando o comprimento máximo de haste do DPL em 10 metros de profundidade.

Palavras chaves: Medida de energia, Penetração dinâmica, DPL

ABSTRACT

This PhD thesis deals with energy measurement with dynamic instrumentation for the light penetrometer known as Dynamic Probing Light or DPL and whose tests are guided by the International Reference Test Procedure for Dynamic Probing (DP). Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils - TC 16 with Reference Test Procedures - ISSMFE (1989). The central region of the Brazilian plateau presents extensive areas with soils of low resistance to the dynamic penetration of the SPT that results in the increase of the uncertainty for the estimative of load, based on these dynamic penetrometer. The presence in the DPL geotechnical research scenario is not new, but the parameters of energy measurement for this light penetrometer are not yet known. The energy transferred to the DPL rods was measured using load cells and accelerometers. The load cells were installed at two points: at the top and near the DPL cone. Based on the wave equation, the method that considers force and velocity records in the same time domain, called EFV, was used. The energy efficiency of the DPL was considered in relation to the permanent penetration of the DPL cone. The measurement of the energy efficiency led to a formulation of the dynamic force by permanent penetration of the DPL, associated to the length of the rod penetrated in the soil. Finally, a practical example of application of the DPL energy measure for engineering is presented with the formulation of a method for the calculation of the load capacity for cuttings. The method is based on the dynamic force absorbed by the soil, considering the maximum stem length of the DPL in 10 meters of depth.

Keywords: Energy measurement, Dynamic Penetration, DPL

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	JUSTIFICATIVA.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	3
1.3	SUBDIVISÃO DE CAPÍTULOS.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	HISTÓRICO DO DPL	5
2.2	PENETRÔMETROS DINÂMICOS REFERENCIADOS PELA ISSMFE (1989).....	6
2.2.1	TERMINOLOGIA	6
2.2.2	OUTROS PENETRÔMETROS LEVES	8
2.2.3	PENETRÔMETROS DA FAMÍLIA DP DA ISSMFE (1989)	8
2.2.3.1	HASTE	10
2.2.3.2	CONE	10
2.2.3.3	MARTELO	10
2.2.3.4	ENSAIO	10
2.2.4	CUIDADOS DURANTE O ENSAIO DPL.....	11
2.3	ESTADO DA PESQUISA SOBRE DPL	12
2.3.1	ESTUDOS PARA FUNDAÇÕES RASAS OU DIRETAS	13
2.3.2	APLICAÇÃO PARA ESTACAS	13
2.3.3	OUTROS ESTUDOS COM O DPL	15
2.4	INSTRUMENTAÇÃO DO DPL	18
2.4.1	EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS (STRAIN GAUGES)	19
2.4.2	SISTEMAS MICRO-ELETROMECÂNICOS – MEMS	19
2.4.3	TIPIFICAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO	20
2.5	DINÂMICA DOS PENETRÔMETROS	20
2.5.1	TRAJETÓRIA DO ESTUDO DE PROPAGAÇÃO DE ONDA EM BARRAS LONGITUDINAIS	21
2.5.2	ANÁLISE DA EQUAÇÃO DA ONDA	24
2.5.2.1	PROPORCIONALIDADE ENTRE A VELOCIDADE DE PARTÍCULA E A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA	26
2.5.2.2	PROPORCIONALIDADE ENTRE FORÇA INCIDENTE E VELOCIDADE DE PARTÍCULA	28
2.6	MEDIÇÕES DE ENERGIA NO SPT	31

2.6.1	PRIMEIROS TRABALHOS	32
2.6.2	ENERGIA TRANSFERIDA DO MARTELO PARA AS HASTES DO SPT – O TRABALHO DE SCHMERTMAN E PALACIOS	33
2.6.3	MECANISMO DE PROPAGAÇÃO DE UMA ONDA LONGITUDINAL DE COMPRESSÃO EM HASTES SPT	37
2.7	TRABALHOS BRASILEIROS SOBRE A EFICIÊNCIA E FORÇA DINÂMICA DO SPT.....	39
2.7.1	O TRABALHO DE CAVALCANTE	39
2.7.1.1	A INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DAS HASTES	39
2.7.1.2	PROPOSTA PARA A CORREÇÃO DE N INDEPENDENTE DO COMPRIMENTO DAS HASTES	40
2.7.2	O TRABALHO DE ODEBRECHT.....	45
2.7.2.1	PROPOSIÇÃO DE ODEBRECHT PARA A CORREÇÃO DA EFICIÊNCIA DO SPT	46
2.8	PROPOSIÇÃO DE EFICIÊNCIA PARA O DPL	48
2.9	SIMPLIFICAÇÃO DE CÁLCULO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA DE UM GOLPE PARA UMA HASTE	51
2.9.1	2.9.1 O CÁLCULO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA DE UM GOLPE PARA UMA HASTE A PARTIR DE MEDIDAS DOS SENSORES DE CARGA E ACELERAÇÃO	52
2.10	IMPEDÂNCIA NAS HASTES	54
3	MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1	ADAPTAÇÕES DO DPL	57
3.2	CONSTRUÇÃO DAS CÉLULAS DE CARGAS E TESTES DE LINEARIDADE.....	61
3.2.1	PLACA DE AMPLIFICAÇÃO E FILTRO DE SINAIS ORIUNDO DA CÉLULA DE CARGA.....	63
3.2.2	ENSAIO DE VERIFICAÇÃO DE LINEARIZAÇÃO DAS CÉLULAS DE CARGA.....	64
3.3	ACELERÔMETROS DO TIPO MEMS	66
3.3.1	TRATAMENTO DOS SINAIS DA CÉLULA DE CARGA E DO ACELERÔMETRO	68
3.3.2	REDUNDÂNCIA E <i>OFFSET</i> DO SINAL DO ACELERÔMETRO	70
3.3.3	CORREÇÃO DO SINAL DA ACELERAÇÃO NA VELOCIDADE INTEGRADA	72
3.4	REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE DPL EM TAMBOR DE AREIA	74
3.5	MÉTODO DE ENSAIO PARA A MEDIÇÃO DE ENERGIA DO DPL	76
3.5.1	CÁLCULO DA ENERGIA TRANSFERIDA NO DPL	78

3.5.2	MEDIDA DE PENETRAÇÃO DO CONE DO DPL NO SOLO	78
3.5.3	DURAÇÃO DO TEMPO DE CAPTURA DOS SINAIS DOS SENSORES	78
3.5.5	CORREÇÃO DA ENERGIA COM ACRÉSCIMO DO PESO ESTÁTICO DPL ANTES DA CÉLULA DE CARGA	79
3.5.6	RACIONALIZAÇÃO DA DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA ENERGIA NO DPL	79
3.5.7	CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA A PENETRAÇÃO DO CONE DO DPL	82
4	RESULTADOS E ANÁLISES DA MEDIDA DE ENERGIA DO DPL	85
4.1	AVALIAÇÃO DOS SINAIS	85
4.1.1	SINAIS DE FORÇA COM HISTERESE	85
4.1.2	SINAIS DE FORÇA COM RUÍDOS EXCESSIVOS	86
4.1.3	SINAIS DE ACELERAÇÃO COM INVERSÃO	87
4.1.4	VERIFICAÇÃO DA FORÇA MÁXIMA REGISTRADA E DO IMPULSO	88
4.1.5	VERIFICAÇÃO DO TEMPO DA ONDA DE PROPAGAÇÃO DE TENSÃO	90
4.2	MEDIDA DE ENERGIA DO DPL - MÉTODO EFV	91
4.2.1	COMPARAÇÃO DE REGISTRO DE FORÇA COM A IMPEDÂNCIA	91
4.2.1.1	COMPARAÇÃO DE IMPEDÂNCIAS ENTRE O DPL ADAPTADO E O NÃO ADAPTADO	92
4.2.1.2	CONCLUSOES SOBRE A IMPEDÂNCIA DO DPL	96
4.2.2	AVALIAÇÃO DE REGISTROS TÍPICOS DE FORÇA E VELOCIDADE	96
4.2.2.1	AVALIAÇÃO DO SINAL COM PENETRAÇÃO PERMANENTE DE 23 mm	96
4.2.2.2	AVALIAÇÃO DOS REGISTROS PARA A PENETRAÇÃO DE 3 mm ..	103
4.2.3	SINAIS ADQUIRIDOS E INTEGRADOS PELO MÉTODO EFV	107
4.2.4	ESCOLHA DO FATOR DE EFICIÊNCIA PARA O MARTELO	114
4.2.4.1	VARIAÇÃO DA ENERGIA DO SISTEMA COM O FATOR DE EFICIÊNCIA PARA O MARTELO (η_{1DPL}) CONSTANTE	114
4.2.4.2	VARIAÇÃO DA ENERGIA DO SISTEMA COM O FATOR DE EFICIÊNCIA PARA O MARTELO (η_{1DPL}) VARIÁVEL	116
4.2.4.3	FORMULAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO MARTELO DO DPL (η_{1DPL})	119
4.2.4.4	DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO DPL (η_{DPL})	120
4.2.4.5	DETERMINAÇÃO DA FORÇA DINÂMICA	122

4.3	CONCLUSÕES DA ANÁLISE DA MEDIDA DE ENERGIA DO DPL	123
5	CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS VIA DPL	126
5.1	CAPACIDADE DE CARGA PARA ESTACAS A PARTIR DA DEFINIÇÃO DA FORÇA DINÂMICA DO DPL	126
5.1.1	FORMULAÇÃO PARA A ESTIMATIVA DE CARGA VIA DPL	126
5.2	EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE CARGA PARA ESTACAS VIA DPL	127
5.2.1	CARACTERIZAÇÃO DAS ESTACAS ENSAIADAS	128
5.2.1.1	LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	128
5.2.2	RESULTADOS DA ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE CARGA PARA ESTACAS VIA DPL	128
5.2.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS DA ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE CARGA PARA ESTACAS VIA DPL	131
5.2.3.1	ESTACAS ESCAVADAS (VAN DER VEEN (1953))	133
5.2.3.2	ESTACAS ESCAVADAS ((CHIN (1970))	134
5.4	CONCLUSÕES DA PROPOSTA DE ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE CARGA VIA DPL	137
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	138
6.1	MEDIDA DE ENERGIA DO DPL	138
6.2	RECOMENDAÇÕES DO ENSAIO DO DPL	139
6.3	SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA DO DPL	140
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	141
	APÊNDICE	
A	DADOS DE ENERGIA MEDIDA PELO MÉTODO EFV	147
B	DEDUÇÃO DA VELOCIDADE DE QUEDA DO MARTELO DO DPL	158
C	INTERPRETAÇÃO DA EQUAÇÃO DA ONDA EM MEIO ELÁSTICO SÓLIDO	167
C.1	INTERPRETAÇÃO FÍSICA DE D'ALEMBERT	167
C.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS CONDIÇÕES DE CONTORNO DA PROPAGAÇÃO DE ONDA DE TENSÃO EM UMA BARRA UNIFORME	170
C.2.1	EXTREMIDADE LIVRE	171
C.2.2	EXTREMIDADE FIXA.....	171
C.2.3	EXTREMIDADE COM RESISTÊNCIA FINITA	172
C.2.4	COMPOSIÇÃO DE HASTES COM ATRITO LATERAL	172
C.2.5	IMPEDÂNCIA OU MUDANÇA DE ÁREA DAS HASTES	173

C.3	CHOQUE ENTRE BARRAS	175
C.3.1	IMPACTO ENTRE BARRAS IDÊNTICAS E VELOCIDADES INICIAIS IGUAIS	176
C.3.2	IMPACTO ENTRE BARRAS IDÊNTICAS E VELOCIDADES INICIAIS DIFERENTE	177
C.3.3	IMPACTO ENTRE BARRAS COM COMPRIMENTOS DIFERENTES	178
C.3.4	IMPACTO ENTRE BARRAS COM IMPEDÂNCIAS DIFERENTES	180
E	PROPOSIÇÃO DE LOBO PARA A DETERMINAÇÃO DE CAPACIDADE DE CARGA COM A UTILIZAÇÃO DA FORÇA DINÂMICA DO SPT	182

LISTA DE TABELAS

2.1	Dados técnicos dos equipamentos DPL, DPM, DPH e DPSH - (ISSMFE, 1989)	9
2.2	Trajectoria do estudo da equação da onda	22
3.1	Dados geométricos e de massa do DPL e DPL adaptado	59
3.2	Parcelas computadas para o cálculo da energia do sistema do DPL	82
4.1	Dados estatísticos dos registros de força e impulsos calculados	90
4.2	Força transmitida da cabeça de bater ao cone do DPL	92
4.3	Valores da velocidade na transmissão desde a cabeça de bater até o sensor do topo do cone no segundo impacto	100
4.4	Tabela 4.4 Valores da velocidade na transmissão desde a cabeça de bater até o sensor do topo do cone no terceiro impacto para a penetração de 23 mm	101
4.5	Valores da velocidade na transmissão desde a cabeça de bater até o sensor do topo do cone no quarto impacto	102
4.6	Tempo de tráfego da velocidade média de partícula, energia (EFV) e penetração do cone por trecho dos impactos do martelo do DPL	103
4.7	Valores da velocidade na transmissão desde a cabeça de bater até o sensor do topo do cone no segundo impacto para a penetração de 3 mm	104
4.6	Sumário da estatística descritiva para energias <i>versus</i> penetração permanente	203
4.8	Tabela 4.8 – Resumo dos parâmetros das análises das penetrações de 23 mm e 3 mm	106
4.9	Tabela 4.9 – Sumário da estatística descritiva para energias <i>versus</i> penetração permanente	118
4.10	Tabela 4.10 – Eficiência do martelo do DPL (η_{IDPL}) por penetração permanente ($\Delta\rho$) em percentual	121
5.1	Estimativa de carga com os resultados do DPL1 para as estacas escavadas de Brasília	130
5.2	Estimativa de carga com os resultados do DPL2 para as estacas escavadas de Brasília	130
5.3	Estimativa de carga com os resultados do DPL3 para as estacas escavadas de Brasília	130
5.4	Estimativa de carga com os resultados dos DPL's para as estacas escavadas de Brasília	131
5.5	Resumo dos parâmetros das estacas estimadas com o DPL	132
5.6	Resumo estatístico das estimativas de capacidade de carga das estacas escavadas <i>versus</i> a extrapolação de carga de ruptura de Van der Veen (1953)	133
5.7	Resumo estatístico das estimativas de capacidade de carga das estacas escavadas <i>versus</i> a extrapolação de carga de ruptura de Chin (1970)	134
5.8	Resumo estatístico das estimativas de capacidade de carga das estacas escavadas <i>versus</i> a extrapolação de carga de ruptura de Décourt (1999)	136
5.9	Estimativa de carga com os resultados dos DPL's para as estacas escavadas de Brasília	226
A.1	Resumo de medidas de energia pelo método EFV do DPL	147
A.2	Resumo estatístico de medidas de energia pelo método EFV do DPL	150
A.3	Resumo da variação da energia do sistema (VES) com η_{IDPL} fixo em 0,635	151

A.4	Resumo da variação da energia do sistema (VES) com η_{DPL} variável	154
B.1	Resultados dos ensaios para determinação da velocidade inicial de impacto do martelo DPL	164
E.1	Valores de α e β (Lobo, 2005)	189

LISTA DE FIGURAS

2.1	Esquemas do DPL-CEFET e DCP ASTM D-6951 -03 (2009)	7
2.2	Exemplo típico de registros de penetração do ensaio DPL	11
2.3	Comparativo entre as previsões realizadas com DPL e SPT e a prova de carga (Ribeiro Junior <i>et al.</i> , 2007)	15
2.4	Comparativo entre os perfis do DPL-CEFET e DPL Nilsson (2003) (Ávila <i>et al.</i> , 2003)	17
2.5	DPL com martelo hastes, ponta e nípeis (Figueiredo <i>et al.</i> , 2011)	18
2.6	Modelo de representação da estaca para resolução numérica (Smith, 1960), adaptado de Alves <i>et al.</i> (2004)	24
2.7	Tensões e deslocamento numa barra uniforme	25
2.8	Mecanismo de propagação de onda de tensão em uma barra prismática - livre adaptação de Timoshenko e Goodier (1951) e Cavalcante (2002)	27
2.9	Ilustração da proporcionalidade entre velocidade de partículas e a velocidade de propagação da onda (Goble, 1986, segundo Danziger, 1991)	29
2.10	Sistema de percussão para rochas de Fairhurst (1961) (Demir, 2007 Modificado)	32
2.11	Pulso de força simulado em conformidade com a Equação 2.35	35
2.12	Energia contida nas hastes na primeira onda de compressão (Schmertmann e Palacios, 1979)	36
2.13	Esquema do mecanismo de propagação e reflexão de onda na haste (adaptado de Schmertmann e Palacios, 1979)	38
2.14	Eficiência de energia transferida em função do comprimento da composição de hastes (Cavalcante, 2002)	40
2.15	Valores de eficiência de energia transferida às hastes em função do comprimento da composição (Cavalcante, 2002)	42
2.16	Eficiência de energia transferida através da composição de hastes (ENTHRU/Ei) em função da profundidade (14 m) Sy e Campanella, 1991 em Cavalcante 2002)	43
2.17	Eficiência de energia transferida através da composição de hastes (ENTHRU/Ei), martelo automático de queda livre, em função da profundidade de Sy e Campanella, 1991 em Cavalcante, 2002	44
2.18	Esquema das energias potenciais, gravitacional do martelo e da haste (Odebrecht, 2003)	46
2.19	Transmissão de energia numa haste uniforme (adaptado de Morgano e Liang, 1992)	51
2.20	Propagação da força e velocidade em barras de diferentes impedâncias (Adaptado de Gonçalves <i>et al.</i> 1996)	54
3.1	Detalhes do DPL e DPL adaptado	58

3.2	Detalhe das extremidades da haste e haste guia	59
3.3	Detalhe da cabeça de bater	60
3.4	Detalhes do nípel e Luva alongada	60
3.5	Figura 3.5 – Cones do DPL e DPL adaptado	61
3.6	Posicionamento dos extensômetros em oposição ortogonal	62
3.7	Fases da confecção da célula de carga	62
3.8	Esquema do circuito de amplificação de microvolt para milivolt e para volt com filtro	64
3.9	Linearização da célula de carga	65
3.10	Ensaio de linearização de célula de carga	65
3.11	Esquema de um MEMS (Ribas, 2000)	67
3.12	Detalhe do <i>chipset</i> ADXL-193 com o conversor instalado	67
3.13	Acelerômetros encapsulados em resina epóxi e fixos na haste do DPL	68
3.14	Diagrama de bloco do ADXL-193 (MEMS® Accelerometers ADXL 193)	69
3.15	Integração de sinais com e sem tratamento	70
3.16	Sinal de acelerômetro com rebatimento e sem rebatimento	71
3.17	Redundância dos sinais de acelerômetro	72
3.18	Sinal de aceleração com correção da linha de rebatimento (Odebrecht, 2003)	72
3.19	Correção da linha base da integração do sinal do acelerômetro para o Golpe 15	74
3.20	Granulometria da areia utilizada para o ensaio de medida de energia	75
3.21	DPL montado no tambor de areia com toda a parafernália de medição	75
3.22	Estágios do ensaio para medida de energia do DPL	77
3.23	Detalhe do segundo e terceiro estágios do ensaio de medida de energia do DPL	77
3.24	Esquema do tambor, DPL instrumentado, fonte de estabilização e osciloscópio	78

3.25	Condições de contorno abaixo da ponta (adaptação de Gonçalves <i>et al.</i> (1996))	84
4.1	Sinal de Força com indício de histerese	86
4.2	Sinal de Força com ruído excessivo	87
4.3	Sinais de aceleração com aparente inversão	88
4.4	Diferença entre os máximos de força e impulsos calculados com os registros das células de carga	89
4.5	Tempo (L/c) de propagação de tensão entre as duas células de carga	90
4.6	Tráfego de velocidade incidente no topo e forças incidentes no topo e cone	92
4.7	Mudanças de área de seções na cabeça de bater e no cone adaptado do DPL	94
4.8	Tráfego da força de impedância Velocidade transmitida da cabeça de bater ao cone do DPL	94
4.9	Tráfego da velocidade impedância nos DPL e DPL adaptado para o ensaio	95
4.10	Evolução da energia, força, velocidade e penetração a partir dos dados coletados nas células de carga e acelerômetros para a penetração de 23 mm	97
4.11	Evolução da energia, força, velocidade e penetração de 23 mm do primeiro até o segundo impacto	98
4.12	Evolução da energia, força, velocidade e penetração de 23 mm do segundo até o quarto impacto	101
4.13	Evolução da energia, força, velocidade e penetração a partir dos dados coletados nas células de carga e acelerômetros para a penetração de 3mm	104
4.14	Evolução da energia, força, velocidade e penetração a partir dos dados coletados nas células de carga e acelerômetros para a penetração de 3mm com detalhe do segundo impacto	105
4.15	Evolução da energia para penetração permanente - Golpe 2	107
4.16	Evolução da energia para a penetração permanente - Golpe 4	108
4.17	Evolução da energia para a penetração permanente - Golpe 9	108
4.18	Evolução da energia para a penetração permanente - Golpe 8	109
4.19	Evolução da energia para penetração permanente - Golpe 14	109
4.20	Evolução da energia para penetração permanente - Golpe 10	110
4.21	Evolução da energia para penetração permanente - Golpe 10	110
4.22	Evolução da energia para a penetração permanente – Golpe 18	111

4.23	Evolução da energia para a penetração permanente – Golpe 22	111
4.24	Evolução da energia para a penetração permanente - Golpe 24	112
4.25	Evolução da energia para a penetração permanente – Golpe 32	112
4.26	Evolução da energia para a penetração permanente - Golpe 33	113
4.27	Evolução da energia para a penetração permanente - Golpe 41	113
4.28	Evolução da energia para a penetração permanente - Golpe 42	114
4.29	Energia <i>versus</i> penetração permanente com η_{1DPL} constante	115
4.30	Energias <i>versus</i> penetração permanente com a eficiência do martelo (η_I) variável	117
4.31	Eficiência do martelo do DPL (η_{1DPL}) em função da penetração permanente ($\Delta\rho$)	120
4.32	Variação da eficiência do DPL (η_{DPL}) ao longo do comprimento da haste	122
4.33	Variação da força dinâmica do DPL ao longo do comprimento da haste	123
5.1	Detalhe geométrico da ponta do DPL	127
5.2	Estimativa de carga com o DPL para as estacas escavadas de Brasília	131
5.3	Erros de estimativa de capacidade de carga de estacas escavadas <i>versus</i> Van der Veen (1953)	134
5.4	Erros de estimativa de capacidade de carga de estacas escavadas em relação ao método de Chin (1970)	136
5.5	Erros de estimativa de capacidade de carga de estacas escavadas em relação ao método de Décourt (1990)	137
B.1	Esquema da queda do martelo do DPL	159
B.2	Velocidade de queda com reação até o limite da velocidade terminal	160
B.3	Variação da aceleração na queda livre com reação	161
B.4	Esquema do acréscimo de tempo causado pelo atrito do martelo com a haste guia do DPL	163
B.5	Histograma e distribuição normal do tempo medido na queda do martelo do DPL	164
C.1	Ilustração esquemática dos sentidos de ondas longitudinais (Cavalcante, 2002)	169
C.2	Condições de contorno para a solução geral da equação diferencial linear de propagação de ondas longitudinais de tensão (Cavalcante, 2002)	172

C.3	Condições de contorno para a solução geral da equação diferencial linear de propagação de ondas longitudinais de tensão – atrito lateral e impedância (Cavalcante, 2002)	174
C.4	Impacto entre barras idênticas com mesma velocidade inicial (v_0)	176
C.5	Impacto entre barras idênticas com velocidades diferentes	178
C.6	Impacto entre barras com comprimentos diferentes	179
C.7	Impacto entre barras com impedâncias diferentes	181
E.1	Hipóteses adotadas na separação da força dinâmica mobilizada pelo amostrador (Lobo, 2005)	184
E.2	Porcentagem de resistência de ponta mobilizada pela cravação do amostrador SPT em solos arenosos (Lobo, 2005)	185
E.3	Razão de resistências laterais <i>versus</i> razão de diâmetros (Lobo, 2005)	186
E.4	Razão de resistências laterais <i>versus</i> razão de comprimentos (Lobo, 2005)	187
E.5	Razão de resistências de ponta <i>versus</i> razão de diâmetros (Lobo, 2005)	188

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIATURAS

ABREVIATURAS:

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CBR	California Bearing Ratio
CEN	European Committee for Standardisation
CI	Circuito Interno
CPT	Cone Penetration Test
Desvp	Desvio Padrão
DCP	Dynamic Cone Penetration
DF	Distrito Federal
DIN	Deutsches Institut für Normung
DP	Dynamic Probing Test
DPH	Dynamic Probing Heavy
DPM	Dynamic Probing Medium
DPL	Dynamic Probing Light
DPSH	Dynamic Probing Superheavy
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EUA	Estados Unidos da América
<i>In situ</i>	No Local
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISSO	<i>Organization Standardization International</i>
ISOPT	<i>International Symposium on Penetration Testing</i>
ISSMFE	<i>International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering</i>
MEMS	Micro Electromechanical Systems
MT	Mato Grosso
NBR	Norma Brasileira Registrada
N _{SPT}	Número de Golpes para Penetração de 30 cm no Ensaio SPT
PDI	Pile Dynamics Incorporation

PDL	Penetrômetro Dinâmico Leve
PVC	Policloreto de Polivinila ou de Vinil
SPT	Ensaio de Sondagem a Percussão (<i>Standard Penetration Test</i>)
SPT –T	Ensaio de Sondagem a Percussão Torção
V _m	Velocidade medida da queda do martelo

SÍMBOLOS:

Letras Arábicas

%	Porcentagem
>	Maior
<	Menor
±	Mais ou Menos
≥	Maior ou Igual
≤	Menor ou Igual
A	Área da Seção do Martelo
a _l	Área Lateral Total do Amostrador Interna e Externa
A	Área da Seção do Condutor
A _h	Área da Seção Transversal da Haste
A _p	Área da Seção da Ponta
C	Velocidade de Propagação da Onda de Tensão
Cm	Centímetro
cm ²	Centímetros Quadrado
D	Diâmetro da Cabeça de Bater
D	Diâmetro do Martelo
dA _s	Área da Seção Lateral por Metro da Estaca
D _x	Elemento da Barra
E	Módulo de Elasticidade
E*	Energia Potencial Gravitacional Teórica
E _a	Energia de Atrito Lateral
E _{CIN}	Energia Cinética

E_D	Energia Dinâmica
E_h	Energia Transmitida à Haste do DPL
E_i	Tensão de Entrada
E_{FV}	Energia Transferida às Hastes
e.g	Por Exemplo
E_M	Energia da queda do martelo ou Energia medida
EPG_m	Energia Potencial Gravitacional do Martelo
EPG_h	Energia Potencial Gravitacional da Haste
E_S	Energia do sistema
E_T	Energia no topo
<i>et al.</i>	Entre outros
F	Força
F	Resistência Lateral da Estaca;
f_{cc}	Força na Célula de Carga Zerada
F_d	Força Dinâmica
F_H	Força Originada do Peso da Haste sobre a Célula de Carga
F_i	Força Incidente
G	Aceleração da Gravidade
H	Altura de Queda
Hz	Hertz
h_{mt_1}	Cota do Centro de Massa do Martelo em Relação ao Referencial
h_{ht_1}	Cota do Centro de Massa da Haste em Relação ao Referencial
I	Corrente Elétrica
J	Joule
Kg	Quilo
kg/m	Quilo por metro
kHz	Quilo hertz
kJ/m^2	Quilo joule por metro quadrado
km^2	Quilômetro ao quadrado
kPa	Mil pascal (quilopascal)

kN	Mil newton (quilnewton)
kN-m	Quilonewton metro (quilnewton metro)
L	Comprimento do condutor ou barra
L	Comprimento da haste
M	Metro
m ²	Metro Quadrado
mA	Miliamper
M _H	Massa da Haste
M*H*g	Energia de um Golpe
mm	Milimetro
M _M	Massa do Martelo
m.s	Metro Segundo
m/s	Metro por Segundo
m/s ²	Metro por Segundo ao Quadrado
ms	1000 Segundos (milisegundos)
mV	MiliVolts
N	Newton
Nm	Número de Golpes
N	Número Máximo de Tensões Completadas
N ₁₀	Número de golpe para cada 10 cm de penetração do DPL
N ₁₅	Número de golpe para cada 15 cm de penetração do DPL
N.s/m	Newton Segundo por Metro
P	Capacidade de Carga
q _{pf}	Resistência de Ponta da Estaca
Q _L	Capacidade de Carga do Fuste de uma Estaca
Q _p	Capacidade de Carga da Ponta ou Base de uma Estaca
q _p	Resistência Unitária da Ponta da Estaca
Q _u	Capacidade de Carga Total de uma Estaca
R	Resistência Elétrica
R ²	Coefficiente de Determinação

R	Raio da Haste
S	Segundos
SF	Fator de Segurança
SM	Silte arenoso
s/m	Segundos por Metro
U	Deslocamento de uma seção transversal da barra
U	Perímetro da Estaca
V	Velocidad de partícula
V	Tensão elétrica (Volts)
\bar{V}	Velocidade oriunda do sinal do acelerômetro correspondente à velocidade média do corpo da haste do DPL
V_{out}	Tensão de Saída
$V_{(t)}$	Energia Potencial
$v_{(t)}$	Velocidade da partícula
W	Peso Próprio da Estaca
W_{nc}	Trabalho Efetuado por Forças não Conservativas Diversas
W	Trabalho
Z	Impedância

Letras Gregas

ΔV	Varição de Tensão Elétrica
ΔEPG_m	Varição da Energia Potencial Gravitacional do Martelo
ΔEPG_h	Varição da Energia Potencial Gravitacional da Haste
$\Delta EPG_{m+h}^{sistema}$	Varição da Energia Potencial Gravitacional do Sistema Martelo e Haste
$\Delta \rho$	Penetração Permanente
Δw	Incremento de Trabalho
$\Delta \delta$	Deslocamento
Δ	Varição
Ξ	Deformação

Σ	Tensão
T	Coefficiente de Atrito Lateral
$\tau_{l,spt}$	Atrito Lateral Unitário no Amostrador SPT
H	Eficiência do Sistema
P	Resistividade do condutor
μ_A	Microamper
μ_V	MicroVolts

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Em linhas gerais, o problema geotécnico para obras civis, inicialmente, é prever a capacidade de carga das fundações e, em seguida, as condições em que se darão os recalques. Na tarefa de projetar as fundações os métodos disponíveis são os teóricos, empíricos e semiempíricos, com destaque para o último, que alia os princípios da Mecânica dos Solos às informações obtidas do campo (Silva et. al., 2006; Souza *et al.*, 2008). Além disso, segundo Schnaid (2000), a quantidade e a qualidade das informações obtidas dos ensaios de campo têm relação direta com os custos do projeto e a execução das fundações, estabilidade de taludes, estruturas de contenção, dimensionamento de pavimentos entre outros. Dessa maneira, pode-se abrir um olhar sobre os ensaios que utilizam a penetração para a coleta das informações geotécnicas.

Dentre os diversos ensaios, os considerados de penetração no solo, são os mais empregados, e basta para isso observar o uso corrente do *Standard Penetration Test* – SPT – no Brasil e no mundo (Robertson et. al., 1983; Cintra & Belincanta, 1998; Odebrecht *et al.*, 2005; Silva et. al., 2006; Souza *et al.*, 2008, Morais *et al.*, 2014). Por outro lado, há uma quantidade de instrumentos que penetram o solo, para se avaliar parâmetros de resistência do solo. Um desses penetrômetros é o *Dynamic Probing Test* –DP, com energia teórica de 50 a 240 kJ/m², padronizado em 1989 pela *International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering* –ISSMFE- referenciado através do *Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils TC-16 with Reference Test Procedures* (ISSMFE, 1989). Em seções, adiante, será detalhado o tipo de DP foco desta pesquisa, no caso o *Dynamic Probing Light*, denominado DPL.

1.1 JUSTIFICATIVA

A partir da década de 1970, as fronteiras agrícolas brasileiras foram expandidas para região Centro-Oeste do Brasil. A construção de Brasília, que fazia parte do Plano de Metas (1956-1961) do governo Juscelino Kubitscheck, acelerou o processo de migração interna brasileira para a região, através de investimentos em infraestrutura e da implantação de uma malha rodoviária ligando a região aos principais centros econômicos brasileiros. Mato Grosso como Estado parte da região, por conta dessa migração, teve crescimentos populacionais nas décadas de 1970, 1980 e 1990 acima da média nacional (Abutakka, 2011). Concomitante ao avanço dessas fronteiras, houve o crescimento urbano com o surgimento de novas cidades, que passaram a demandar por uma série de obras de infraestrutura, tais como rodovias e linhas de

transmissão de energia elétrica, além de obras de médio porte afastadas dos centros urbanos, e.g., silos de armazenagem, aeródromos e plantas agroindustriais.

Em que pese o fato de o crescimento econômico e populacional ultrapassar a média nacional (Abutakka, 2011), Mato Grosso é um Estado com baixa densidade demográfica, com grandes áreas de preservação ambiental e reservas indígenas em seu território que, em última instância, inibe a presença de veículos e aberturas de picadas e acessos aos locais de futuras obras como barragens, linhas de transmissão, entre outros, quase sempre dependentes de permissão legal para atividade antrópica.

Em decorrência do estado ter várias partes do seu território demarcado por áreas de preservação e proteção ambiental e reservas indígenas, o engenheiro de fundações tem a sua ação limitada para a utilização do SPT, que exige transporte em caminhões até o ponto de prospecção, nem sempre possível. A utilização do DPL tem a portabilidade facilitada pelo fato do seu peso ser compatível com a capacidade de um homem, podendo assim ser utilizado em áreas de acesso com mata fechada.

Além disso, na região tem-se a predominância dos biomas Cerrado, Pantanal e Amazônia, nas proporções respectivas de 39,60 %, 6,80 % e 53,6 % (SEMA, 2010), sendo grande parte desses, assentes em solo tropical, que se apresenta, em muitas regiões do Estado, com características de solos coesivos e colapsíveis, de baixa resistência. Vale ressaltar que o Mato Grosso apresenta uma grande variedade de cobertura pedológica com presenças de Latossolos, Argissolos, Nitossolos e Chernossolos (EMBRAPA, 2006). Um exame com foco na densidade e porosidade conduz à conclusão de que o Estado possui mais de 300.000 km² de solos com baixa resistência à penetração do SPT (com $NSPT \leq 5$). Deve-se notar que solos de elevada porosidade e baixa densidade são próprios para a agricultura e, por isso mesmo, polarizadores de pequenas cidades e obras de magnitude de cargas consideráveis, e.g., silos graneleiros.

Um fato, notório e sabido, que não pode ser desconsiderado, é a característica do desenvolvimento brasileiro, que apresenta crescimento econômico, má distribuição de renda e baixo *input* tecnológico. Esses três fatores aliam-se, de forma intrínseca, de tal modo que o gerenciamento de empreendimentos de obras opta, em geral, pela omissão das campanhas geotécnicas em regiões distantes dos grandes centros. As costumeiras justificativas são o fato dessas regiões apresentarem dificuldades logísticas, alto custo de movimentação de máquinas,

prazos exíguos e redução de custos dos financiamentos. Isso faz com que soluções mitigadoras do problema geotécnico fiquem mais caras pela falta da informação mais detalhada.

Segundo Nilsson e Cunha (2004), a utilização do DPL pode alterar o quadro geotécnico no tocante ao mercado, logística de campanha, custo financeiro, além de aumentar o número de alternativas relativas à técnica de investigação. No caso das obras de grande porte, tem potencial para auxiliar para as campanhas com o SPT; para as pequenas construções, pode-se adotar como solução na estimativa de capacidade da carga e, sem dúvida, para os casos em que a logística é a protagonista da execução da campanha, o DPL destaca-se como equipamento de grande portabilidade. Como se verá adiante, esses aspectos justificam o presente estudo nos seus aspectos econômico e social quanto aos equipamentos de ensaios de campo empregados para coletas de informações geotécnicas *in situ*.

Serão relatadas na Revisão Bibliográfica desta tese diversas experiências realizadas com o DPL. Essas pesquisas focaram na estimativa da capacidade de carga baseada na penetração do DPL, denominada N_{10} , e desse modo comparada com as do SPT, embora ainda não se conheça, as energias empregadas e dissipadas no sistema da composição do DPL. O conhecimento das perdas de energia, justifica, também, este trabalho, tendo em vista que esse dado é de crucial importância para estabelecer os primeiros passos de uma formulação racional para estimativa de capacidade de carga, com foco na medida de energia e baseada nas características intrínsecas do DPL e do solo tropical do Centro Oeste Brasileiro.

A medida de energia do DPL com instrumentação dinâmica justifica este trabalho de pesquisa porque será mais um penetrômetro, além do SPT, com eficiência de energia medida. Portanto, isso possibilitará um leque de aplicações na geotecnia e fundações com aplicação direta e auxiliar aos ensaios tradicionais como o SPT.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa é medir a eficiência de energia do DPL, oriunda do impacto do martelo no topo da composição e dissipada até à ponta cônica desse penetrômetro.

Em termos específicos, se propõe:

1. Medir a energia da queda do martelo do DPL aduzida das energias oriundas das massas da composição do DPL e, a partir disso, a estimativa da eficiência de energia do DPL;

2. Estimar a força dinâmica oriunda do DPL para a formulação de uma metodologia de determinação da capacidade de carga para fundações em função da penetração permanente do DPL.

1.3 SUBDIVISÃO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho está organizado com a seguinte estrutura:

CAPÍTULO 1 – Apresenta uma parte introdutória, mostrando um panorama geral do tema em discussão e apresenta os objetivos gerais da pesquisa, bem como a metodologia proposta.

CAPÍTULO 2 – Faz um histórico do DPL e outros penetrômetros leves; tipifica o DPL, bem como relata o estado da pesquisa com o DPL referenciados pelo TC-16 do ISSMFE (1989). Descreve os primeiros trabalhos com a aplicação da equação da onda e as medições de energia em penetrômetros. Relata as proposições para eficiência de energia do martelo para as hastes e as formulações com base na equação da onda.

CAPÍTULO 3 – Apresenta toda a metodologia da pesquisa, incluindo a construção de células de carga, sensores de aceleração, local do ensaio, o detalhamento dos métodos de medida de energia EFV, além da explanação das condições de contorno da penetração do cone do DPL. São mostrados em detalhes todas as peças que constituem a composição do penetrômetro. É detalhado o método de ensaio, bem como o tratamento dos sinais para a composição de análise de força velocidade e energia medida.

CAPÍTULO 4 – Apresentação e análise de resultados, onde são mostrados os resultados dos ensaios para a medida de energia do DPL com base no método EFV. Foram deduzidas, também, as formulações para a determinação da eficiência do martelo do DPL e a determinação de uma função para a essa eficiência de energia do DPL.

CAPÍTULO 5 – Apresenta uma proposta de aplicação do uso da eficiência do DPL para a estimativa de capacidade de carga de estacas.

CAPÍTULO 6 – Por fim, são apresentadas as conclusões da tese sobre os métodos empregados para a medida de energia no DPL, recomendações do ensaio de campo para o DPL e as proposições para continuidade dos trabalhos sobre medida de energia do DPL. Compõe, também, esta tese, a lista do referencial bibliográfico e apêndices com os dados dos ensaios com o DPL.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta um histórico sobre os ensaios de penetrômetros, incluindo o DPL e outros penetrômetros e ainda tipifica o penetrômetro leve, caracterizando-o, diante dos demais equipamentos do gênero da engenharia geotécnica. Também são abordados os processos de impactos entre barras e as formulações com base na equação de ondas. Por ser o DPL pouco conhecido, muitas analogias são feitas com base nos estudos já realizados com o SPT.

2.1 HISTÓRICO DO DPL

Segundo Hasmat (2000), o DPL é conhecido na Europa desde a primeira guerra mundial. Após 1945, o conhecimento e uso desse equipamento ampliou-se para além do continente europeu. A primeira norma referente ao ensaio é a DIN-4094-1 de 1964, citada por Alves Filho (2010). O mesmo autor discorre que, no Brasil, o Departamento de Estradas e Rodagem registra desde 1984 o uso de um penetrômetro de pequeno porte, denominado de Penetrômetro Dinâmico Leve ou PDL, baseado na norma alemã.

O relatório do comitê técnico sobre ensaios de penetração de solos, o TC-16 de 1989, descreve as diretrizes para os procedimentos de ensaios penetrométricos, entre os quais está o DPL. Ressalta-se que em 2005 passou a orientar, no continente europeu a norma CEN (2005) do *European Committee for Standardisation*, que trata do mesmo ensaio abordado no apêndice C da ISSMFE (1989).

No Brasil, as primeiras pesquisas relatadas sobre o DPL, começaram com o engenheiro Thomas Nilsson, que patenteou um DPL em 2003 (Nilsson, 2003; Nilsson e Cunha, 2004). O grupo de pesquisa liderado pelo professor Wilson Conciani, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – IFMT- desenvolveu, por sua vez, a partir de 2004, um DPL, denominado DPL-CEFET, que passou por várias experiências em relação à definição das hastes e luvas até chegar à forma geométrica que se tem hoje (Ávila e Conciani, 2006).

De todo modo, essas duas frentes de pesquisas são baseadas no penetrômetro padronizado pela ISSMFE (1989). Embora ambos os DPL se assemelhem, há diferenças geométricas entre o formulado como orientação pelo apêndice C da ISSMFE (1989) e os que foram desenvolvidos por Nilsson e Conciani, no Brasil. Nas seções seguintes serão apresentadas essas diferenças.

2.2 PENETRÔMETROS DINÂMICOS REFERENCIADOS PELA ISSMFE (1989)

Esta seção descreve os penetrômetros leves e as diferenças quanto ao tipo e denominação desses equipamentos.

2.2.1. TERMINOLOGIA

Há uma variedade de denominações para penetrômetros dinâmicos leves. Um vislumbre dessa diversidade é denotado pelos acrônimos empregados em artigos, notas técnicas e referências. Por exemplo, pode-se encontrar os acrônimos DCP, DPL e PDL. A origem disso, em grande parte, deriva da cultura técnica regional dos formuladores das normas que tratam dos ensaios com esses penetrômetros. A norma DIN 4094-1(2002), por exemplo, refere-se a um penetrômetro leve, semelhante ao DPL no tocante à energia potencial (49 Joules) e procedimento de ensaio, porém denominado por essa norma, na tradução inglesa, como *Dynamic Cone Penetration Test* ou DCP. Por outro lado, a norma americana ASTM D 6951-03(2009) também denomina um penetrômetro leve de *Dynamic Cone Penetration Test* ou DCP, distinto quanto à energia potencial (45 Joules), geometria e procedimento de ensaio do penetrômetro leve referido na norma alemã. Na base de dados dos estudos com o DCP no Brasil estão os trabalhos de Trichês e Dal Pai (2006) que tratam da repetibilidade do ensaio em uma amostra compactada, em que a variação verificada concordou com a variação de umidade. A dissertação de mestrado de Silva Junior (2005) que correlacionou o índice de penetração do ensaio DCP com os valores de CBR. Disso, resultou uma função que correlaciona a penetração obtida com o DCP (DN) com os valores de suporte (CBR) para solos classificados como areia fina siltosa. Silva Junior (2005) adverte que a correlação obtida não vale para outros tipos de solos.

No Brasil, por conta da tradução, aumenta-se a dificuldade de distinção entre os penetrômetros. Röhm e Nogueira (1993) descrevem um penetrômetro de massa de 10 kg que denominam de PDL em vez de DPL como se denomina neste trabalho, desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa em 1980. Recentemente, como relatado acima, em 2010, Alves Filho descreve um penetrômetro, denominado de PDL, diferente na geometria e procedimento de ensaio do relatado por Röhm e Nogueira (1993), pois assemelha-se ao DPL aqui neste estudo tratado. Como ilustração do problema que isso acarreta para o entendimento do leitor, em artigos diferentes, em um mesmo seminário sobre penetrômetros, o

ISOPT-1 de Kayalar (1988) e Kleyn & Van Zyl (1988) referem-se à mesma denominação – DCP- para penetrômetros diferentes.

Uma maneira de afastar esse desentendimento entre as definições é estabelecer que o DPL tem seu avanço contínuo, não limitado por uma extensão fixa, mas simplesmente pela nega de penetração. Dessa maneira pode se entender o DPL como um penetrômetro que tem sua extensão de penetração dada pelo número de segmentos ou hastes que fazem parte de uma composição. O DCP é, por definição da própria ASTM D 6951-03 (2009), destinado para avaliar as propriedades de materiais do solo de até 1 metro de profundidade, a partir da superfície. A Fig. 2.1 ilustra, de forma esquemática, a distinção entre esses dois penetrômetros, onde se frisa que para o DP tomou-se como referência o penetrômetro tratado nesta pesquisa – DPL-CEFET. Nota-se claramente que há um limite de penetração para o DCP da ASTM D-6951-3 (2009) estabelecido pela geometria, enquanto que há a liberdade para o DPL-CEFET pelo fato de se poder realizar uma composição de hastes.

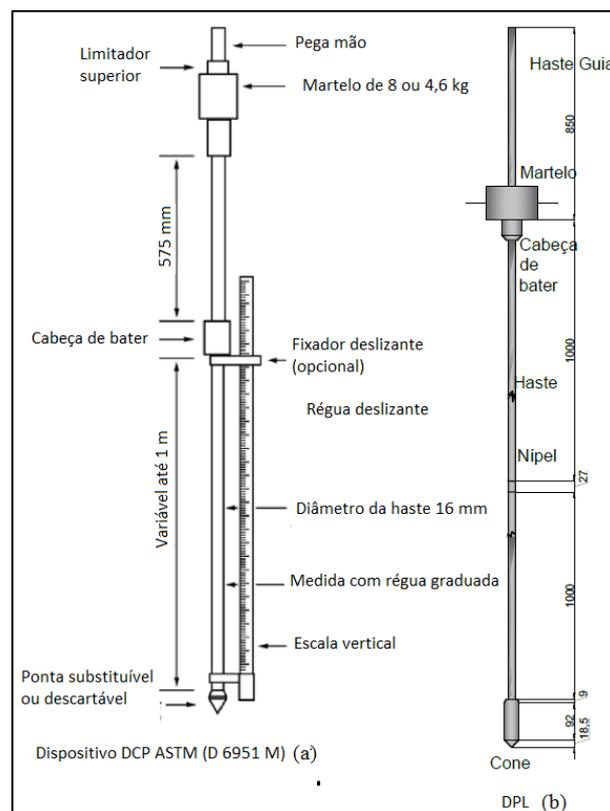


Figura 2.1- Esquemas do DCP ASTM D-6951-3 (2009) (a) e DPL-CEFET (b)

2.2.2 OUTROS PENETRÔMETROS LEVES

Antes de abordar os tipos de DP, referenciados pelo apêndice C da ISSMFE (1989), é necessário estabelecer que, em se tratando de penetrômetros leves com ponta cônica, há três outros que merecem menção de modo a estabelecer os limites desta pesquisa. Tratam-se do *Dynamic Cone Penetration* – DCP; do Penetrômetro Dinâmico Leve; e do Panda[®], fabricado pela companhia francesa *Soil Solution*.

O primeiro é um penetrômetro leve, de massa de 8 kg. Segundo Röhm e Nogueira (1993), Scala (1956) apresentou uma versão inicial depois aprimorada por VanVuuren (1969) até chegar a Kleyn (1975) que deu continuidade aos trabalhos de Van Vuuren utilizando-o na *Transvaal Roads Department* e Pretória, África do Sul. Em 2003 esse penetrômetro foi padronizado pela ASTM D6951-03 (2009).

O segundo é uma variação do DCP, com massa de 10 kg desenvolvido em 1980 por Röhm e Nogueira (1993), no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (Röhm e Nogueira, 1993).

O terceiro é o Panda[®] da companhia *Soil Solution*, um penetrômetro que emprega tecnologia oferecida pelos acelerômetros, que possibilita negligenciar a fixação da altura de queda, obrigatória nos demais penetrômetros dinâmicos. A altura de golpe do martelo não segue nenhuma regra, pois varia constantemente com o operador, e apenas limita-se às energias de impacto registradas no microprocessador a profundidade de cravação da haste (Silva, 2007).

Nota-se que tanto o DCP de Kleyn ou PDL de Röhm são aparelhos com dimensões de extensão definidas, i.e., diferente do DPL ou Panda[®]. Nos dois primeiros não é recomendável acoplar hastes para se ter uma composição, de modo a variar a profundidade de penetração. Vale frisar que esses dois penetrômetros têm especificidade para avaliações de resistência de subleitos rodoviários.

2.2.3 PENETRÔMETROS DA FAMÍLIA DP DA ISSMFE (1989)

Os penetrômetros dinâmicos são divididos em quatro tipos de ensaios: leve ou *Dynamic Probing Light* (DPL); médio *Dynamic Probing Medium* (DPM); pesado ou *Dynamic Probing Heavy* (DPH); e superpesado ou *Dynamic Probing Superheavy* (DPSH). A cada tipo corresponde a uma confiabilidade de profundidade estimada de investigação do solo e de energia empregada no sistema. A Tab. 2.1 detalha algumas dessas diferenças entre os quatro

tipos de penetrômetros. Vale ressaltar que esta pesquisa focaliza o ensaio DPL. No detalhamento desta seção será relatada as principais recomendações para o DPL com base no apêndice C do relatório técnico (TC-16) da ISSMFE (1989).

O relatório TC-16 (ISSMFE, 1989) faz recomendações sobre penetrômetros dinâmicos da família *Dynanic Probing* ou simplesmente DP. Em contraste com o SPT, os penetrômetros dinâmicos são utilizados de modo a obter registros de resistência à penetração contínuos, i.e., uma vez que se dá início ao ensaio, a composição não é retirada até que este seja dado como terminado. O objetivo dos penetrômetros dinâmicos é medir o esforço empregado para a penetração de um cone através do solo e dessa forma obter valores de resistência que correspondam às propriedades mecânicas do solo. Essa resistência do solo à penetração do cone é obtida pela queda livre de um martelo de massa conhecida (M), a uma altura de queda definida (H) que choca em uma cabeça de bater e, assim por percussão crava-se o cone no solo. A cada intervalo definido por tipo de penetrômetro obtém-se o número de golpes (N_{10}). A energia ($M \cdot H \cdot g$) de um golpe corresponde à massa do martelo vezes a altura de queda e ainda multiplicada pela aceleração da gravidade.

Tabela 2.1 – Dados técnicos dos equipamentos DPL, DPM, DPH e DPSH - (ISSMFE, 1989)

Fator	DPL	DPM	DPH	DPSH
Martelo (massa, kg)	10±0,1	30±0,3	50±0,5	63,5±0,5
Altura de queda (mm)	500±10	500±10	500±10	750±20
Razão: comprimento da haste (L) pelo diâmetro do martelo (D)	≥1≤2	≥1≤2	≥1≤2	≥1≤2
Diâmetro da Cabeça de Bater (d) em mm	100<d<D	100<d<D	100<d<D	100<d<D
Cabeça de bater e haste guia (massa máxima em kg)	6	18	18	30
Comprimento da haste (m)	1±0,1%	1-2±0,1%	1-2±0,1%	1-2±0,1%
Massa máxima da haste (kg)	3	6	6	8
Diâmetro externo da haste OD (mm)	22±0,2	32±0,2	32±0,2	32±0,3
Ápice do cone (ângulo em graus)	90°	90°	90°	90°
Área da base do cone (cm ²)	10	10	15	20
Diâmetro do cone novo (mm)	35,7±0,3	35,7±0,3	43,7±0,3	51±0,5
Comprimento da ponta do cone (mm)	17,9	17,9	21,9	25,3

2.2.3.1. HASTE

O diâmetro, a massa e extensão da haste são fornecidos na Tabela 2.1. O material da haste deve ser de aço, com alta resistência ao desgaste, tenacidade alta e baixas temperaturas e elevada resistência à fadiga com massa máxima de 3 kg/m. Além disso, as hastes do DPL devem ter características de maneira que as deformações permanentes possam ser corrigidas; as junções (nípeis) devem ser alinhadas com as hastes; e, embora exista aparelhos com hastes rígidas, neste caso, com diâmetros de 20 mm, onde deve-se dar preferência às hastes vazadas (ocas), pela óbvia redução de peso.

2.2.3.2. CONE

O cone é uma peça sólida constituída de uma ponta cônica, cuja base, é também a base de um corpo cilíndrico que transita para o diâmetro da haste em um comprimento igual ao da base da ponta cônica. A altura do cone corresponde ao raio da base do cone.

2.2.3.3. MARTELO

O martelo deve ter a massa de acordo com tipo de ensaio no caso do DPL, 10 kg ou 100 N e, ainda, ser vazado de maneira que a queda livre através de uma haste-guia não seja afetada.

2.2.3.4. ENSAIO DE PENETRAÇÃO COM O DPL

O ensaio do DPL, preferencialmente, aplica-se a solos não coesivos. O DPL é utilizado para solos de baixa resistência à penetração do SPT, bem drenados, de baixa densidade e presente em grande parte do território de Mato Grosso e do Brasil Central, como já referido neste trabalho. A cravação da composição do DPL deve ser feita de modo que a mesma fique firmemente ancorada no solo, na posição vertical e, se necessário, faz-se um pré-furo de modo a garantir essas condições. A frequência da cravação é feito de modo contínuo com uma taxa de 10 a 15 golpes por minuto, exceção feita quando as condições geológicas impõem lentes de concreção e pedregulho, típicas do planalto brasileiro, quando, então, a taxa pode ser aumentada em até 60 golpes por minuto (ISSMFE, 1989).

O relatório do ensaio do DPL, além da apresentação do número de golpes a cada 10 cm de profundidade, a exemplo da Fig. 2.2, deve registrar toda interrupção, assim como todos os incidentes ocorridos e que afetam a composição do DPL, entre os quais os desvios das hastes e acoplamentos entre hastes defeituosas. A cada metro de penetração as hastes devem ser

rotacionadas uma vez e meia, conforme O TC-16 da ISSMFE (1989), com o cuidado de manter a composição na posição vertical. O número de golpes deve ser registrado a cada 10 cm. A faixa normal de número de golpes para o DPL situa-se entre 3 e 50 para o N10, e o repique não pode superar a metade da penetração por golpe. É recomendado pelo relatório TC-16 da ISSMFE (1989) a mensuração do torque, quando da rotação das hastes, de maneira a estimar o atrito lateral, a cada acoplamento de segmento da composição.

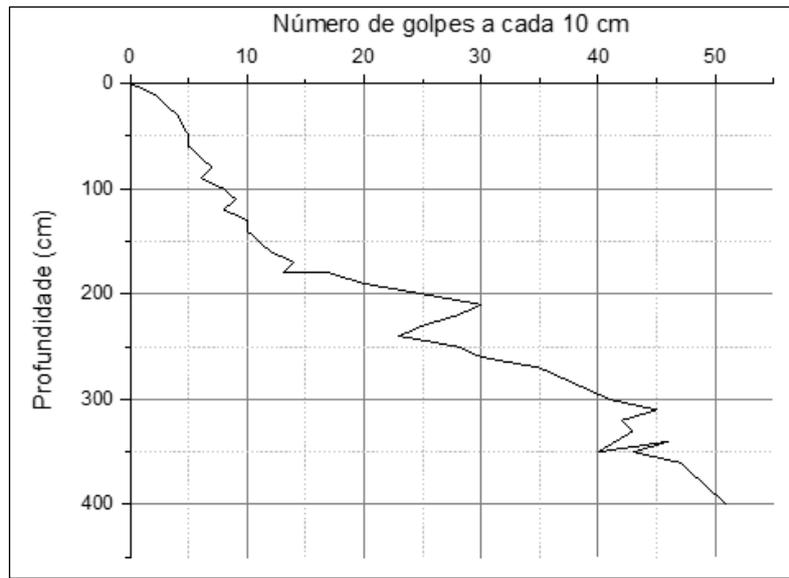


Figura 2.2 - Exemplo típico de registros de penetração do ensaio DPL

2.2.4 CUIDADOS DURANTE O ENSAIO DPL

O martelo do DPL deve ser levantado de modo suave, para garantir que a altura de queda não seja menor ou maior que 50 cm. O número de golpes é anotado a cada 10 cm, para tanto, se faz necessário marcar as hastes de modo a não comprometer o avanço do ensaio. O torque pode ser medido a cada rotação da composição, de modo, também, a evitar a perda do cone com um torquímetro, como foi explicado, rotacionando-se a haste uma vez e meia. A acurácia da medida da profundidade inclui também a medida da ponta do cone $\pm 0,02$ m. A deflexão, não deve exceder 1 mm, no ponto médio de cada haste, para os primeiros 5 metros da composição, e a 2 mm, para os demais metros de penetração do DPL. A ponta do cone não pode estar desgastada pelo uso a mais que 10 % do diâmetro do cone. De todo modo, o desvio máximo permitido no ensaio DPL é de 2 %, considerando o comprimento da composição. Cuidado, também, deve-se tomar ao desmontar a composição de modo a evitar danos ao martelo e às hastes.

2.3 ESTADO DA PESQUISA SOBRE O DPL

Estimativas ou previsões de capacidade de carga com o DPL tem sido realizadas ora com o SPT ora com o *Cone Penetration Test* ou CPT, de modo geral balizadas por provas de carga estáticas. Além disso, outros trabalhos de comparação de penetrômetros com o DPL e de interação desse penetrômetro são apresentados nesta seção. Vale ressaltar que as correlações feitas, entre o DPL e outros penetrômetros, para estimativa de capacidade de carga são restritas a cada caso estudado, não se constituindo em formulações gerais para o DPL.

2.3.1 ESTUDOS PARA FUNDAÇÕES RASAS OU DIRETAS

Kayalar (1988) utilizou ferramentas de análise estatística com foco no ensaio de um penetrômetro dinâmico do tipo pesado, conforme a norma alemã DIN-4094. Os ensaios foram realizados em um terreno de 500.000 m², totalizando 12 furos à profundidade de 10 metros, resistências de 16 MPa a 15,4 MPa. Esse estudo traz à luz a possibilidade da utilização do ensaio de penetrômetro dinâmico para o projeto de fundação rasa, embora a aplicação desses ensaios, costumeiramente, sejam empregados para fundações profundas.

A exemplo de Kayalar (1988), Ávila e Conciani (2005) relataram o primeiro estudo com o DPL realizado na região de Cuiabá, Centro-Sul de Mato Grosso, com objetivo de utilizar os dados do DPL para soluções de fundações rasas. Para o referido estudo foram realizados 13 furos de sondagem em 3 locais da cidade de Cuiabá, onde já se tinham dados de campanhas de ensaios com o SPT, medição de torque utilizado para calcular o atrito lateral do solo sobre o cone e uma prova de carga em placa ao lado de um ensaio DPL. Deve-se levar em conta que Cuiabá apresenta solos de elevadas resistências, onde prevalecem fundações rasas.

Para efeito de correlação com o SPT foram feitas 8 leituras por metro de cravação do DPL: 4 para intervalos de 15 cm, cada um denominado de N₁₅, e 4 para intervalos de 10 cm, cada qual anotado como N₁₀. O solo foi classificado nos locais de sondagens com alternâncias de solo areno-siltoso e silte-arenoso. As correlações obtidas entre DPL e SPT variaram conforme características físicas do solo onde os furos de sondagem foram feitos e, nesse estudo, os autores relataram que nos estratos com pedregulho não foram bem-sucedidas as correlações entre os penetrômetros, com R² igual a 0,27. Já para os solos siltosos, o R² alcançou 0,87. A utilização do DPL para previsão da tensão admissível superficial mostrou-se conservadora em relação à prova de carga em placa, na ordem de valor 100 kPa, estimado pelo DPL *versus* 400 kPa da prova de carga. Esses dados não são desanimadores, tendo em vista que, foi utilizada a fórmula

dinâmica dos Holandeses, em consonância ao trabalho de Kayalar (1988). Segundo Ávila & Conciani (2005), apesar das diferenças encontradas, é preciso lembrar que a fórmula dos holandeses foi criada para emprego em fundações profundas. A sua assimilação com fundações superficiais embute a parcela de atrito lateral vencida na cravação do cone. Portanto, esta não é a melhor forma de empregar os dados obtidos pelo DPL.

De todo modo, Ávila & Conciani (2005), não deixaram explícito como utilizaram a fórmula dos holandeses para estimar a capacidade de carga para fundação superficial e porque a correlação do DPL com o SPT não é bem sucedida para solos que têm pedregulhos.

Sousa e Viana da Fonseca (2006) realizaram estudos de estimativa de recalque para fundações diretas com resultados do DPL e, comparados a prova de carga em placa e correlacionados com o CPT e SPT. Realizaram-se experimentos em um aterro com solo residual granítico em Viana do Castelo, um aterro com solos xistosos na cidade do Porto e um maciço natural formado por solos de origem vulcânica, na Ilha da Madeira. Os métodos utilizados para estimativa de recalques, com algumas adaptações, foram de Schmertmann (1970) e Schmertmann *et al.* (1978), o método de Burland e Burbidge (1985) e Anagnostopoulos *et al.* (1991). Sem considerar o tipo de correlação se SPT ou CPT, os modelos elaborados pelos autores para estimativa de recalques apresentaram bom acordo com os resultados da prova de carga em placa. Contudo, o comportamento do solo residual granítico foi o que apresentou maior discrepância entre o modelo e resultado referenciado por prova de carga em placa.

2.3.2 APLICAÇÃO PARA ESTACAS

Nilsson e Cunha (2004) realizaram estudos com DPL, para projeto de estacas em solo tropical com presença de argila porosa para várias cidades do Brasil. Os autores partiram do fundamento que a medida de torque obtida no DPL pode fornecer o atrito lateral que, somada à resistência de ponta, fornecida pelo avanço do DPL, pode ser associada à cravação de uma estaca. Os autores utilizaram a Equação de Hiley para a energia de cravação, e a Equação de momento para o torque e, assim, obtiveram as resistências de ponta e atrito lateral, sem correção de energia. Mais tarde calibraram para os valores de resistência correlacionando-os com prova de carga estática no elemento estrutural da fundação. Com base nesses conceitos propuseram um modelo de previsão, Eq. 2.1, para projeto de estaca para solos brasileiros. Não foi levado em conta pelos autores o tipo de elemento de fundação, além do óbvio que se trata de estacas, bem como o tipo de solo.

$$P = \frac{\left[q_{pf} \times A_p + \int_0^z f dA_s \right]}{SF} \quad (2.1)$$

onde:

P = Capacidade de carga;

SF = Fator de segurança ≥ 2 ;

q_{pf} = Resistência de ponta da estaca (kPa);

f = Resistência lateral da estaca;

A_p = Área da seção da ponta da estaca;

dA_s = Área da seção lateral por metro da estaca;

Ávila & Conciani (2006) realizaram correlações entre os ensaios DPL e o SPT em Mato Grosso e compara com resultados de provas de carga em estaca. Os ensaios foram realizados na cidade de Primavera do Leste, onde o solo é tipicamente um silte arenoso, amarelo, não plástico, que pode ser classificado como SM, no sistema unificado, com índice de vazios da ordem de 1,7 (poroso). O lençol freático no local ensaiado está localizado aproximadamente a 5,5 m abaixo da superfície. Neste trabalho, empregou-se o método de Décourt e Quaresma (1978) para fazer a previsão da capacidade de carga de uma estaca apiloada. Os autores constataram que os dados oriundos do ensaio DPL são pouco correlacionáveis com os dados do SPT. Contudo, apontam, nesse trabalho, a possibilidade da utilização de dados obtidos com o DPL para dimensionamento de fundações profundas. Esta opção demonstra-se viável nas situações em que o solo se apresenta com resistências baixas. A previsão apresentou um valor 35 % menor que o valor medido com a prova de carga.

Ribeiro Junior et. al. (2007), realizaram uma comparação entre as previsões de capacidade de carga, feita com os dados do DPL e SPT, com os métodos estatísticos desenvolvidos por Aoki & Velloso (1975) e Décourt & Quaresma (1978) para prever a capacidade de carga de fundações profundas com base nos resultados de SPT. O solo em questão foi uma argila arenosa, vermelha, muito mole a média, localizada no município de Jaciara, MT. Ribeiro Junior et. al. (2007) propuseram inserir diretamente os resultados obtidos pelo ensaio de DPL nas fórmulas empíricas propostas por Aoki & Velloso (1975) e Décourt & Quaresma (1978).

Ribeiro Junior et. al. (2007), confrontaram os dados desses penetrômetros dinâmicos com as provas de carga estáticas em estaca à compressão e concluíram que deve ser evitado o uso do DPL para solos saturados devido à dissipação de energia que, segundo Ribeiro Junior *et al.* (2007), ocorre devido ao menor peso do DPL (provavelmente os autores estivessem fazendo

comparação com o SPT). Contudo, vale ressaltar que em solos saturados, uma parte importante da energia pode transmitir-se à água intersticial devido ao fato de o DPL não ter mecanismo de drenagem como tem o SPT (Nilsson, 2004). Ribeiro Junior et. Al (2007), afirmaram que houve um bom ajuste entre a capacidade de carga prevista com os dados do DPL, realizada com os modelos empíricos de Aoki & Velloso (1975) e Decóurt & Quaresma (1978) propostos para os ensaios de SPT, e os resultados de provas de carga em estacas. Deve-se ater que os métodos em questão são frutos de trabalhos voltados para estacas cravadas à percussão e que não respondem muito bem para solos que apresentam $N_{SPT} \leq 5$. Talvez, como se nota na Fig. 2.3, este seja o principal motivo da discrepância de estimativas em relação à prova de carga.

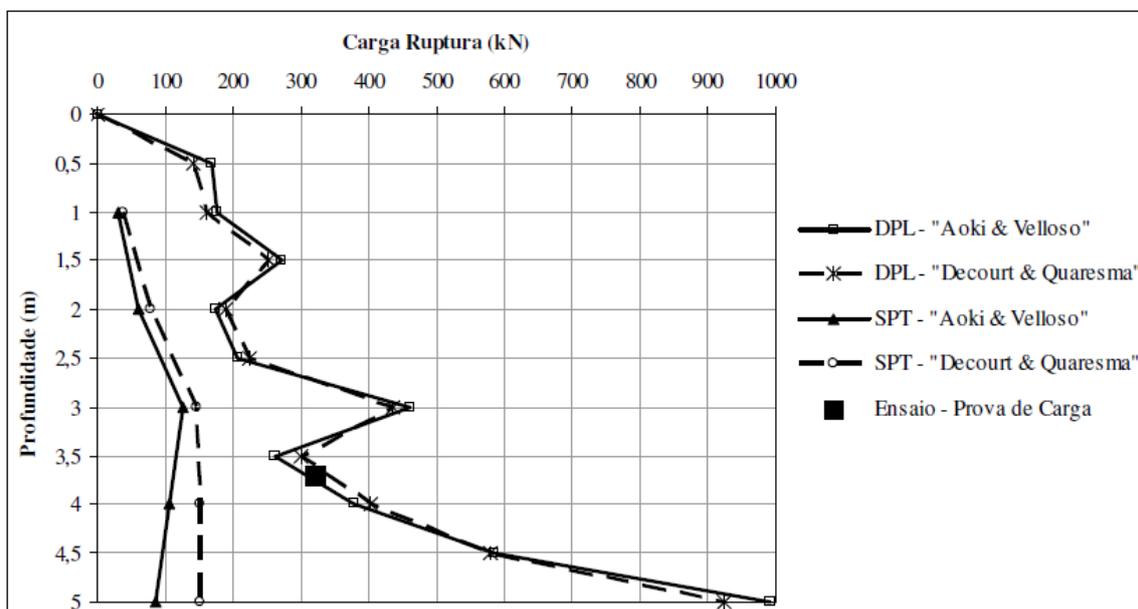


Figura 2.3 – Comparativo entre as previsões realizadas com DPL e SPT e a prova de carga (Ribeiro Junior et. al., 2007)

2.3.3 OUTROS ESTUDOS COM O DPL

Nilsson (2004) fez observações comparativas entre o DPL e o SPT mostrando, segundo o autor, as impropriedades de correlação entre um e outro, principalmente devido à geometria, forma de penetração, magnitude de energia e comportamento e interação do solo com penetrômetro. Segue-se os itens relevantes a esses aspectos, extraídos do trabalho de Nilsson (2004):

- a) O DPL tem mais compatibilidade com o CPT do que com o SPT, pelo fato de o DPL emitir baixa energia ao solo, o ensaio pode ser entendido melhor como quase-estático do que dinâmico e, ainda acresce a semelhança geométrica do cone do DPL com o cone do CPT;

- b) Em solos saturados, a resistência à penetração DPL é aumentada pelo fato de parte da energia ser transmitida à água intersticial. O DPL não tem mecanismo de drenagem como o SPT e, em solos finos e mais impermeáveis, não há tempo para drenar a água confinada por influência da energia do golpe. Cabe lembrar que a energia do SPT é quase dez vezes maior que a do DPL;
- c) O barrilete do SPT tem diâmetro externo 30% maior que a ponteira ou cone do DPL. A penetração do SPT desloca pouco o solo do perímetro ao barrilete-amostrador e muito mais para o interior deste, sem impor grandes alterações ao solo periférico ao barrilete-amostrador. Por sua vez, o DPL, enquanto penetra, amassa e compacta o solo, alterando as condições físicas do solo periférico à ponteira ou cone do DPL.
- d) A ponteira ou cone do DPL preserva a mesma área de contato com o solo, enquanto a área de contato lateral entre o solo e o barrilete-amostrador (SPT) é variável até um máximo de 850 cm²;

Nilsson (2004), recomenda a não utilização de correlações entre o DPL e o SPT, mas recomenda utilizar os dois ensaios de acordo com a situação. Em relação a alínea “a”, acima, o autor desta tese argui que, embora seja menor a energia do DPL em relação ao SPT, a comparação com o CPT é temerária. A própria constatação que fez Nilsson (2004) de que a penetração do DPL causa modificação significativa do solo, na periferia da ponta ou cone do DPL, conduz a um maior cuidado quando se compara eventos dinâmicos e quase-estáticos.

Martins e Miranda (2003), realizaram vários ensaios com o objetivo de obterem correlações entre vários penetrômetros e, no caso de interesse deste estudo, entre CPT e DPL, em um solo granítico, em vários locais urbanos da Região Norte de Portugal, essencialmente do Porto, Braga e Guimarães. O penetrômetro utilizado por Martins e Miranda (2003) é diferente do abordado pelo TC-16 da ISSMFE (1989)), embora com o mesmo nome: DPL. Aliás, Martins e Miranda reforçam, esse aspecto, ao compararem com o DPL referenciado pelo Eurocódigo 7 (CEN, 1999) que é assemelhado ao estudado nesta tese. Em resumo a energia potencial do penetrômetro utilizado Martins e Miranda (2003) é de 58,84 Joules, 20% maior que o DPL referenciado pelo TC-16 da ISSMFE (1989).

Segundo Martins e Miranda (2003), foi constatada boa correlação entre DPL e CPT ($R^2=0,869$), no caso a correlação entre a resistência de ponta do CPT com o número de golpes do DPL (N_{DPL}), e desse modo estabeleceram uma formulação, apresentada pela Eq. 2.2:

$$R_{p(CPT)} = 0,978 \times N_{DPL} \quad (2.2)$$

Ávila *et al.* (2006) apresentam um comparativo entre dois equipamentos de DPL: o desenvolvido por Nilsson (2003) e o denominado DPL-CEFET. O objetivo foi o de comparar a desempenho dos penetrômetros que, nesse caso, entende-se como a eficiência oriunda do número de golpes para penetrar 10 cm ou N_{10} do DPL, i.e., quanto maior o número de golpes para um mesmo solo, menor a eficiência. A Fig. 2.4 mostra um perfil até a profundidade de três metros dos resultados ensaios obtidos com os dois aparelhos. Segundo Ávila *et al.* (2006), no local dos trabalhos foram realizados dois furos de sondagem. Um dos furos foi executado com o DPL-CEFET. O outro furo foi executado com o DPL-Nilsson. Ambos os furos foram conduzidos no mesmo dia e hora. A distância entre os dois furos de sondarem foi de 1 m. Esta distância é considerada suficientemente perto para evitar variações do solo. Ávila *et al.* (2006), analisaram a influência da geometria dos aparelhos nos resultados e concluíram que a constituição dos equipamentos influencia na eficiência do ensaio do DPL e ainda que o DPL-CEFET é mais eficiente que o DPL Nilsson (2003). Sem apresentar razões, os autores, também, afirmam que as luvas empregadas no DPL-CEFET pioram o desempenho do aparelho. A juízo do autor desta tese, um ensaio não é suficiente para medir o desempenho comparado dos referidos penetrômetros.

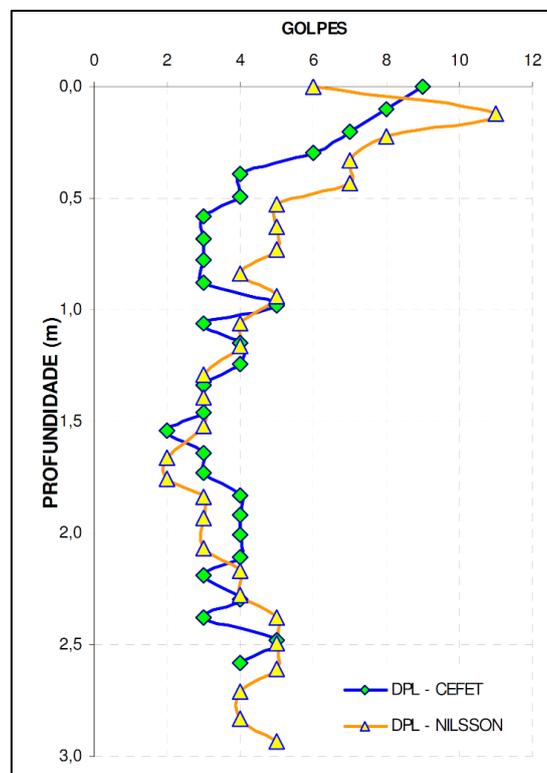


Figura 2.4 – Comparativo entre os perfis do DPL-CEFET e DPL Nilsson(2003) (Ávila *et al.*, 2003)

Souza *et al.* (2008), relatam o desempenho de três conjuntos do DPL, com diferença restrita aos formatos e pesos das hastes: parede fina, parede grossa e maciça. O objetivo era avaliar o desempenho de cada equipamento e definir aquele que melhor superasse as dificuldades de quebras e deformações das hastes. Em todas as versões, contudo, as massas do martelo e cone foram mantidas. No exame dos resultados não foi percebida diferença significativa entre resultados obtidos com os diferentes conjuntos. Todavia, os autores recomendam o de parede grossa, tendo em vista que apresenta maior durabilidade que os de haste fina e menor peso que os de haste maciça. As geometrias do DPL, como comentado, seguem padronização do TC-16 da ISSMFE (1989). A imagem representada na Fig. 2.5, mostra um aparelho de DPL de haste de parede grossa onde, percebe-se que o efeito das luvas é minimizado pela substituição por nípeis de mesmo diâmetro da haste.



Figura 2.5 – DPL com martelo hastes, ponta e nípeis (Figueiredo *et al.*, 2011)

2.4 INSTRUMENTAÇÃO DO DPL

A instrumentação do DPL não é assunto usual na geotecnia. Contudo, há uma orientação normativa para instrumentação do DPL, encontrada em várias normas europeias dos países que fazem parte da União Europeia, por exemplo a AENOR-CEN (2007), que estabelece a posição dos sensores para uma distância do topo do DPL (cabeça de bater) correspondente a dez diâmetros da haste. A instrumentação é sugerida apenas no topo da composição do DPL.

Nesta seção, será abordada de forma sucinta, o estado atual desses estudos de instrumentação. Antes de explicar o estado da técnica de medição de energia é necessário que seja abordado os

medidores de deformação que se utilizam de sinais elétricos, denominados extensômetros, e os sensores de atuação denominados acelerômetros.

A medição de energia no DPL, um caminho já percorrido por diversos autores que pesquisaram e desenvolveram métodos para medição de energia no SPT, i.e., a captura de sinais elétricos provocados por ondas de compressão e tração (força), por meio de células de carga, e medição da aceleração de partículas que depois de tratadas numericamente determinará a velocidade de partícula, através de acelerômetros.

2.4.1 CÉLULAS DE CARGA COM EXTENSÔMETROS ELÉTRICOS (STRAIN GAUGES)

A utilização de extensômetros elétricos é amplamente difundida na engenharia como meio de medição de deformações de massas metálicas. Resistores conjugados a superfícies metálicas, oferecem condições de medidas da deformação do material pela variação resistência dos filamentos. Dessa maneira, solicitações mecânicas que geram pequenas deformações em uma ou mais direções, podem ser detectadas e medidas pela variação da tensão elétrica nos resistores, que se contraem alterando a resistividade pelo aumento da seção do filamento. O método usual para medidas de força tem sido a associação de resistores, que se denomina de Ponte de Wheatstone, em homenagem ao seu criador Charles Wheatstone em 1834 (Portela e Arlindo, 1996).

2.4.2 SISTEMAS MICRO-ELETROMECCÂNICOS – MEMS

Os MEMS ou *Micro Eletromechanical Systems* são como micromáquinas. Diferem dos circuitos integrados por utilizarem processos complexos que se conjugam numa mesma placa de silício. Dessa maneira os MEMS são constituídos de microeletrônica, microestrutura mecânica, microatuadores e microssensores todos integrados numa mesma pastilha de silício (Freitas Júnior, 2005). Segundo Borges (2011), a tecnologia MEMS possibilita construir micro e nano sensores que executam a conversão de diversas grandezas físicas, como, por exemplo, pressão, temperatura, umidade, força, aceleração, em grandezas como corrente ou tensão elétricas. São encapsulados na forma de minúsculos circuitos integrados, que contêm o dispositivo sensor em si e uma eletrônica associada, de amplificação e condicionamento de sinal, de modo a facilitar a aquisição dos dados por parte do computador de controle.

Os sensores inerciais com tecnologia MEMS são baseados nas leis de Newton. Os acelerômetros medem a aceleração utilizando a segunda lei do movimento, i.e., a força resultante sobre um objeto é igual ao produto da massa do objeto por sua aceleração (El-Gizawy, 2009). A aceleração é em geral traduzida em g, ou $9,81 \text{ m/s}^2$, e.g., a aceleração de 1981 m/s^2 lê-se 200 g. A vantagem adicional de se utilizar os MEMS é o fato de que são calibrados em relação a valores de tensão que dispensam placas especializadas para aquisição de dados, podendo ser medidos ou adquiridos através de osciloscópios.

2.4.3 TIPIFICAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO

Costumeiramente, há quatro maneiras, segundo Cavalcante (2002), e três, segundo Belincanta & Ferraz (2000), para se instalar sensores no SPT. As tipificações apontadas por Cavalcante (2002), indicam a colocação de transdutores de força logo abaixo da cabeça de bater; transdutores de força instalados simultaneamente no topo da composição (posicionados a 10 vezes o diâmetro da haste abaixo da cabeça de bater) e logo acima do amostrador; transdutor de força e acelerômetros instalados numa seção abaixo da cabeça de bater (posicionados a 10 vezes o diâmetro da haste abaixo da cabeça de bater); e, transdutores de força e acelerômetros instalados simultaneamente no topo da composição e logo acima do amostrador.

Para Odebrecht (2003), a instrumentação deve sempre ser composta de um par de acelerômetros e uma célula de carga, de modo que, através dos acelerômetros, se possa registrar a passagem da onda longitudinal de compressão e, assim, por integração de força e velocidade pode-se aferir a medida de força registrada pela célula de carga. Contudo, Sy e Campanella (1991), não concordam com o que parece ser consenso entre os demais autores. Para esses autores, a medida de energia corrigida pelos acelerômetros, não apresentam ganhos significativos. Na opinião do autor desta tese, a utilização de acelerômetros, conjugados com as células de carga, é essencial para acurácia da medida de energia transmitida às hastes. No Anexo xxx há uma demonstração cabal de que as utilizações isoladas de sensores, tanto da célula de carga quanto do acelerômetro, são ineficazes para medida da energia transmitida do topo para as hastes.

2.5 DINÂMICA DOS PENETRÔMETROS

Est seção aborda a dinâmica de penetrômetros à luz do conhecimento que trata da dinâmica do choque entre hastes rígidas com base na propagação de ondas em barras longitudinais, equação da onda, geradas pelo choque de corpos rígidos, e cujas condições de contorno do problema obedecem à Lei de Hooke. É relevante lembrar que a teoria de choques rígidos já fora deduzida

desde o século XIX, a computação só foi possível com a evolução dos sensores de força e aceleração no final do século XX.

2.5.1 TRAJETÓRIA DO ESTUDO DE PROPAGAÇÃO DE ONDA EM BARRAS LONGITUDINAIS

O comportamento dinâmico do ensaio do DPL, a grosso modo, pode ser comparado ao da cravação de uma estaca, onde se reitera que não é semelhante ao do tradicional ensaio SPT, pois este apresenta o avanço metro a metro enquanto que o DPL tem o avanço contínuo. Ressalta-se que, embora possa ser comparado à cravação de uma estaca, o DPL é diferente quanto à queda do martelo na cabeça de bater: na estaca o pilão tem queda livre se desprezar o atrito do ar, enquanto que no DPL, o martelo tem sua queda guiada por uma haste que se atrita com o mesmo.

Hussein e Goble (2004), elaboraram um minucioso histórico sobre a teoria da Equação de onda aplicada às estacas, antes e depois do século XX. O autor desta tese resumiu o histórico feito na Tab. 2.2, sem negligenciar uma breve narrativa da trajetória histórica que será feita em seguida.

Samson *et al.* (1963), Tavenas e Audibert (1977), citam Isaacs (1931) como o primeiro a representar a cravação de uma estaca como um fenômeno de transmissão e não como fenômeno de impacto Newtoniano para a análise do comportamento dinâmico de uma estaca. Samsom *et al.* (1963), informam sobre uma aplicação especial para a cravação de estacas da teoria de resiliência feita por H. Moseley em 1843, embora, não haja dúvida, que o primeiro trabalho com base na teoria da Equação da onda, aplicada as estacas, seja de Isaacs (1931) como reitera Danziger (1991) e Alves *et al.* (2004).

Isaacs (1931) descreve que, até então, todas as fórmulas para estacas consideravam o comportamento desse elemento estrutural atuando como uma unidade após receber o impacto de um martelo. O autor discordando dessa Hipótese realizou um experimento para medir o movimento da onda longitudinal em uma estaca. Construiu pequenas peças de aço (hastes) cujas pontas, eram convexas, de maneira que pudessem ser impactadas uma à outra. As peças eram acopladas em diversos pares com comprimentos que variavam e, de maneira que, as peças pudessem balançar de forma pendular em um plano fixo e com o eixo da peça na horizontal. Foram realizados diversos impactos aos pares de peças conjugadas e, assim, o autor conseguiu demonstrar que o movimento da onda longitudinal requer um tempo de propagação do topo à

ponta. Curiosamente, o autor aconselhava a consulta a um bom livro de Física que tratasse da propagação de onda em meio elástico.

Tabela 2.2 Trajetória do estudo da equação da onda

Cientista	Estudo	Obra	Ano
Galileo	Dinâmica dos corpos em movimento	“De Motum Gravium”	1590
Hooke	Propriedade elástica dos materiais; Lei de Hooke	“De Potentiâ Restitutiva”	1678
Coulomb	Mecânica dos corpos elásticos	“Sur une Application des Rugles de Maximis et Minimis à Quelques Problèmes de Statique Relatifs à L’architecture”	1773
Young	Módulo de elasticidade	“A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts”	1809
Navier	Equações fundamentais para teoria da elasticidade	Memorial para a Academia de Ciências	1820
Hodgkinson	Trabalho experimental sobre os efeitos de impactos axiais sobre vigas	<i>British Association Reports</i> for the years 1833-1835.	1835
Saint-Venant & Boussinesq	Barra elástica fixada em uma ponta e impactada noutra (função descontínua)	Tabelas computacionais e diagramas ilustrando impactos longitudinais para diferentes proporções em peso da barra atingida por uma massa com base na solução formulada por Boussinesq	1883
Hertz & Kirchhoff	Contribuição para a teoria de compressão de corpos elásticos	Soluções em Tabelas numéricas para aplicações de engenharia.
Wallis	Ressonância e harmônicos em uma corda
Sauveur & Taylor	Primeiras tentativas para calcular a frequência de vibração de uma corda	Denominação de fundamental para baixas frequências e harmônicas para as demais frequências.	1713
Bernoulli, Daniel	Primeira proposição do princípio de superposição linear de harmônicas
Fourier	Estabeleceu um método para séries harmônicas	"Analytical Theory of Heat Flow"	1822
D’Alembert	Equação derivada para a vibração de uma corda	Hoje conhecida como Equação da Onda
Lagrange	Idêntico trabalho ao de D’Alembert para tubo de órgão	
Donnel	Expandiu as relações de Saint Venant para barras não uniformes.		1930
Isaacs	Aplicação de onda unidimensional para onda de tensão na análise de cravação de estacas	“Reinforced concrete pile formulae”	1931
Smith	Primeira aplicação digital aplicada para a engenharia civil	Formulação de uma numérica com a utilização de elementos discretos com as equações de diferenças finitas	1960

Embora resolvido o problema teórico do impacto em uma barra até o aparecimento de computadores e, por consequência, de aplicativos de análise numérica, houve um silêncio no que se refere ao desenvolvimento de medição de energia em estacas até a década de 1950 (Tavenas e Audibert, 1977). Segundo Nakao (1981), as soluções numéricas só eram obtidas para condições de contorno simples onde as condições reais de cravação de uma estaca eram desconsideradas. Tavenas e Audibert (1977), Nakao (1981), Danziger (1991) entre outros, informam que o primeiro trabalho com base em solução numérica foi apresentado por Smith em 1960, onde foram analisados os deslocamentos de uma estaca, usando um modelo simples para a simulação do sistema martelo-estaca-solo.

O trabalho de Smith (1960) estabeleceu a primeira solução numérica para estacas com base na Equação da onda. O autor construiu um modelo no qual o martelo, a estaca e todos os componentes que envolvem a ação de cravação de estaca, representados por uma série de molas e massas interligadas, como se pode observar na Fig. 2.6, uma adaptação do modelo original de Smith (1960) feita por Alves *et al.* (2004).

A representação diagramática, Figura 2.6, pode ser entendida da seguinte forma: o martelo e capacete geralmente são curtos, pesados e rígidos e, assim, podem ser representados sem elasticidade com massas W_1 para o martelo e W_2 para capacete; o cepo e coxim são em geral de madeira ou material similar, comparativamente leves em relação ao martelo e capacete e podem ser representados pela rigidez de uma mola, no caso K_1 para o cepo e K_2 para o coxim. Como a estaca é um objeto pesado, porém de comprimento significativo, portanto compressível, Smith (1960) sugere a divisão da estaca em unidades de comprimentos (de 1,50 a 3,0 metros aproximadamente). Desse modo, o peso de cada unidade de comprimento é representado por uma massa individual (na Figura 2.6, de W_3 a W_{m+1}) e a elasticidade de cada unidade de comprimento representada pela rigidez de uma mola (na Figura 2.6, de K_3 a K_{m+1}). O movimento de cada massa e cada mola é calculado como se fosse realmente objetos separados um do outro. Se a seção da estaca é uniforme, as massas e as molas representadas são iguais. Pode-se arguir que é o que ocorre com o SPT e o DPL. Da Figura 2.6, percebe-se que para cada unidade de comprimento (conjunto de mola e massa) há uma reação devido ao atrito lateral (na Figura 2.6, $R_{d(3)}$ a $R_{d(m+1)}$). A Reação de ponta é representada por RP.

O tempo de ocorrência do impacto é dividido em pequenos intervalos de 1/4000 segundos. A ação de cada peso e mola é então calculada separadamente para cada intervalo de tempo. Dessa forma, pode ser feita uma determinação matemática das tensões e penetração permanente por

golpe, para qualquer valor de resistência oferecida pelo solo. Segundo Smith (1960), o processo pode ser comparado com os desenhos para fazer um filme animado. Os artistas que preparam esses desenhos, devem ter em conta o fato de que o filme será projetado em 24 quadros por segundo. Cada desenho deve, portanto, ser diferente do desenho seguinte por 1/24 segundos, de modo que, a imagem possa parecer realista quando projetada. Os cálculos devem ser feitos para determinar o quão longe qualquer objeto em movimento avançará em cada 1/24 segundos. Se o movimento é uniforme, os deslocamentos em cada desenho deverão ser uniformes. Se o movimento for uniformemente acelerado, tal como no caso de um objeto em queda, os deslocamentos devem diferir em quantidades crescentes, facilmente calculados, usando as leis bem conhecidas de movimento uniformemente acelerado.

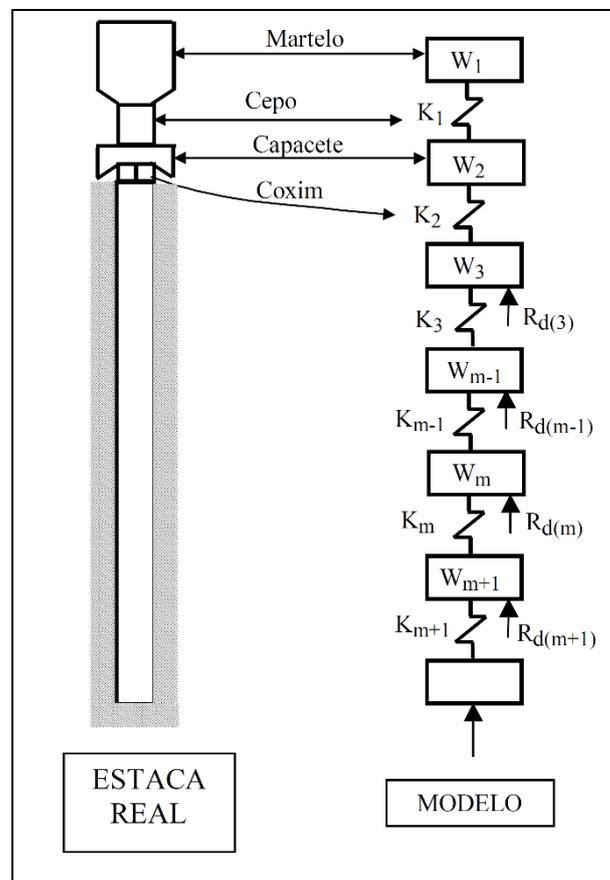


Figura 2.6 - Modelo de representação da estaca para resolução numérica (Smith, 1960), adaptado de Alves *et al.* (2004)

2.5.2 ANÁLISE DA EQUAÇÃO DA ONDA

A dedução da Equação da onda é comumente utilizada quando se analisa a dinâmica de objetos que penetram o solo por impacto, seja um penetrômetro, como o DPL e SPT, ou uma estaca. A

dedução, a seguir, tem por base a de Timoshenko e Goodier (1951) para propagação de ondas em meio sólido elástico e, também, conforme modelos de autores nacionais do estudo de dinâmica (Nakao, 1981; Danziger, 1991; Gonçalves *et al*, 1996; Cavalcante, (2002); Odebrecht, 2003). São válidas a Lei de Hooke e a Segunda Lei de Newton. Ressalta-se que há várias maneiras de deduzir, mas no caso, deve-se considerar as seguintes condições: o impacto se dá entre superfícies coplanares e justapostas, de duas barras indeslocáveis em relação a um eixo de referência; a distribuição de tensão é uniforme sobre a seção em análise; os movimentos transversais das partículas são negligenciados; e o fenômeno obedece a Lei de Hooke.

A Fig. 2.7 detalha uma barra uniforme de seção transversal A , módulo de elasticidade E com massa específica ρ . Observa-se nessa abstração que no tempo $t=0$ a barra está em repouso relativo, i.e., não atua nenhuma força externa; no segundo, em um instante $t=t$, logo após o elemento dx da barra ter sofrido deslocamento u no tempo t ; e no terceiro o elemento dx , visto de forma isolada, com o surgimento das tensões em equilíbrio. Considere que o elemento dx , distante da origem $x+dx$, sofre os deslocamentos u e $u + \frac{\delta u}{\delta x} dx$ e as tensões: $\sigma x + \frac{\delta \sigma x}{\delta x} dx$

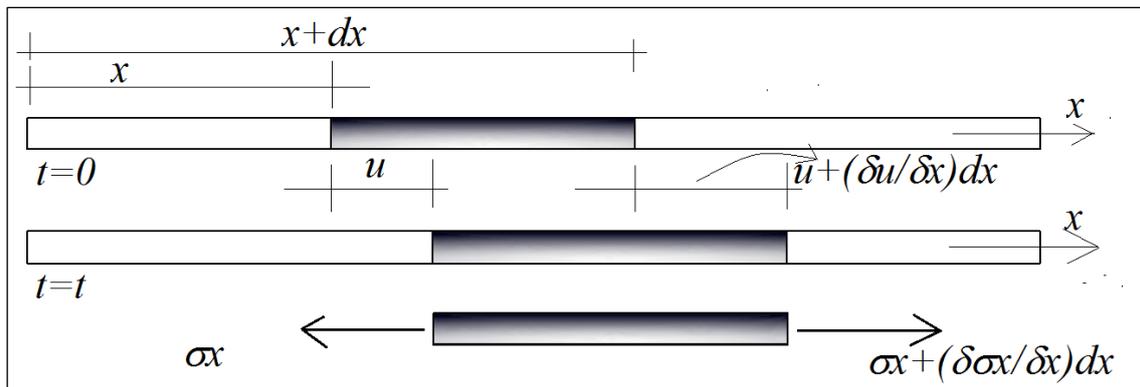


Figura 2.7 – Tensões e deslocamento numa barra uniforme

A soma das forças em equilíbrio no elemento dx , na direção axial da barra é apresentada na Eq. 2.2:

$$-\sigma_x A + \left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) A = F \quad (2.3)$$

Mas, de acordo com a segunda lei de Newton, Eq. 2.4:

$$F = \rho dx A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.4)$$

Assim, substituindo na Eq. 2.4 na Eq. 2.3 tem-se a Eq. 2.5:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx A = A dx \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

Assim tem-se a Eq. 2.6:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

A tensão σ pode ser descrita pelo produto da deformação ε pelo módulo de elasticidade E , Eq. 2.7 :

$$\sigma_x = E \varepsilon \quad (2.7)$$

e, a deformação dada pela Eq. 2.8:

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.8)$$

Tem-se a Eq. 2.9, substituindo a Eq. 2.8 na Eq. 2.6:

$$\frac{E \partial^2 u}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

Como a velocidade de propagação de tensão c pode ser escrita pela Eq. 2.10:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.10)$$

Pode-se escrever a Equação diferencial parcial linear de segunda ordem, conhecida como Equação da onda Eq. 2.11:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (2.11)$$

onde:

u – deslocamento de uma seção transversal da barra a uma distância x da origem;

t – tempo do pulso;

c – velocidade de propagação da onda na barra.

Conclui-se, do exame da Equação 2.10, que a velocidade de propagação da onda c depende da natureza do material por onde trafega a onda.

2.5.2.1 PROPORCIONALIDADE ENTRE A VELOCIDADE DE PARTÍCULA E A VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA

Para Figueiredo (1977), a Hipótese que culmina para a Eq. 2.11 é simplificadora, pois de fato, o que ocorre a uma barra submetida a um impacto é, o aparecimento de tensões em todas as

direções ao plano de qualquer seção da barra. Contudo, nos casos de pequenas vibrações longitudinais o modelo matemático é aceitável.

A distinção entre a velocidade de propagação da onda na barra c e a velocidade de partícula v é necessária para compreender o fenômeno dinâmico do impacto em uma barra. Cavalcante (2002), adaptou o modelo de Timoshenko e Goodier (1951) que explica essa distinção. A Fig. 2.8 (a) mostra o modelo de Timoshenko e Goodier (1951) que considera, que uma barra prismática uniforme ao sofrer um impacto à esquerda da barra transmite a propagação da onda de tensão para a direita da barra em infinitas camadas adjacentes, de uma para outra, em uma velocidade c e, ao final do tempo t a onda percorreu uma distância ct . Cavalcante (2002), discretiza o modelo de Timoshenko e Goodier (1951) e considera que, de início, somente uma zona da barra, submetida a uma tensão uniformemente aplicada à barra $-\Delta u$, é comprimida, Fig. 2.8 (b), para um tempo Δt e um comprimento $\Delta x = c\Delta t$ e assim sucede que para um tempo $2\Delta t$ o comprimento será $2\Delta x = 2c\Delta t$, Fig. 2.8 (c) até que para um tempo tn e comprimento da barra $l = ctn$, Fig. 2.8 (d), a onda de compressão tenha viajado de um extremo a outro da barra.

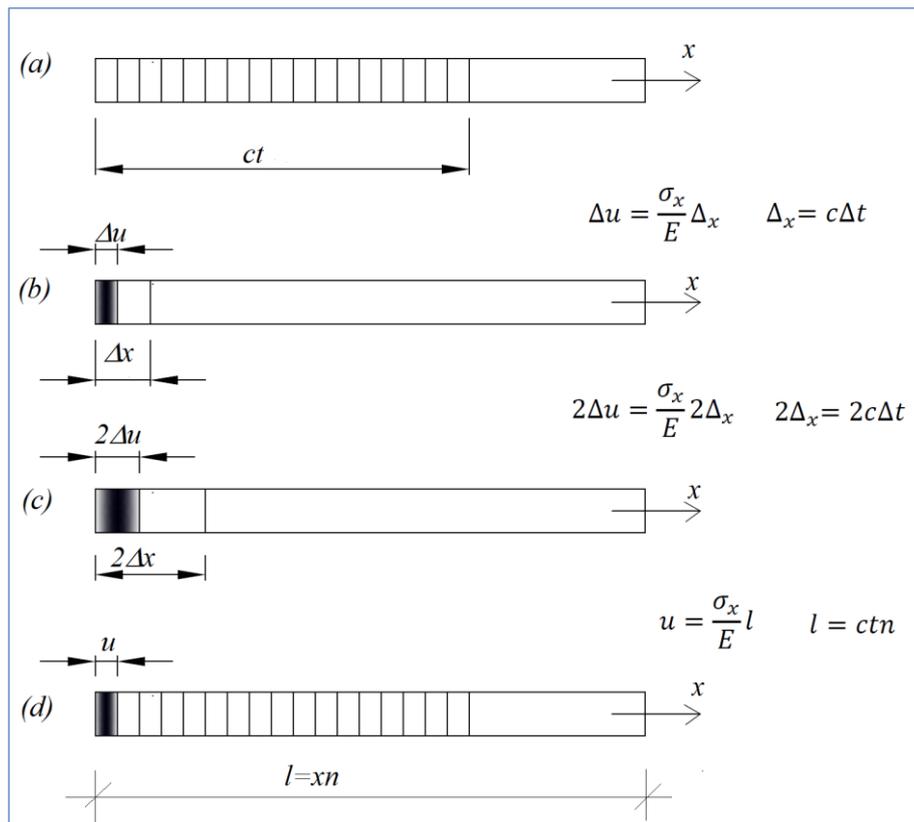


Figura 2.8 – Mecanismo de propagação de onda de tensão em uma barra prismática - livre adaptação de Timoshenko e Goodier (1951) e Cavalcante (2002)

Continuando a análise do mecanismo de propagação de onda de tensão em uma barra, observa-se que a barra sofre um encurtamento elástico que coincide com o deslocamento da extremidade esquerda da composição (Cavalcante, 2002). Com base na lei de Hooke pode-se escrever a Eq. 2.12:

$$\Delta u = \frac{\sigma_x}{E} \Delta x \quad (2.12)$$

Sabe-se que a Eq. 2.13:

$$\Delta x = c \Delta t \quad (2.13)$$

Tem-se na Eq. 2.14:

$$\Delta u = \frac{\sigma_x}{E} c \Delta t \quad (2.14)$$

Como a velocidade de deformação pode ser expressa, Eq. 2.15, por:

$$v = \frac{\Delta u}{\Delta t} \quad (2.15)$$

Tem-se Eq. 2.16:

$$v = \frac{\sigma_x}{E} c \quad (2.16)$$

A Equação 2.16, mostra que a velocidade de partícula tem o mesmo sentido que o da velocidade de avanço de propagação da onda de tensão (compressão), e terá sentido contrário quando a propagação representar uma onda longitudinal de tração. A Equação 2.16 implica que se deve distinguir a velocidade de propagação de onda de tensão, c , da velocidade de partícula, v . A velocidade de partícula considera que a zona comprimida da barra sofre um encurtamento devido a tensão de forças compressivas equivalente a $(\sigma/E)ct$. Por isso, a velocidade de partícula da extremidade esquerda da barra é igual à velocidade de propagação de tensão multiplicada diretamente pela tensão aplicada à barra, e inversamente proporcional ao módulo de Young da barra (Timoshenko e Goodier, 1951).

2.5.2.2 PROPORCIONALIDADE ENTRE FORÇA INCIDENTE E VELOCIDADE DE PARTÍCULA

Danziger (1991), apresenta um esquema simplificado de Goble (1986) para análise de estacas. O modelo demonstra as proporcionalidades entre: a força incidente e a velocidade de partícula;

e a velocidade de propagação da onda de tensão e a velocidade de partícula quando estas se propagam em uma direção.

Considere a Fig. 2.9 como uma estaca que subitamente é submetida a uma tensão, e que A seja a área da seção da estaca e ρ a massa específica do material da estaca. O modelo, Figura 2.9, apresenta regiões comprimidas (deformadas e regiões em repouso (não deformada). O exame tem foco na partícula que está na primeira estaca, na vizinhança entre a região deformada e não deformada na primeira estaca, e depois, já deslocada, para uma região deformada na segunda estaca, no trecho Δx . A velocidade de propagação da onda, c , é a razão do comprimento Δx pelo tempo (t), enquanto a velocidade de partícula, v , é razão de Δu pelo tempo (t). Obviamente, que a aceleração será a derivada da velocidade de partícula pelo tempo.

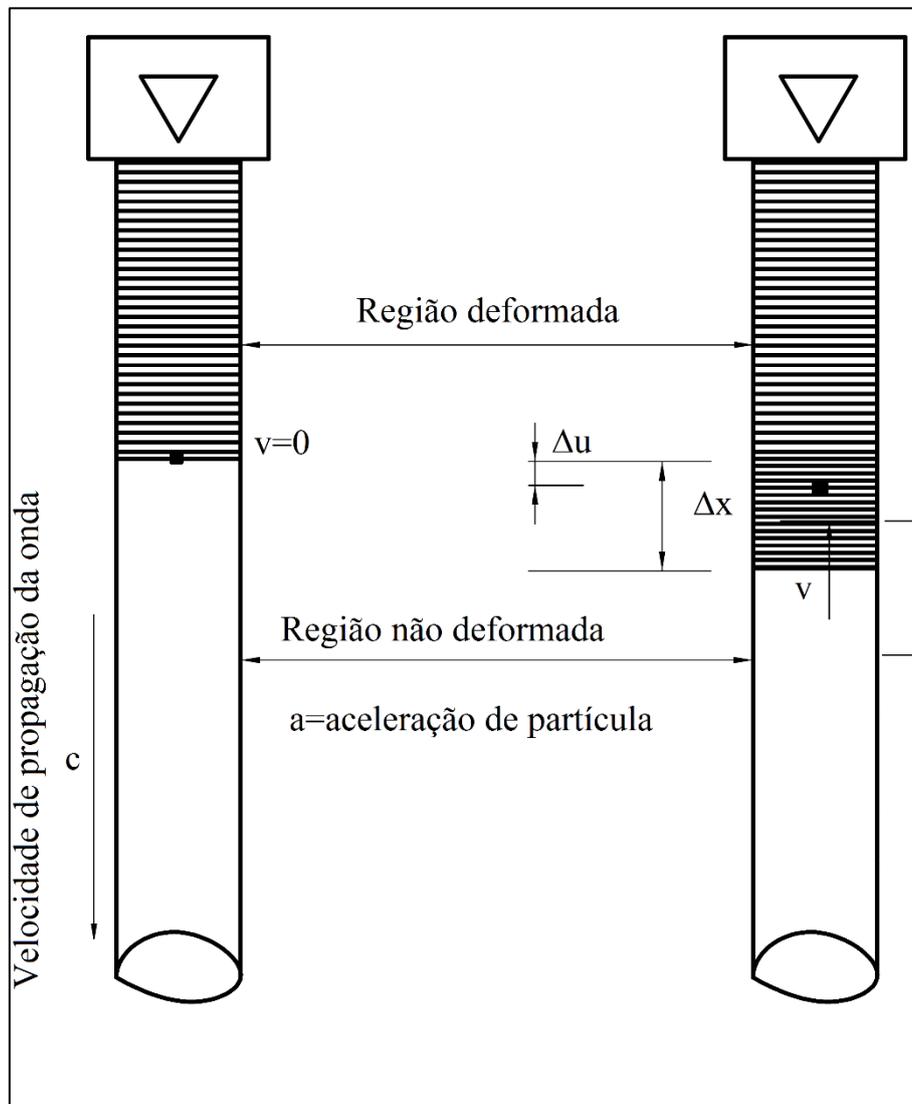


Figura 2.9 – Ilustração da proporcionalidade entre velocidade de partículas e a velocidade de propagação da onda (Goble, 1986, segundo Danziger, 1991)

Assim tem-se as seguintes relações:

$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.17)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta u}{\Delta x} \quad (2.18)$$

$$v = \frac{\Delta u}{\Delta t} \quad (2.19)$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (2.20)$$

Resulta ainda a relação Eq. 2.21:

$$\varepsilon = \frac{v}{c} \quad (2.21)$$

Considerando A como seção da estaca e a Equação 2.16, tem-se a Eq. 2.22:

$$F = \frac{EA}{c} v \quad (2.22)$$

Verifica-se na Equação 2.18, que há proporcionalidade entre a força incidente e a velocidade de partícula quando a onda de tensão propaga em uma direção da estaca. Aplicando-se a segunda lei de Newton, $F=ma$, no trecho Δx , Figura 2.9, tem-se a Eq. 2.23:

$$F = \rho A \Delta x \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (2.23)$$

Substituindo c por $\Delta x/\Delta t$ na Equação 2.19 tem-se a Eq. 2.24:

$$F = EA v \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (2.24)$$

Considerando v como velocidade final e v_0 velocidade inicial, então $\Delta v = v - v_0$ e assim a Equação 2.23 pode ser escrita como Eq. 2.25:

$$F = \rho A \Delta x \frac{v - v_0}{\Delta t} \quad (2.25)$$

Fazendo-se a igualdade entre as Eq. 2.24 e 2.25 e, considerando que o elemento da estaca se encontra em repouso, $v_0=0$ obtém-se a Eq. 2.26

$$\rho A \Delta x \frac{v - v_0}{\Delta t} = EA v \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (2.26)$$

Simplificando 2.26, tem-se a Eq. 2.27

$$\rho \frac{\Delta x}{\Delta t} = E \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (2.27)$$

E simplificando ainda mais, tem-se a Eq. 2.28:

$$\left(\frac{\Delta x}{\Delta t} \right)^2 = \frac{E}{\rho} \quad (2.28)$$

A Equação 2.28 é outra maneira de expressar a Equação 2.10, ou seja $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$

Reitera-se que a proporcionalidade entre a velocidade de partícula - v - e a velocidade de propagação da onda - c - dependem apenas do material da estaca, no caso analisado por Danziger (1991), ou da haste do penetrômetro DPL, caso desta tese. O fator de proporcionalidade entre a força incidente e a velocidade partícula, comumente é representado por Z , impedância, e pode ser escrita como se segue Eq. 2.29:

$$F = Zv \quad (2.29)$$

E, por consequência a Eq. 2.30:

$$Z = \frac{EA}{c} \quad (2.30)$$

onde:

Z = impedância do material da estaca submetido à tensão axial; e

A = área da seção do material da estaca submetido à tensão axial.

2.6 MEDIÇÕES DE ENERGIA NO SPT

As medições de energia transmitida às hastes pelo golpe do martelo do SPT, constituem um segmento de estudos importantes para a Geotecnia. Nesta seção são apresentados os principais trabalhos sobre o tema.

2.6.1 PRIMEIROS TRABALHOS

Segundo Cavalcante (2002), Palacios (1977) e Schmertmann e Palacios (1979) se constituem os primeiros trabalhos relacionados à medição de energia transmitida a hastes metálicas. O trabalho de Palacios tem como base a teoria que Fairhurst (1961), desenvolvida para aplicação em sondas de percussão em rochas. Conforme Demír (2007), o trabalho de Fairhurst (1961) constituiu-se em determinar a forma da onda da força em função de um pistão que impactava uma sonda de percussão.

Segundo Demír (2007), Fairhurst realizou vários experimentos, com os quais demonstrou que a forma de onda dependia da geometria do pistão. A Fig. 2.10 apresenta em (a) e (b) duas formas de onda percussiva e, em (c), uma sonda de percussão e o pistão, apresentada no trabalho de Fairhurst (1961).

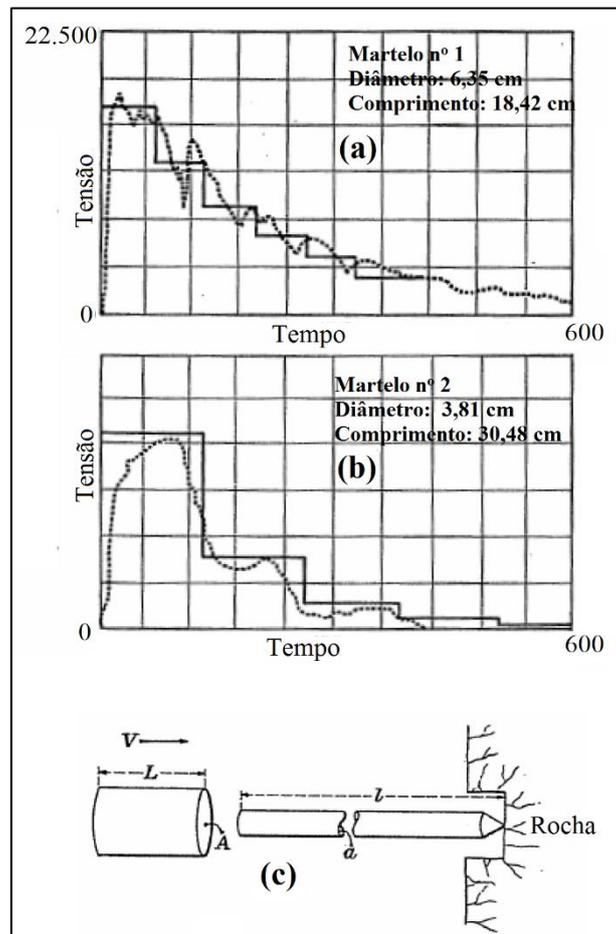


Figura 2.10 - Sistema de percussão para rochas de Fairhurst (1961) (Demír, 2007 Modificado)

Para Demír (2007), Fairhurst considerava que havia concordância entre o nível de tensão teórico e experimental no limite de erro aceitável, que as tensões medidas não se desenvolviam instantaneamente, e que o contato das superfícies no momento do impacto não se dava, também, de forma instantânea. Todos os pistões utilizados no experimento tinham seção uniforme e característica de impedância muito maior que a sonda. Nota-se na Fig. 2.10 que a mudança de dimensões do pistão resulta na mudança de forma de onda, Figuras 2.10 (a) e 2.10(b)).

2.6.2 ENERGIA TRANSFERIDA DO MARTELO PARA AS HASTES DO SPT – O TRABALHO DE SCHMERTMAN E PALACIOS

Schmertmann e Palacios (1979) descreveram o fenômeno descrito por Fairhurst (1961) que acontece quando dois materiais similares se chocam, no caso martelo e hastes. Uma onda de compressão viaja com a mesma velocidade: para baixo em direção às hastes e para cima em direção ao martelo. Devido ao comprimento do martelo ser curto quando comparado à haste, a onda de compressão alcança rapidamente o final do martelo. Ao alcançar a extremidade livre do martelo a onda de compressão é refletida de mesma forma e magnitude. Essa onda de tensão refletida, progressivamente, anula a onda de tensão de compressão no martelo até que finalmente, o martelo não apresente nenhuma tensão e a onda de compressão retorna ao ponto de contato do martelo com a haste. Contudo, as hastes permanecem em contato com o martelo devido ainda carregarem ondas de tensões compressivas. Então, um novo pulso de onda de compressão, refletido do martelo, tem início no ponto de contato entre o martelo e haste em menor magnitude de tensão e energia que viaja, também, nos dois sentidos para cima no martelo e para baixo nas hastes. Esse processo ocorre a cada ciclo até que todo o sistema, constituído pelo martelo e hastes, entre em repouso. Observa-se que a cada ciclo ocorre a redução do nível de energia em relação ao primeiro pulso de onda.

A forma de onda da força no domínio do tempo que viaja em direção às hastes, segundo Schmertmann e Palacios (1979), depende primordialmente da razão de impedância entre o martelo e haste (r). Como o martelo e haste são do mesmo material, r é igual à relação da área de seção do martelo, a , pela área de seção da haste, A_h , visto na Eq. 2.31:

$$r = \frac{a}{A_h} \quad (2.31)$$

Derivado do estudo de Fairhurst (1961), o primeiro ciclo tem uma grande magnitude, sabendo que a massa específica do material é ρ ; a velocidade no instante do impacto é v_{hi} , conforme mostrado na Eq. 2.32:

$$\sigma_{\max} = \rho c \left(\frac{v_{hi}}{1+r} \right) \quad (2.32)$$

E para os demais ciclos, conforme a Eq. 2.33:

$$\sigma = \sigma_{\max} \left(\frac{1-r}{1+r} \right)^n \quad (2.33)$$

Schmertmann e Palacios (1979) ilustraram teoricamente cada ciclo de tensão entregue às hastes para quatro relações de impedância do martelo com a haste, mantendo o peso do martelo em 620 N. A partir de Fairhurst (1961), esses autores expressaram na Eq.2.34 a forma de onda suave, supondo que o martelo fosse inteiramente rígido e razão de impedância $r=0$, na qual m é a massa do martelo e t é o tempo de propagação da onda de tensão.

$$\sigma = \rho c v_{hi} e^{-\frac{a\rho ct}{m}} \quad (2.34)$$

Uma variação em função da força incidente, F_i , foi apresentada por Cavalcante (2002), Eq. 2.35:

$$F_{hn} = (v_{h0} \rho c a) e^{-\frac{a\rho ct}{m}} \quad (2.35)$$

Onde F_{hn} é a força seccional na composição de hastes no tempo $t=2nL/c$; v_{h0} é a velocidade do martelo no instante do impacto; a área da seção transversal das hastes; t é o tempo considerado a partir do impacto; m é a massa do martelo e n é um número inteiro e positivo. Para determinar o tempo de decaimento da força até que se anule o intervalo de tempo, este deve situar-se entre $0 > t \leq 2 L/c$, onde L é o comprimento da haste.

Cavalcante (2002) fez para o SPT uma simulação, com base na Equação 2.35, onde considerou a massa do martelo fixada em 64 kg, a velocidade do martelo no instante do impacto em 3,07 m/s, a área da seção da haste em $4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. Isso resultou em uma força seccional máxima de 50,84 kN, e para o tempo de 20 ms para o qual Cavalcante (2002) considerou que o pulso de força cessaria o efeito na haste, esta teria o comprimento de 51,20 metros.

Do mesmo modo foi feita a simulação para o DPL, a partir da velocidade na cabeça de bater estimada em 2,97 m/s (oriunda dos dados de velocidade de queda do martelo medida e

apresentada no Apêndice B, desta tese), a massa do martelo fixada em 10 kg, a seção da haste do DPL em $2,87 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. Além disso, foi considerado o tempo de escoamento para uma haste de DPL de comprimento infinito e a condição de contorno para a ponta do cone para a qual não há reação do solo.

A Fig. 2.11 mostra o pulso de onda simulado pela Equação 2.35, para o DPL. Observa-se que a força máxima de incidência é de 34,46 kN, o comprimento da haste para que se dissipasse toda a força, deveria ser de 25,6 metros, correspondente a um tempo de 10 milissegundos, exatamente a metade da dissipação para o SPT NBR 6484 (2001), realizado por Cavalcante (2002). Para essa parametrização a força no tempo de 10 milissegundos corresponde a uma força de $3,1 \times 10^{-4} \text{ kN}$. Salienta-se que foram desprezadas as razões de impedância da cabeça de bater-haste, da haste-cone, bem como as razões de impedância da conexão com a haste e haste com a conexão e a reação do solo à penetração do cone do DPL.

É nítida a constatação que a governante do pulso de força é a natureza do material (c e ρ) e que a força seccional máxima depende da velocidade do martelo no instante do impacto, além da massa do martelo.

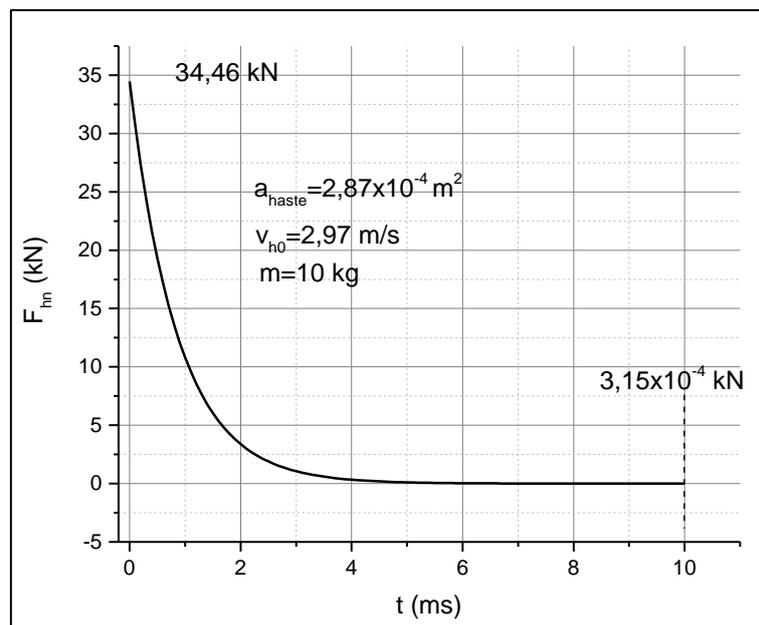


Figura 2.11 - Pulso de força simulado em conformidade com a Equação 2.35

Schmertmann e Palacios (1979) conferiram a teoria de forma de onda de Fairhurst (1961) com dados experimentais mostrados na Fig. 2.12. Para os autores, 90% da penetração do amostrador do SPT ocorreria no primeiro pulso de onda, com o martelo e haste permanecendo em contato

até a tensão “cutoff”, mostrado na Figura 212, onde os demais pulsos seriam pouco significativos para a penetração do amostrador.

A tensão “Cutoff”, mencionada por Schmertmann e Palacios (1979) e reforçada por Cavalcante (2002), pode ser descrita como se segue: a onda de compressão inicial nas hastes (comprimento finito) reflete no amostrador e retorna como onda de tração até o contato entre o martelo e a haste. No tempo $2l/c$, a onda de tração supera a de compressão existente entre o martelo e a haste. O resultado disso é uma tensão de tração e deformação que faz com que a haste seja puxada para baixo e se separe do martelo. Fica evidenciado que após o ciclo da primeira onda de compressão, o martelo manterá novo contato com a haste, gerando um segundo impacto que para Schmertmann e Palacios (1979) ocorre muito tempo depois para contribuir significativamente na penetração do amostrador.

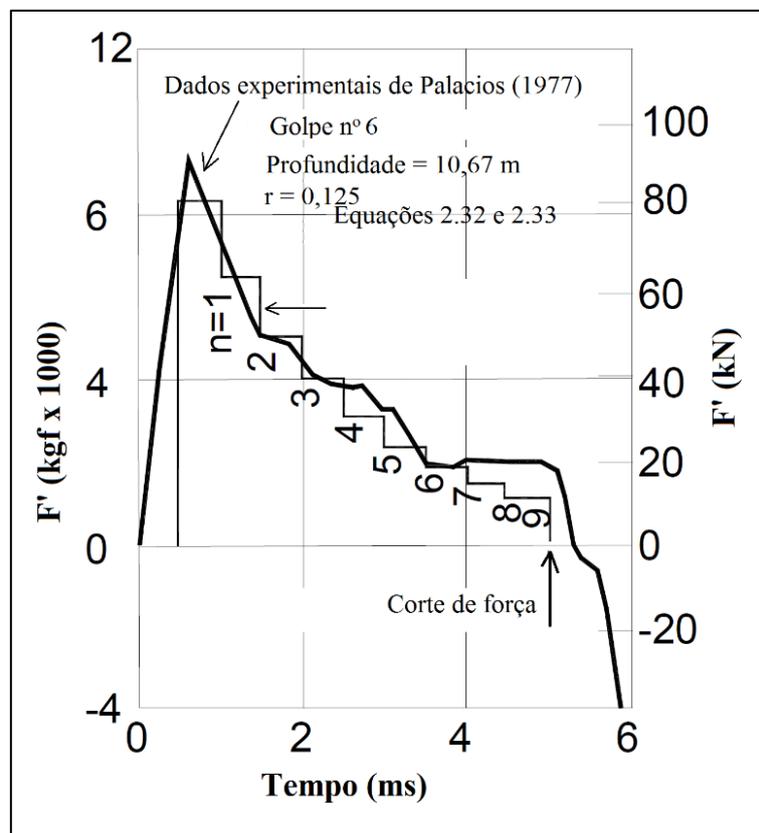


Figura 2.12 - Energia contida nas hastes na primeira onda de compressão (Schmertmann e Palacios, 1979)

A Mecânica demonstra que para os materiais elásticos, uma onda contém de modo igual energia cinética oriunda do movimento da partícula nas hastes e, uma energia de compressão armazenada na haste como se fora uma mola comprimida (energia potencial). A Eq. 2.36 expressa o total de compressão da onda passante por um ponto durante qualquer intervalo de

tempo; a Eq. 2.37 mostra a Equação 2.36 convertida de tensão para força, simplesmente dividindo pela área de seção da haste. Ambas as equações demonstram, de modo singelo, que a onda de compressão e tração são positivas, nos termos numéricos, i.e., a integração dessa forma precisa garantir que o fator externo ao integrando, força ou tensão, sejam constantes para toda a haste, sabidamente inaplicável tanto para o SPT quanto para o DPL.

$$E_h = E_{potencial} (50\%) + E_{cinética} (50\%) = \frac{ac}{E} \int_{t_1}^{t_2} \sigma^2 dt \quad (2.36)$$

Dividindo a tensão pela área tem-se a Eq. 2.37:

$$E_h = \frac{c}{Ea} \int_{t_1}^{t_2} F^2 dt \quad (2.37)$$

Desse modo pode-se reescrever a Equação 2.36 como a Eq. 2.38:

$$E_h = E_{potencial} (50\%) + E_{cinética} (50\%) = \frac{c}{Ea} \int_{t_1}^{t_2} F^2 dt \quad (2.38)$$

onde:

E_h = energia nas hastes; a = área da seção da haste; c = velocidade de compressão nas hastes; E = módulo de Young da haste; σ = tensão normal nas hastes; F = força normal nas hastes; e t = tempo a partir do impacto do martelo.

2.6.3 MECANISMO DE PROPAGAÇÃO DE UMA ONDA LONGITUDINAL DE COMPRESSÃO EM HASTES SPT

Schmertmann e Palacios (1979) foram os primeiros a apresentar de modo racional o processo de tráfego das tensões: propagação, absorção e reflexão de uma onda longitudinal de compressão em hastes do SPT. Schmertmann e Palacios (1979) instalaram duas células de carga, uma próxima à cabeça de bater e ponta próxima ao amostrador, conforme se vê na Fig. 2.13. Observa-se, na Figura 2.13, seis fases que conforme Schmertmann e Palacios (1979) ilustram o mecanismo de propagação de uma onda longitudinal de compressão em hastes de SPT. A seguir, a descrição sucinta desse mecanismo.

A Fig. 2.13 (a) mostra o martelo suspenso para uma altura h , em plena energia potencial, em uma configuração imediatamente antes da soltura do martelo; A Fig. 2.13 (b) apresenta o martelo em contato com a cabeça de bater e com parte da energia cinética já transferida à haste, com o pico da onda a ultrapassar a célula de carga do topo, mas ainda sem sensibilizar a célula de carga próxima ao amostrador, no tempo $0 < t < l/c$; A Fig. 2.13 (c) mostra que a frente de onda

sensibiliza toda a composição, inclusive o amostrador, no tempo $t=l/c$. A Fig. 2.13 (d) mostra, no tempo $l/c < t < 2l/c$, toda a composição sensibilizada com a onda de compressão com parte da energia consumida para o incremento de penetração ρ_1 , nessa fase a onda de tração sensibiliza a composição em direção ao topo com parte da energia refletida, absorvida pelo solo. A Figura 2.13 (e) mostra, no tempo $t=2l/c$ o segundo incremento da penetração do amostrador, ρ_2 . A Fig. 2.13 (f) no tempo $2l/c < t < 3l/c$ mostra que a onda refletida superpõe à onda de compressão e inicia novo ciclo que resultará em no incremento de penetração ρ_3 .

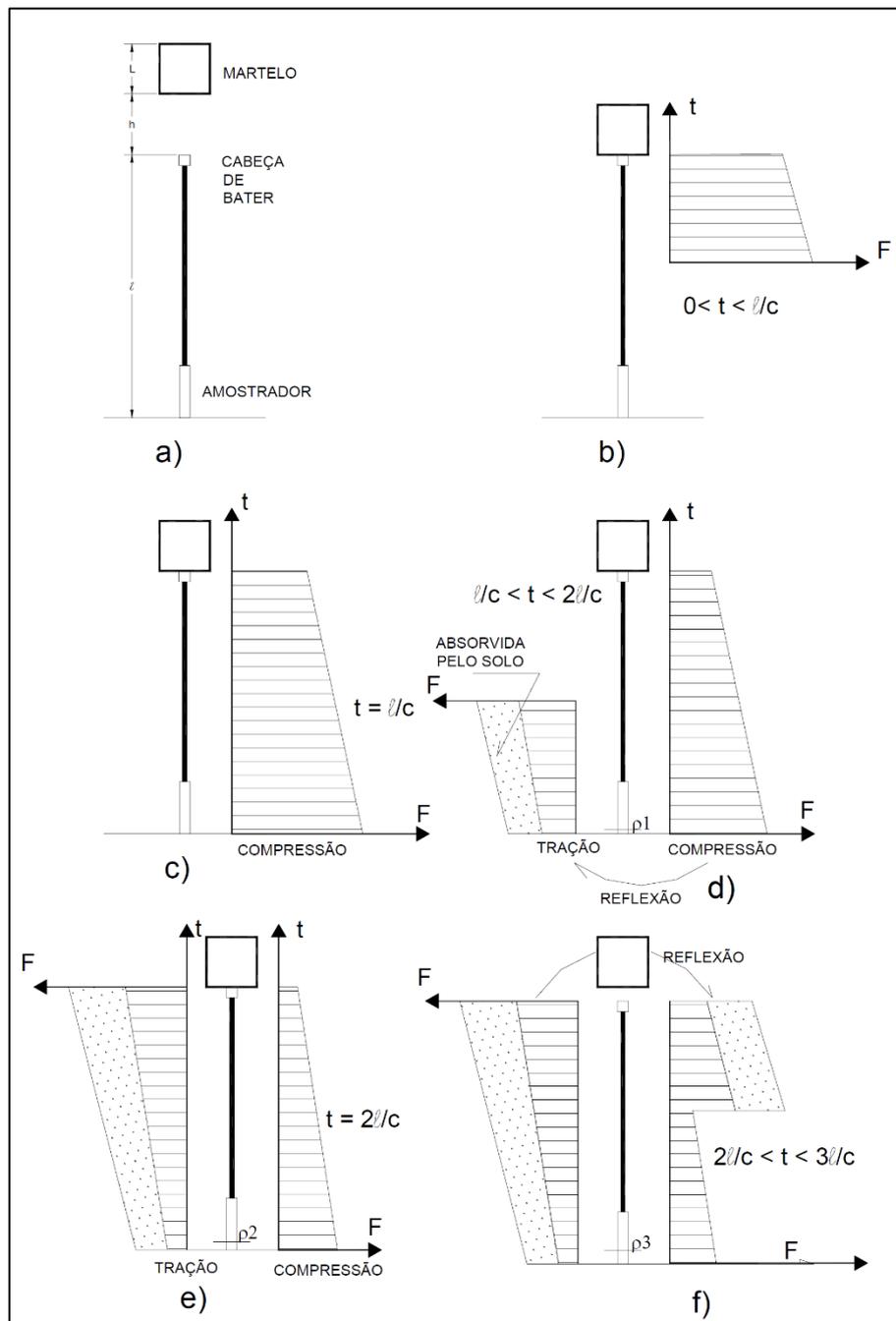


Figura 2.13 – Esquema do mecanismo de propagação e reflexão de onda na haste (adaptado de Schmertmann e Palacios, 1979)

Para Odebrecht (2003) 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. Nota-se que, Schmertmann e Palacios (1979) tratavam a possibilidade de penetração a partir do primeiro ciclo como uma possibilidade, uma vez, como já foi explanado, os autores consideravam negligenciáveis os efeitos dos ciclos subsequentes ao primeiro para a penetração do amostrador.

2.7 TRABALHOS BRASILEIROS SOBRE A EFICIÊNCIA E FORÇA DINÂMICA DO SPT

Esta seção aborda sobre os trabalhos de medida de energia para a determinação da eficiência de energia do SPT e força dinâmica extraída do trabalho exercido na penetração do amostrador. Notadamente dois trabalhos sobre medidas de energia com emprego de sensores de aceleração e de força são agora apresentados: as teses de doutorado de Cavalcante (2002) e de Odebrecht (2003).

2.7.1 O TRABALHO DE CAVALCANTE

Cavalcante (2002) propõe, em sua tese de doutorado, uma nova medida para eficiência da energia transmitida às hastes do SPT. Todos os dados de análise do autor decorreram de medidas de energia do SPT realizadas em dois espaços geográficos: as cidades do Rio de Janeiro e João Pessoa. Os valores de eficiência de energia transferida às hastes em função do comprimento da composição foram obtidos a partir de três campanhas de ensaios realizadas com cinco equipes de três empresas de sondagem nas duas cidades brasileiras referidas acima. Como reforça Lobo (2005), a pesquisa de Cavalcante (2002) utilizou equipamentos e equipes distintas, com procedimentos executivos característicos de duas cidades do Brasil (Rio de Janeiro e João Pessoa), em diferentes tipos de solos.

2.7.1.1 A INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DAS HASTES

O trabalho de Cavalcante (2002) constata que a profundidade de penetração das hastes do SPT não é significativa a variação de energia para o método EFV. Segundo Cavalcante (2002), observou-se em todas as sondagens uma tendência de crescimento dos valores das energias EF2 e E2F com o comprimento das hastes, até comprimentos da ordem de 12 metros. Os valores de EFV não são praticamente afetados pelo comprimento das hastes ou pela resistência do solo, para comprimentos da composição de até 14 metros. O valor médio da eficiência obtido a partir de EFV para comprimentos entre 2m e 14m e N entre 2 e 64 foi igual a 82,3%. A Fig. 2. 14 é

ilustrativa da conclusão de Cavalcante (2002), observa-se a tendência de crescimento dos valores das energias EF2 e E2F à medida que cresce o comprimento. Na faixa de 2,36m a 10,39m. Por outro lado, EFV é praticamente constante com a profundidade, com um valor médio igual a 89,9%, e um desvio padrão igual a 6,1%.

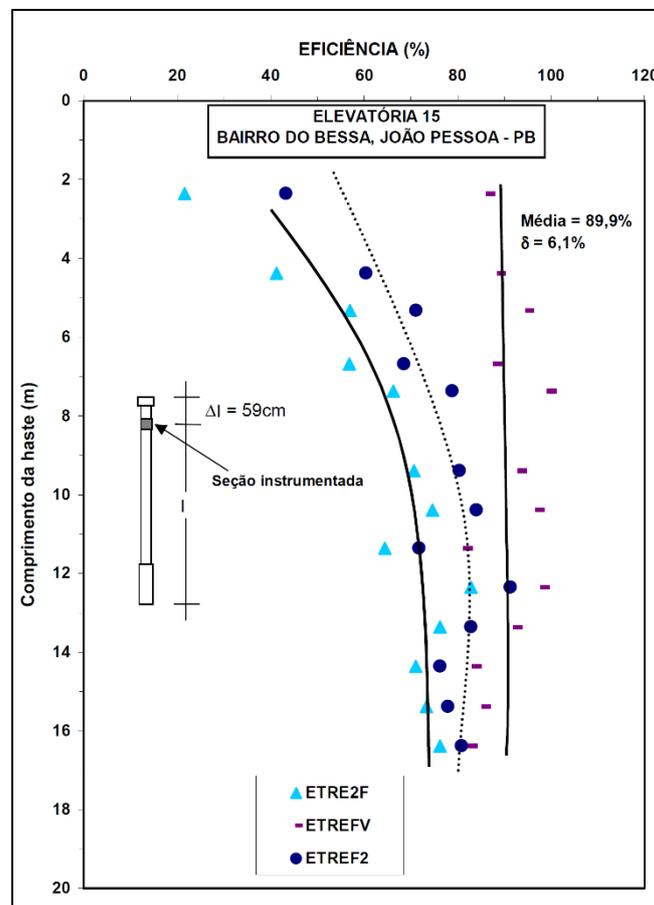


Figura 2.14 – Eficiência de energia transferida em função do comprimento da composição de hastes (Cavalcante, 2002)

2.7.1.2 PROPOSTA PARA A CORREÇÃO DE N INDEPENDENTE DO COMPRIMENTO DAS HASTES

Cavalcante (2002), após constatar que a energia transferida em função do comprimento da haste não é significativa (método EFV) sugeriu o fator 1,38 para multiplicar N_{SPT} do sistema brasileiro e obter N_{60} , no caso de hastes com comprimentos de até 14 metros.

Segundo Cavalcante (2002), Décourt (1989) propõe três fatores para correção da energia transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, de acordo com a configuração do sistema de SPT utilizado e com o comprimento das hastes:

- a) fator (e_1) refere-se ao sistema de levantamento e de soltura do martelo;

- b) fator (e_2) que é em função da massa da cabeça de bater; e
- c) fator (e_3) depende do comprimento das hastes.

Cavalcante (2002), após análises dos dados computados em ensaios de medida de energia constatou:

- i) que o fator e_1 , energia cinética, representa aproximadamente 74% da energia potencial padrão do SPT (478,24 Joules);
- ii) que e_1 passa a ser 0,81 quando são descartados os dados para os quais $E_{CIN} < EFV$ (Energia Cinética menor que Energia transferida às hastes obtida com registros de força e velocidade);
- iii) que este último valor para e_1 , corresponde ao limite inferior da faixa sugerida (0,8 a 0,9) por Décourt (1989) para o sistema de SPT utilizado (martelo manual).
- iv) que no tocante à energia transferida às hastes, para o sistema de SPT utilizado, praticamente não houve perda de energia no impacto, assim, e_2 seria igual a 1,0;
- v) que e_2 , pesquisa realizada por Cavalcante (2002), os dados mostraram que a maior perda de energia acontece durante a queda do martelo. Desprezando-se os valores para os quais se obteve maior valor de EFV do que energia cinética antes do impacto, tem-se o valor de $e_2 = 0,87$;
- vi) que e_2 tem o caráter apenas indicativo;
- vii) que reitera-se o valor de $e_3 = 1$;

Com base nos valores da energia transferida às hastes obtidos através do método EFV, a partir de 1130 golpes de SPT, em solos com N_{SPT} variando entre 2 e 65 e N' (resistência à penetração equivalente) entre 2 e 250, o autor apresenta a Fig. 2.15, na qual é relacionada a eficiência de energia transferida às hastes em relação à energia potencial padrão brasileira ($E^* = 478,24$ Joules) em função do comprimento total das hastes. O comportamento da eficiência mostrado na Figura 2.14 se compara ao obtido por Sy & Campanella (1991) e Sy & Campanella (1994), mostrado nas Fig. 2.15 e Fig.2.16 e reforça as discussões feitas por Aoki & Cintra (2000).

A Figura 2.15 resume a análise estatística, a partir de 896 registros do SPT e revela que a eficiência média se situa em torno de 82%, com desvio padrão igual a 5,6%, para comprimentos entre 2 m e 14 m. Este valor é maior que a eficiência ($\cong 72,6\%$) obtida nos dados do bairro da Lapa, no Rio de Janeiro. Porém, a média geral para a energia transferida (80,8%) contempla

todos os dados apresentados em Cavalcante (2002), inclusive com outras empresas de sondagens, onde a configuração do SPT deverá alterar os valores da eficiência do martelo e da perda de energia durante o impacto.

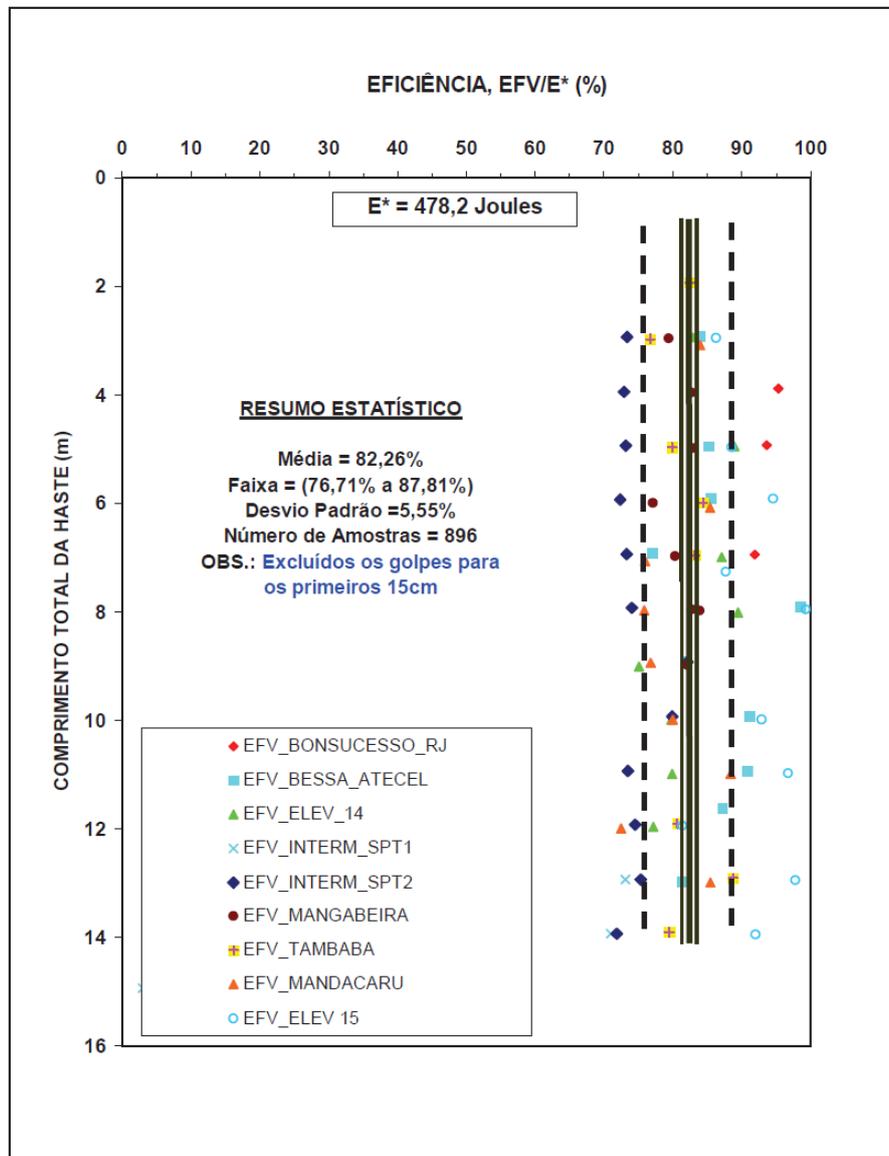


Figura 2.15 – Valores de eficiência de energia transferida às hastes em função do comprimento da composição (Cavalcante, 2002)

Os valores médios de eficiência obtidos para a primeira faixa de comprimento mostrada na Figura 2.15 superam os valores medidos por Belincanta (1998), a partir de martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, cabeça de bater de 0,036 kN e comprimento de haste igual a 14 m, em aproximadamente 12%. Quando considerada a haste de comprimento infinito, os valores coincidem.

Cavalcante (2002), informa que Belincanta (1998) mediu energia para comprimentos longos e apenas com célula elétrica de carga. Para comprimentos maiores há uma boa concordância entre os valores, o que é justificado na medida em que se percebe que para hastes longas há uma tendência dos valores de EF2 e de E2F convergirem para a energia máxima transferida às hastes.

Cavalcante (2002), a partir da constatação experimental apresentada na sua tese afirma que a eficiência de energia transferida às hastes independe do comprimento destas para comprimentos de até 14 metros. A partir de medições efetuadas em solos com ampla faixa de resistência e com empresas de sondagens diferentes, em diferentes localidades, propõe-se uma correção para o valor de N medido de forma que a resistência à penetração obtida na sondagem possa ser equiparada ao valor obtido sob uma eficiência adotada como padrão internacional de 60%, N_{60} . Segundo Cavalcante (2002), a eficiência de energia máxima encontrados por Sy e Campanella (1994) se comporta dentro de uma faixa com pequenas variações ao longo da profundidade como mostrado na Fig. 2.16.

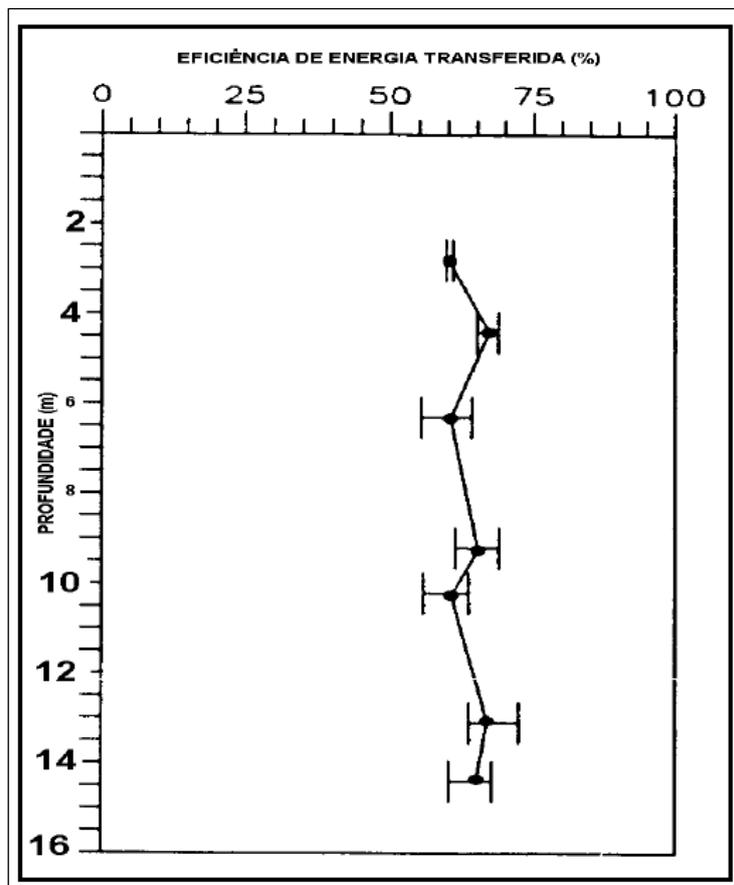


Figura 2.16 - Eficiência de energia transferida através da composição de hastes (ENTHRU/Ei) em função da profundidade (14 m) Sy e Campanella, 1991 em Cavalcante 2002)

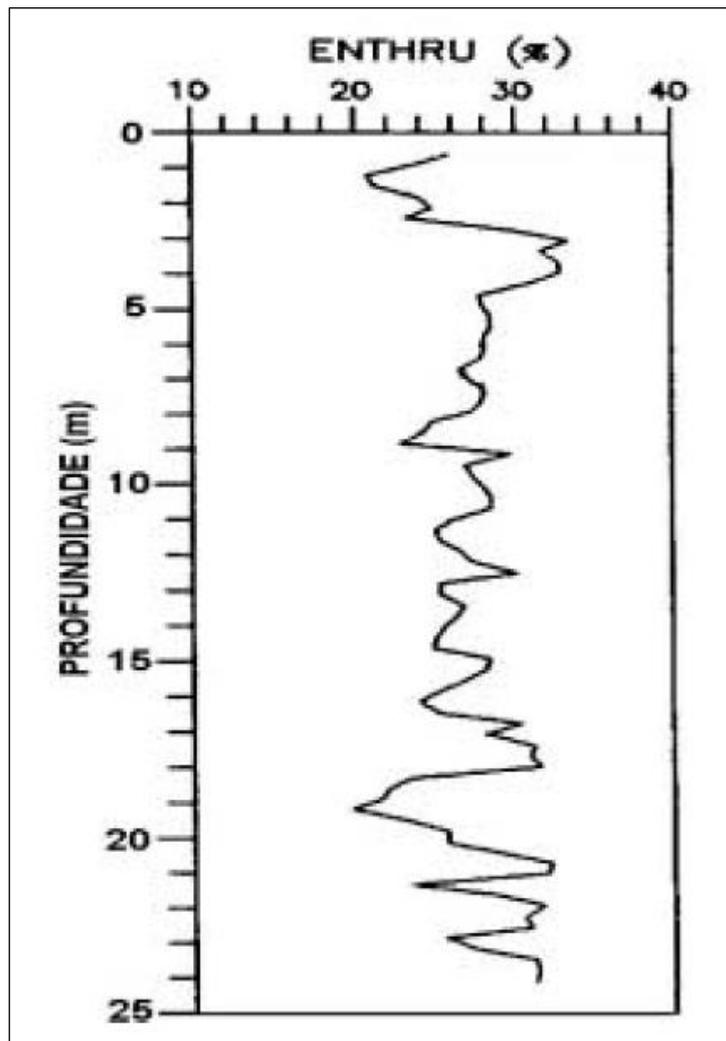


Figura 2.17 -Eficiência de energia transferida através da composição de hastes (ENTHRU/Ei), martelo automático de queda livre, em função da profundidade de Sy e Campanella, 1991 em Cavalcante, 2002

Do resumo estatístico mostrado no gráfico da Figura 2.15 o autor sugere que, para sondagens empregando martelo cilíndrico maciço com ou sem coxim de madeira, cabeça de bater pequena e hastes de comprimentos entre 2 m e 14 m, a resistência à penetração seja corrigida da seguinte forma:

$$N_{60}E_{60} = N_m E_m \quad (2.39)$$

Onde E_m e N_m são respectivamente, os valores medidos da energia e do número de golpes para 30cm finais de penetração. Admitindo-se que a energia medida corresponde a uma eficiência de energia transferida às hastes da ordem de 82%, tem-se a resistência à penetração corrigida para um nível de eficiência de 60%, como:

$$N_{60} = 1,38N_m \quad (2.40)$$

2.7.2 O TRABALHO DE ODEBRECHT

Odebrecht (2003), contribui, além de reiterar Cavalcante (2002) sobre a eficácia do método EFV, com adoção de três fatores: η_1 , η_2 e η_3 . Esses fatores correspondem: η_1 a eficiência do martelo; η_2 a eficiência da haste, igual a 1, e η_3 que considera a eficiência em relação ao comprimento das hastes.

Odebrecht (2003) apresentou um esquema em três estágios para demonstrar a variação da energia com o tempo desde a soltura do martelo até a penetração do amostrador, mostrada na Fig. 2.18 que conforme descreve Odebrecht (2003) 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 último, $t_3 = \infty$, 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.

Segundo Odebrecht (2003), 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 como:

$$EPG_m = M_M g h_m(t_1) \quad (2.41)$$

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.

Odebrecht (2003) depois de considerações sobre contribuição de cada fator apresenta uma formulação geral para a variação de energia no sistema do SPT, considerando o martelo e toda a composição desse equipamento:

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = \eta_3 [\eta_1 (0,75 + \Delta\rho) M_m g + \eta_2 M_h g \Delta\rho] \quad (2.42)$$

onde:

$$\eta_1 = 0,76$$

$$\eta_2 = 1,00$$

$$\eta_3 = 1 - 0,0042l \text{ (Dados de Odebrecht, 2003)}$$

$\eta_3=0,907-0,0066l$ (Dados de Cavalcante, 2002)

Segundo Odebrecht (2003), 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 ao encontro com a conclusão apresentada por Aoki e Cintra (2000).

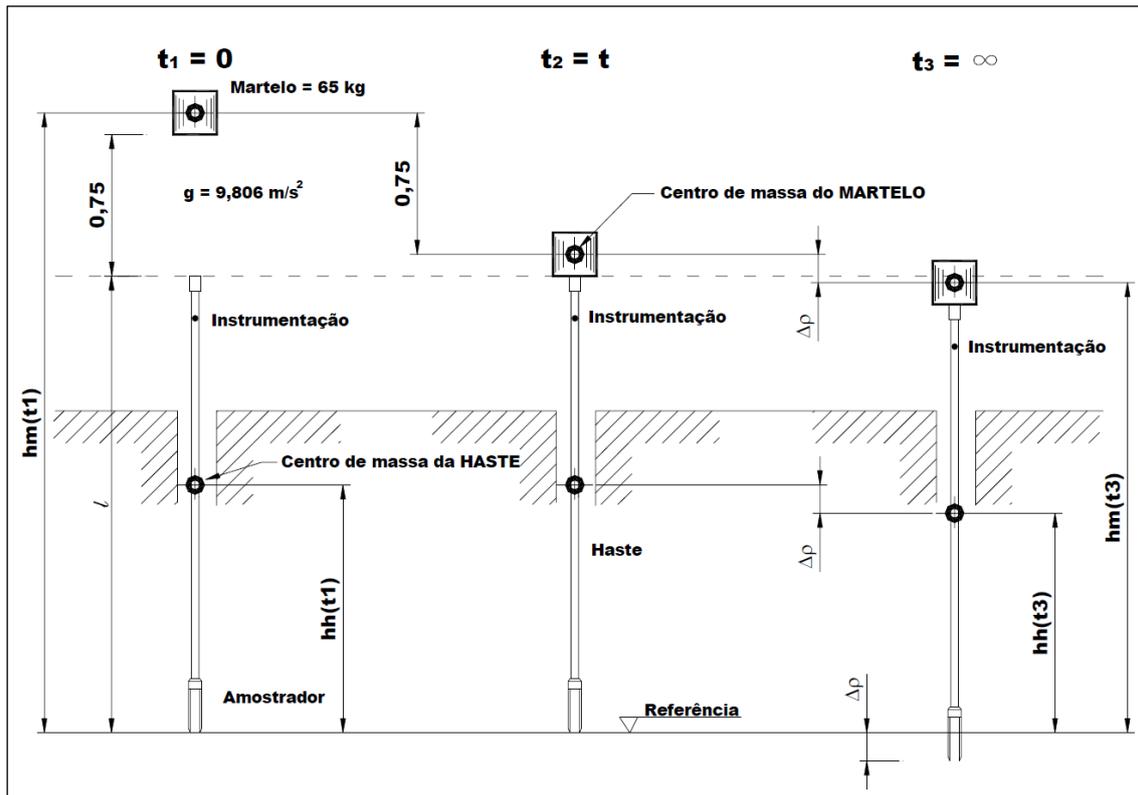


Figura 2.18 - Esquema das energias potenciais, gravitacional do martelo e da haste (Odebrecht, 2003)

2.7.2.1 PROPOSIÇÃO DE ODEBRECHT PARA A CORREÇÃO DA EFICIÊNCIA DO SPT

Odebrecht (2003) realizou vários ensaios de medida de energia do SPT utilizando quatro comprimentos de hastes distintos: 5,80 m, 11,80 m, 18,18 m e 35,80 m. Obteve o valor de $\eta_1=0,764$ com desvio padrão de 0,036. Apresentou para a eficiência do sistema, relativa a energia do martelo uma forma diferente de estabelecer o limite superior da integração da energia oriunda dos registros de força e velocidade em vez de estabelecer um limite de tempo definido, e.g., até que se zere a amplitude dos sinais, Odebrecht (2003) estabeleceu como limite o infinito, uma forma de expressar que a frente de onda de tensão percorre a haste infinitamente desde que haste tenha comprimento infinito. Inicialmente definiu a Eq. 2.43:

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = \eta_1(0,75 + \Delta\rho)M_m g + \Delta\rho M_h g \quad (2.43)$$

onde: η_1 eficiência referente à parcela do martelo = $\frac{\int_0^\infty F(t)V(t)dt}{(0,75+\Delta\rho)M_m g}$

Odebrecht (2003), concluiu que um fator de eficiência adicional deveria ser incorporado à Equação 2.43 a fim de possibilitar a determinação da energia junto ao amostrador. A dedução a seguir é apresentada para a parametrização da eficiência do SPT:

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = \xi(\eta_1 E_m) \quad (2.44)$$

onde: $E_m = (0,75 + \Delta\rho)M_m g$;

ξ = é um valor adimensional, função de $\Delta\rho$ e l que é igual a 1 mais o acréscimo devido à energia potencial da haste. Para haste de comprimento nulo este fator pode ser:

$$\xi = 1 + \frac{E_h}{\eta_1 E_m} \quad (2.45)$$

Para comprimentos de hastes não nulos a seguinte hipótese pode ser adotada tentativamente:

$$\xi = \left(1 + \frac{\eta_2 E_h}{\eta_1 E_m}\right) \eta_3 \quad (2.46)$$

E considerando $E_h = M_h \Delta\rho g$ tem-se:

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = \eta_3 \left(1 + \frac{\eta_2 E_h}{\eta_1 E_m}\right) (\eta_1 E_m) = \eta_3 (\eta_1 E_m + \eta_2 E_h) \quad (2.47)$$

Ou seja:

$$\Delta EPG_{m+h}^{sistema} = \eta_3 [\eta_1(0,75 + \Delta\rho)]M_m g + \eta_2 \Delta\rho M_h g \quad (2.48)$$

Observa-se, como comentado, que Odebrecht (2003) considerou o limite último da integração dos sinais do acelerômetro e das células de carga como infinito (∞), como se depreende da Eq. 2.49:

$$E = \int_{t_1=0}^{t_2=\infty} Fv dt \quad (2.49)$$

Odebrecht (2003), determinou, como já comentado, o valor de η_1 para 0,764. E os valores de η_2 e η_3 foram determinados de modo a verificar se os mesmos são influenciados pelo comprimento das hastes, portanto escreveu η_2 e η_3 , como se segue:

$$\eta_2 = \beta_2 + \alpha_2 l \text{ (eficiência da haste)}$$

$$\eta_3 = \beta_3 + \alpha_3 l \text{ (eficiência do sistema)}$$

Segundo Odebrecht (2003), para cada ensaio “i” realizado com a instrumentação posicionada junto ao amostrador, com um comprimento de haste “l” determina-se os valores de η_2 e η_3 de tal modo que minimize o erro “ ε ” constituído pela diferença entre a energia entregue ao solo, Equação 2.48 e a energia obtida pela equação medida com a instrumentação posicionada junto ao amostrador, Equação 2.49. A somatória dos quadrados dessa diferença é dada por:

$$\varepsilon^2 = \sum \left\{ \int_0^{\infty} F(t) \cdot V(t) \cdot dt_{\text{junto ao amostrador}} - \eta_3 [\eta_1 (0,75 + \Delta\rho) M_m g + \eta_2 (M_m \Delta\rho g)] \right\}^2 \quad (2.50)$$

Deduzindo o erro, conforme a Equação 2.50, Odebrecht (2003) estabeleceu quatro opções para os valores de η_2 e η_3 :

Opção 1: $\eta_2 = \beta_2 + \alpha_2 l = 1 + 0 \times l = 1$
 $\eta_3 = \beta_3 + \alpha_3 l = \beta_3 + 0 = \beta_3$

Opção 2: $\eta_2 = \beta_2 + \alpha_2 l = 1 + 0 \times l = 1$
 $\eta_3 = \beta_3 + \alpha_3 l = 1 + \alpha_3 l$

Opção 3: $\eta_2 = \beta_2 + \alpha_2 l = \beta_2 + 0 \times l = \beta_2$
 $\eta_3 = \beta_3 + \alpha_3 l = 1 = 0,0042l$

Opção 4: $\eta_2 = \beta_2 + \alpha_2 l = 1 + \alpha_2 l$
 $\eta_3 = \beta_3 + \alpha_3 l = 1 = 0,0042l$

Segundo Odebrecht (2003) a melhor opção é a 2, onde o valor de α_3 é igual 0,00442. Desse modo tem-se:

$$\eta_3 = 1 - 0,0042l \quad (2.51)$$

onde l representa o comprimento da haste.

2.8 PROPOSIÇÃO DE EFICIÊNCIA PARA O DPL

Ibañez *et al.* (2012) apresentam uma proposição com base nos estudos de medida de eficiência para SPT de Odebrecht para o DPL. Os autores argumentam que a penetração permanente depende da energia, não a nominal, mas a da porção que efetivamente é transferida para as hastes do DPL e que alcança o cone a que denominaram de ENTHRU_{cone}. É necessária uma explicação sobre a ENTHRU: segundo Cavalcante (2002) Schmertmann & Palacios (1979) sugerem inicialmente que a ENTHRU no SPT representa a parcela da energia potencial (474 Joules)

que alcança o amostrador na forma da primeira onda de compressão. Evidentemente que os autores tratam a ENTHRU de toda a variação da energia potencial no sistema do DPL que é igual à variação do trabalho efetuado por forças não conservativas: as não conservativas transformadas em trabalho exercido no solo e as não conservativas por perda diversas.

Ibañez *et al.* (2012) explanam que é necessário corrigir para o cálculo da eficiência no DPL o atrito lateral, através da medida do torque. Não é explicada pelos autores como se realiza o procedimento de medida, a saber que a medida sugerida é da rotação de uma vez e meia das hastes com um torquímetro. Com a medida de atrito lateral da haste e cone, Ibañez *et al.* (2012) propõem uma nova medida para $ENTHRU_{cone}$ através da formulação da Eq. 2.52, a partir da formulação de Odebrecht para a energia que alcança o amostrador do SPT, discutida em seção anterior nesta tese, a Equação 2.48:

$$ENTHRU_{CONE} = E_{sampler} - E_f \quad (2.52)$$

onde:

$E_{sampler}$ = energia que alcança o amostrador (igual a Equação 2.48);

E_f = energia oriunda do atrito no amostrador.

Depois de várias deduções nas quais correlacionam a ENTHRU do SPT com a $ENTHRU_{cone}$ os autores apresentam duas formulações para a medida da ENTHRU do DPL: a primeira considera um fator de η_4 em substituição ao fator η_1 para medida no topo, mostrada na Eq. 2.53, e a segunda para a medida no cone com a associação à formulação de Odebrecht (2002), mostrada na Eq. 2.54. Ressalta-se que Ibañez *et al.* (2012) não instalaram sensores no cone, de modo que essa medida deve ser correlacionada com a correção feita para a haste do DPL apresentada na Eq. 2.55. Assim tem-se:

$$ENTHRU = \eta_4 m_h + (h + p) + m_a g p \quad (2.53)$$

onde:

η_4 = fator de eficiência para o DPL, medida no topo;

m_h = massa do martelo;

h = altura de queda do martelo;

p = penetração do cone;

m_a =massa da cabeça de bater;

g = gravidade (m/s^2);

$$ENTHRU_{cone} = \eta_3 [ENTHRU + m_r gp] \left[1 - \frac{Tp_{3,4}}{rm_r h} \right] \quad (2.54)$$

onde:

m_r = massa da haste;

T= torque medido;

r= raio da haste; e

p= penetração para um golpe.

Para o ajuste de η_3 Ibañez *et al.* (2012) apresentaram uma relação para o diâmetro de 2,28 cm que atribuem ao diâmetro das hastes utilizadas por Odebrecht (2003) e, assim, definiram esse fator para o mostrado na Eq. 2.55:

$$\eta_3 = 1 - 4,8 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{l}{r} \quad (2.55)$$

onde:

l= comprimento da haste; e

Ibañez *et al.* (2012) realizaram ensaios de campo para estimar o fator η_4 em substituição ao fator η_1 empregado para a medida de eficiência do topo do SPT. O solo descrito pelos autores é constituído de uma camada fina arenosa cuja superfície de terreno apresenta horizontalidade e fácil acesso para a campanha. Os resultados resumidos são apresentados na Tab. 2.5.

Tabela 2.5 – Valores do fator de eficiência de energia obtida em ensaios de campo

Séries	Golpes	Fator de eficiência de energia (η_4) (média dos valores)
1	44	0,681
2	39	0,688
3	27	0,718
4	17	0,739
5	37	0,774
6	38	0,770

Os autores concluem que é necessário utilizar a $ENTHRU_{cone}$ em vez da $ENTHRU$. As razões são, obviamente, já mostradas nesta tese, de que a energia que alcança a extremidade de um penetrômetro e que produz a sua penetração é parte da energia total no sistema. Entretanto, discutem que é necessária a medida da eficiência com a Equação 2.54 porque a $ENTHRU$ não é suficientemente precisa dada à grande variabilidade dos dados.

2.9 SIMPLIFICAÇÃO DE CÁLCULO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA DE UM GOLPE PARA UMA HASTE

Morgano e Liang (1992), explicam que a transmissão de energia para uma haste a partir de um golpe no seu topo pode ser calculada pelos teoremas de trabalho-energia. Assume-se que a haste se constitui de material elástico cuja seção transversal seja uniforme e submetida a uma propagação de onda unidimensional. Por definição, um incremento de trabalho ΔW é realizado quando em um tempo t e uma força variável no tempo $F(t)$ atuam para um deslocamento $\Delta\delta$, como se verifica na Fig. 2.19.

Da Figura 2.19, pode-se arguir o que se segue, Eq. 2.56, Eq. 2.57 e Eq. 2.18:

$$\Delta W = F(t)\Delta\delta \quad (2.56)$$

$$v(t) = \frac{\Delta\delta}{\Delta t} \quad (2.57)$$

$$\Delta\delta = v(t)\Delta t \quad (2.58)$$

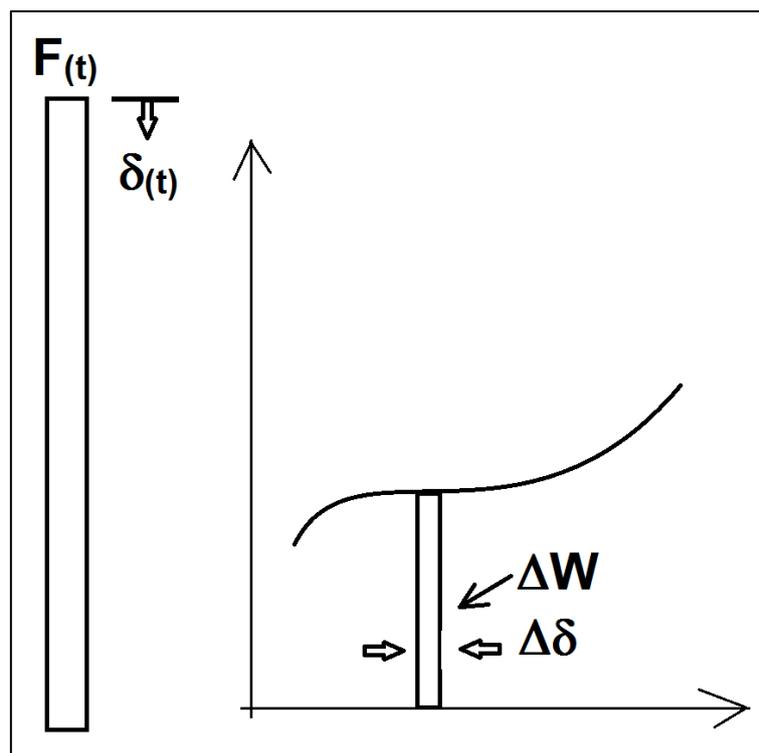


Figura 2.19 – Transmissão de energia numa haste uniforme (adaptado de Morgano e Liang, 1992)

Substituindo a Equação 2.58 na Equação 2.56, tem-se a Eq. 2.59

$$\Delta W = F(t)v(t)\Delta t \quad (2.59)$$

onde $v(t)$ é a velocidade da partícula.

A energia transferida do início ($t_1=0$) até a qualquer tempo t_2 pode ser calculada como Eq. 2.60:

$$W = \int_{t_1=0}^{t_2} F_{(t)} v_{(t)} dt \quad (2.60)$$

Como se depreende da Equação 2.60, obtida a força e velocidade no topo de uma haste, a energia transferida do martelo que impacta a haste pode ser calculada pela integral do produto da força e velocidade em relação ao tempo.

2.9.1 O CÁLCULO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA DE UM GOLPE PARA UMA HASTE A PARTIR DE MEDIDAS DOS SENSORES DE CARGA E ACELERAÇÃO

Conforme Cavalcante (2002), há dois métodos utilizados para determinação da energia transferida às hastes do SPT: o método F_2 ou EF2 e o método Fv ou EFV. Analogamente ao método EF2, Figueiredo *et al.* (2013) utilizaram o método Ev ou EV2 que consiste na troca da variável da força pela da velocidade. O método EV2 é limitado pela própria compreensão da energia contida numa onda de tensão que se compõe de duas partes, como visto no capítulo anterior: a deformação elástica armazenada pela compressão das partículas e a cinética que oriunda da velocidade das partículas animadas no intervalo de tempo do fenômeno dinâmico.

O método EFV resume que a energia transmitida por golpe de martelo para uma haste ou composição de hastes pode ser determinada pela expressão da Eq. 2.61:

$$EFV = \int_0^{t_{max}} Fv dt \quad (2.61)$$

onde:

EFV= energia máxima transferida às hastes;

F = força incidente na seção da haste;

v = velocidade da partícula; e

t_{max} = tempo para que toda a energia seja transferida às hastes.

Alternativamente, Schmertmann e Palacios (1979), utilizaram para o cálculo da energia transmitida às hastes do SPT, o método EF2 conforme a expressão da Eq. 2.62:

$$EF2 = \frac{c}{EA} \int_0^t F^2 dt \quad (2.62)$$

onde:

EF2= energia transferida às hastes até $F=0$;

c = velocidade de propagação da onda de tensão;

E= módulo de elasticidade da haste;

A_H = área de seção transversal da haste; e

F = força incidente capturada dos sinais da célula de força.

O método EF2 apresenta a limitação do cálculo indireto da velocidade que, neste caso, é multiplicada pela força ao quadrado integrada no domínio de tempo correspondente a $2l/c$. A energia computada, desse modo só é real se não houver reflexões da velocidade, ou seja, a velocidade tem que estar inteiramente na amplitude positiva. Esta é a razão para que o domínio para o cálculo da integral de F^2 seja $2l/c$.

O cálculo pelo método EV2 é feito com o produto da integração da velocidade, integrada no domínio do sinal da aceleração, pela impedância da haste, como mostrado na Eq. 2.63:

$$EV2 = \frac{EA}{c} \int_0^t v^2 dt \quad (2.63)$$

onde:

EV2 = energia transferida às hastes até $v=0$;

E = módulo de elasticidade da haste do DPL;

A_H = seção transversal da haste do DPL;

c = velocidade de propagação da onda de tensão; e

v = velocidade da partícula calculada a partir dos sinais do acelerômetro.

Observa-se que no caso método EF2 para a obtenção da força o cálculo é direto, bastando a multiplicação do valor do sinal em Volts por uma constante calculada quando da calibração da célula de carga. O método EV2, contudo, por se tratar de cálculo oriundo do acelerômetro é necessário além da correlação da tensão definida pelo fabricante para a aceleração é, também, necessária a integração da aceleração para a determinação da velocidade. Em ambos os métodos, após a integração do quadrado dos sinais, estes são multiplicados pela impedância, no caso de EV2 e pelo inverso da impedância no caso de EF2.

Para Cavalcante (2002), Odebrecht (2003), Belincanta & Ferraz (2000) o método que é capaz de determinar a energia de modo correto é o EFV, expresso, de modo geral pela Equação 2.56. A instrumentação necessária, minimamente, é a instalação de sensores de força, células de carga, e de velocidade, através de acelerômetros. Os registros de força e velocidade de partícula em função do tempo, oportunizam o cálculo da energia descontada da energia contida nas reflexões. Dessa maneira, as reflexões incidentes são anuladas no domínio do tempo até que os sensores entrem em repouso.

2.10 IMPEDÂNCIA NAS HASTES

Os estudos dos choques entre barras desde Love (1906), Timoshenko e Goodier (1951), Fairhurst (1961) são apresentados com detalhes no Apêndice C, desta tese. Aqui é apresentado um resumo teórico que servirá de suporte aos resultados apresentados no Capítulo 4. A impedância do meio elástico sólido é decisiva no tocante à transmissão e reflexão da velocidade partícula e da força, promovida por um choque em uma composição de hastes. Ressalta-se que a impedância é diretamente obtida do módulo de elasticidade e da área de seção transversal ao tráfego de onda incidente e inversamente proporcional à velocidade de propagação da onda no meio elástico sólido. Desse modo, a geometria das barras é decisiva para a determinação da transmissão da velocidade e força incidentes no cone do DPL.

Os estudos que tratam da transferência de energia em meio sólido elástico feitos por Palacios (1979), Schmertmann e Palacios (1977), Abou-matar e Goble (1997), Nakao (1981), Danziger (1991), Belincanta (1998), Cavalcante (2002) e Odebrecht (2003), reforçam o fato de que a impedância é constante para uma mesma seção e que a mudança de impedância pode ser deduzida como o que foi feito por Gonçalves *et al.* (1996), ilustrado pela Fig. 2.20

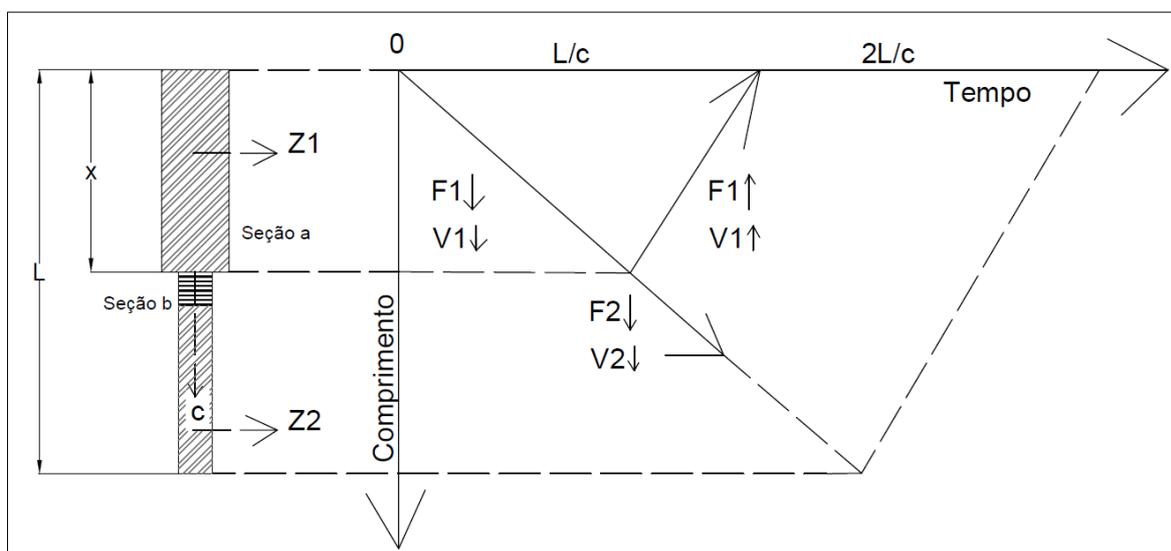


Figura 2.20 – Propagação da força e velocidade em barras de diferentes impedâncias (Adaptado de Gonçalves *et al.* 1996)

Observa-se na Figura 2.20 que a velocidade e força incidentes ($F1$ e $V1$) que trafegam pela haste de impedância $Z1$ e seção “a” são refletidas na junção das seções “a” e “b” e resultam em novo par de força e velocidade ($F2$ e $V2$) que passam a trafegar pela haste de impedância $Z2$ e seção “b”. Desse modo pode-se construir as formulações que se seguem, a considerar que a

força e velocidade são constituídas pelas forças e velocidades, incidentes e refletidas, respectivamente:

$$F = F1 \downarrow + F1 \uparrow = F2 \downarrow \quad (2.64)$$

$$V = V1 \downarrow + V1 \uparrow = V2 \downarrow \quad (2.65)$$

Resolvendo simultaneamente as equações 2.64 e 2.65, a força e a velocidade transmitidas são dadas pelas equações:

$$F2 \downarrow = \frac{2Z2}{Z1 + Z2} \times F1 \downarrow \quad (2.66)$$

$$V2 \downarrow = \frac{2Z1}{Z1 + Z2} \times V1 \downarrow \quad (2.67)$$

Substituindo-se $F2 \downarrow$ na equação 2.64 e $V2 \downarrow$ na equação 2.65, a força e a velocidade refletidas são, respectivamente:

$$F1 \uparrow = \frac{Z2 - Z1}{Z1 + Z2} \times F1 \downarrow \quad (2.68)$$

$$V1 \uparrow = \frac{Z1 - Z2}{Z1 + Z2} \times V1 \downarrow \quad (2.69)$$

Abou-matar e Goble (1977) definiram para a determinação da força e velocidade incidentes, transmitidas e refletidas com as formulações que se seguem:

$$F_t = \frac{2\alpha}{1 + \alpha} \times F_i \quad (2.70)$$

$$F_r = \frac{\alpha - 1}{1 + \alpha} \times F_i \quad (2.71)$$

$$V_t = \frac{2}{1 + \alpha} \times v_i \quad (2.72)$$

$$V_r = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \times v_i \quad (2.73)$$

Onde:

F_t = Força transmitida;

F_r = Força refletida;

F_i = Força incidente; e

α = Razão de impedância entre Z_2/Z_1 , (Z_1 , seção de entrada e Z_2 , seção que recebe a onda).

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será explanada toda a logística da pesquisa que inclui a construção de células de carga, sensores de aceleração, descrição do local do ensaio realizado em um tambor de areia, captura dos sinais com osciloscópio e o detalhamento dos métodos de medida de energia por acelerômetros e por células de carga. São mostrados em detalhes todas as peças que constituem a composição do penetrômetro.

3.1. ADAPTAÇÕES NO DPL

A construção de células de carga exigiu que se fizessem algumas adaptações de geometria no DPL, que serão mostradas nesta seção. Para que fosse possível a instrumentação do DPL, utilizado na pesquisa, foi necessária a colocação de luvas alongadas, de modo que os nípeis pudessem alojar os extensômetros elétricos ou *strain gauges*. A Fig. 3.1(a), mostra o aspecto geral dessas adaptações, onde se pode observar o alongamento do DPL adaptado para instrumentação, em função das peças que foram acrescentadas ao desenho original (três nípeis e duas luvas alongadas) em 241mm; a Fig. 3.1 (b), mostra o DPL sem adaptações. Todo o DPL é vazado, incluindo as conexões, exceto a cabeça de bater, de modo a permitir a passagem da fiação elétrica.

A ponta do DPL foi adaptada: originalmente essa peça é dotada de uma rosca externa que se conecta diretamente à haste que tem rosca interna; a necessidade de se colocar uma célula de carga próxima à ponta ou cone do DPL, impôs a usinagem de uma rosca interna que conectasse o nípel onde se assentou a célula de carga da ponta.

A Tab. 3.1 apresenta dados geométricos e de massa do DPL levando em consideração as adaptações feitas para os ensaios. Os dados geométricos são referenciados ao comprimento do DPL, quando este está em composição acoplada. O objetivo das medidas lineares é referenciar o deslocamento realizado pelo DPL a cada golpe. São apresentadas na tabela as massas dos componentes do DPL cujo objeto é, medir a massa que altera o somatório de força dinâmica quando da aplicação de um golpe. A diferença de massas entre os DPL e DPL adaptado é de 0,73 kg que representa 4,65% de acréscimo de massa. A influência da massa na medida de energia será mostrada em seção adiante. Para que se pudesse adaptar as células de carga, os nípeis, onde foram instalados os sensores de força, tiveram que ser usinados. Originalmente o diâmetro externo do nípel é 26,8 mm, que foi reduzido para 24,8 mm para o nípel 1 e 24 mm

para o nível 3. Isso fez com que a área de seção transversal fosse diminuída de 4,94 cm² para 4,13 cm² para o nível 1 e 3,82 cm² para o nível 3.

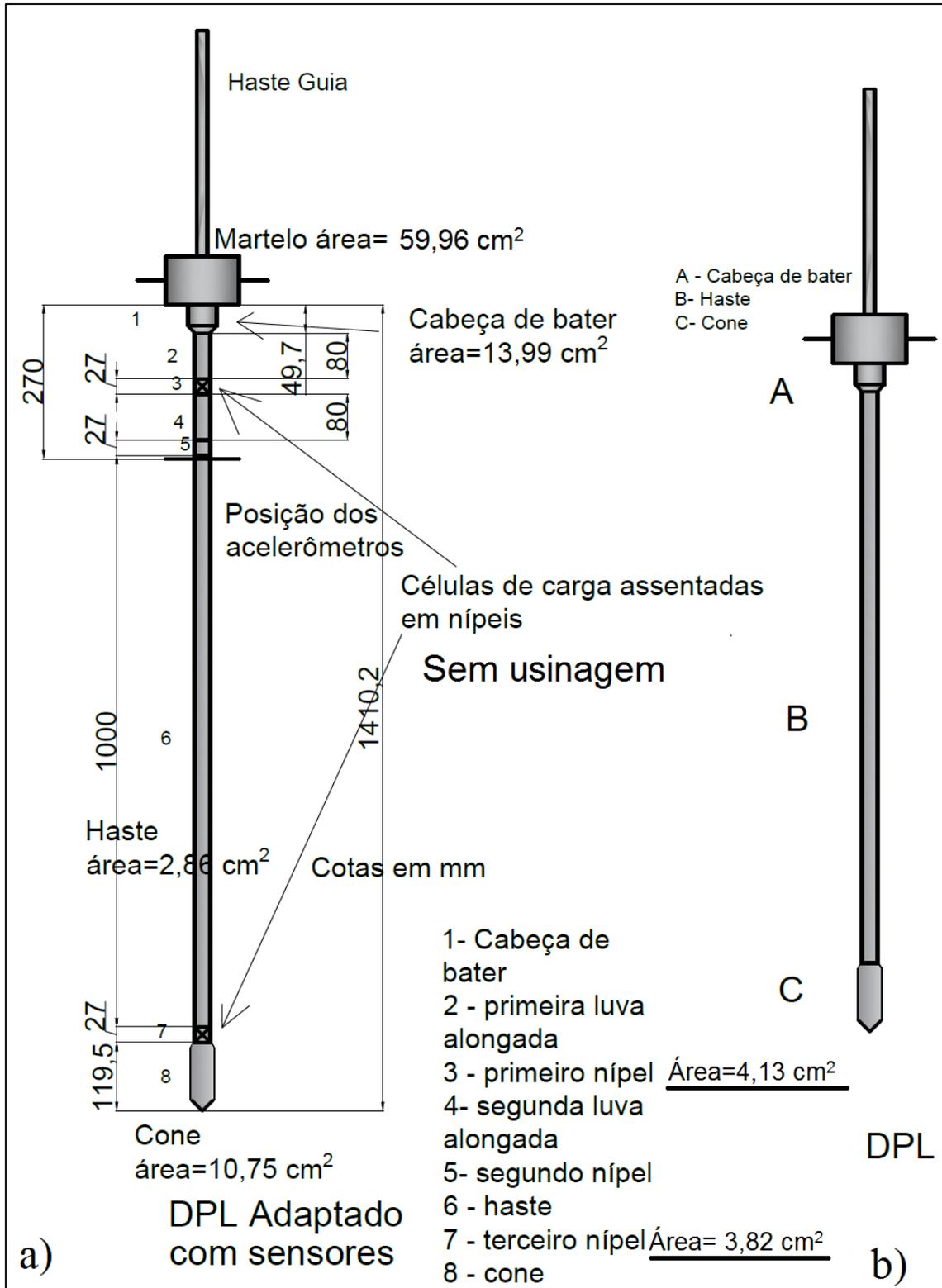


Figura 3.1 – Detalhes do DPL e DPL adaptado

Tabela 3.1 - Dados geométricos e de massa do DPL e DPL adaptado

Partes	DPL		DPLAdaptado	
	Linear (m)	Massa (kg)	Linear (m)	Massa (kg)
Haste guia (φ 26,8 mm)	0,85	1,90	0,85	1,90
Haste (φ 26,8 mm)	1,00	2,24	1,00	2,24
Martelo (L=81 mm)*	-	10,02	-	10,02
Cabeça de bater (φ 50 mm)	0,046	0,60	0,046	0,60
Nípel (φ 26,8 mm)	--	--	0,027	0,20
Nípel topo (célula de carga) (φ 26,8 mm)	--	--	0,027	0,16
Nípel ponta (célula de carga) (φ 26,8 mm)	--	--	0,027	0,13
Cone (φ 37 mm)	0,119	0,92	0,119	0,80
Luva alongada (3) (φ 26,8 mm)	--	--	2x0,08=0,16	0,36
Totais	2,015	15,68	2,256	16,41

* O martelo tem uma geometria com base quadrada de lado igual a 81 mm

* O cone foi adaptado para acoplar a célula de carga próxima ao cone.

A seguir é apresentada uma sequência de esquemas com detalhe de cada parte do DPL. A Fig. 3.2, mostra o detalhe das pontas da haste guia e haste. A ponta da haste guia tem rosca externa, enquanto que a haste tem rosca interna, desse modo o cone foi usinado para receber uma rosca interna e conectar o último nípel onde foi instalado a célula de carga do topo.

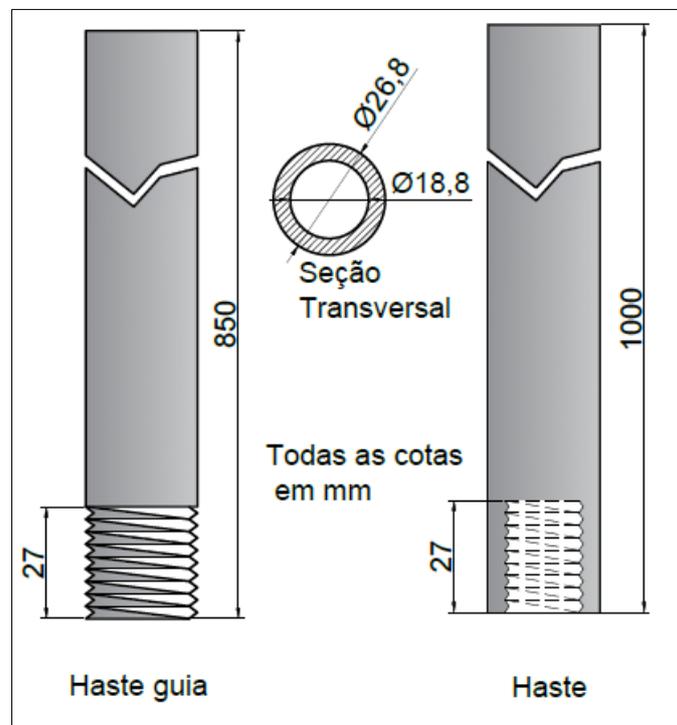


Figura 3.2 – Detalhe das extremidades da haste e haste guia

A cabeça de bater é mostrada na Fig. 3.3. A rosca interna tem diâmetro maior que a rosca externa. A rosca interna recebe a haste guia e a rosca externa recepçiona a haste. Essa peça não é vazada e recebe impacto direto do martelo.

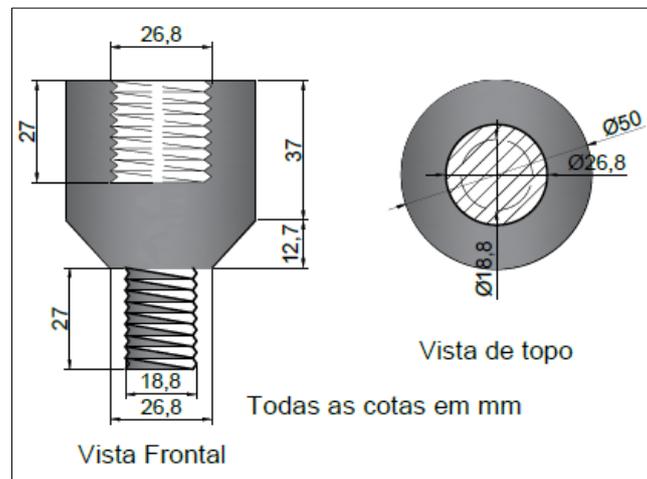


Figura 3.3- Detalhe da cabeça de bater

O detalhe do níquel é mostrado na Fig. 3.4. Essa peça serve para conectar as hastes e, no caso desta tese, foi utilizada para instalar os extensômetros elétricos. Na mesma figura é mostrada a luva alongada para adaptação dos sensores. Essa conexão não faz parte da composição original do DPL, e foi colocada na composição para facilitar a instalação das células, passagem da fiação e distanciar a célula de topo da cabeça de bater.

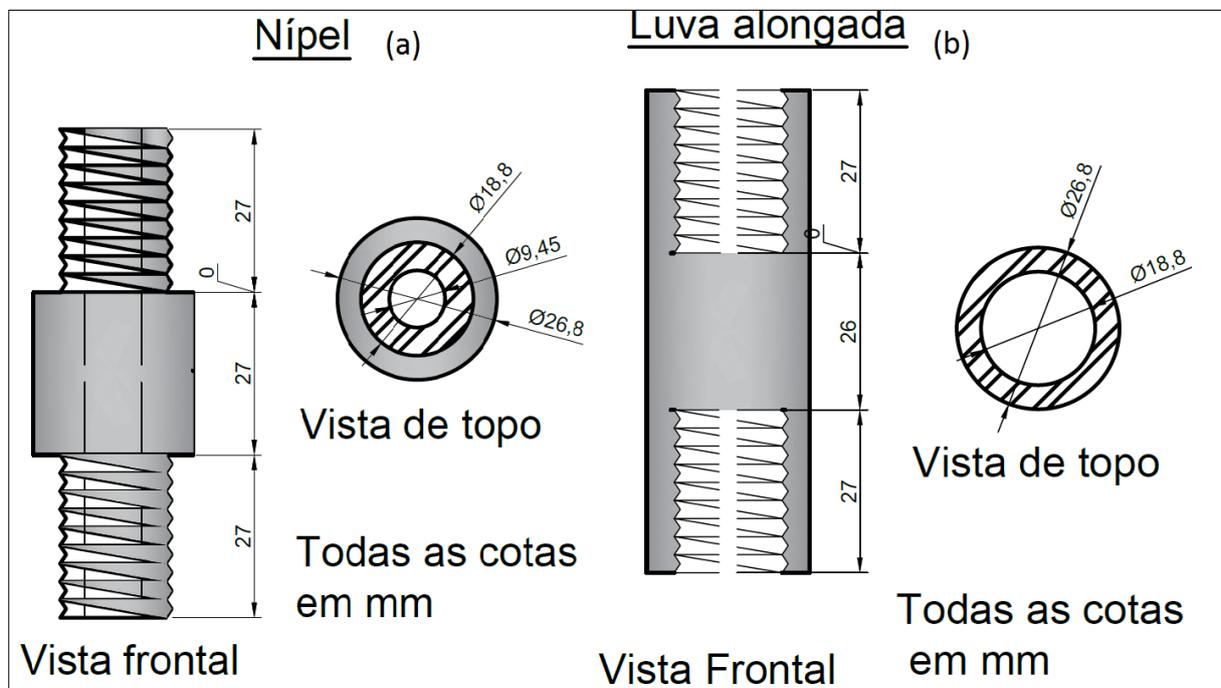


Figura 3.4 – Detalhes do níquel e Luva alongada

A ponta cônica do DPL é mostrada na Fig. 3.5

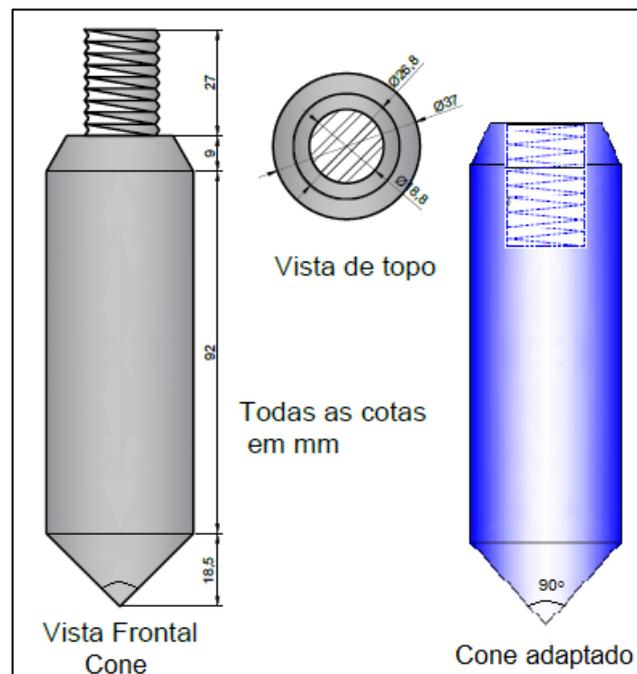


Figura 3.5 – Cones do DPL e DPL adaptado

3.2 CONSTRUÇÃO DAS CÉLULAS DE CARGA E TESTES DE LINEARIDADE

Para este estudo foram escolhidos extensômetros fabricados pela Excel Sensores, modelo PA-06-250BA-120LEN, com autocompensação de temperatura e especificado para as deformações do aço. As dimensões da grelha do extensômetro são de 6,35 mm x 3,18 mm e sua dimensão total de 9,47 mm x 3,18 mm; a resistência elétrica do extensômetro é 120 ohms. A Fig. 3.6 detalha o posicionamento das grelhas no corpo do *niple* que serviu como base para a célula de carga. Nota-se a oposição ortogonal dois a dois dos extensômetros, de modo a diminuir o efeito de Poisson que ocorre quando uma peça é submetida a uma tensão axial.

A confecção da célula de carga foi feita de modo que a peça fosse usinada ao ponto de espelhar a superfície do aço e, em seguida, foi feita uma solda fria da grelha do extensômetro (em número de quatro por peça). Após a soldagem a peça foi levada a uma estufa, com temperatura de 115°C, para que o extensômetro ficasse solidamente ligado à superfície do aço. Após a cura, cada célula foi protegida com luvas de cobre para as células próximas ao cone e luvas de PVC, para as células próximas à cabeça de bater.

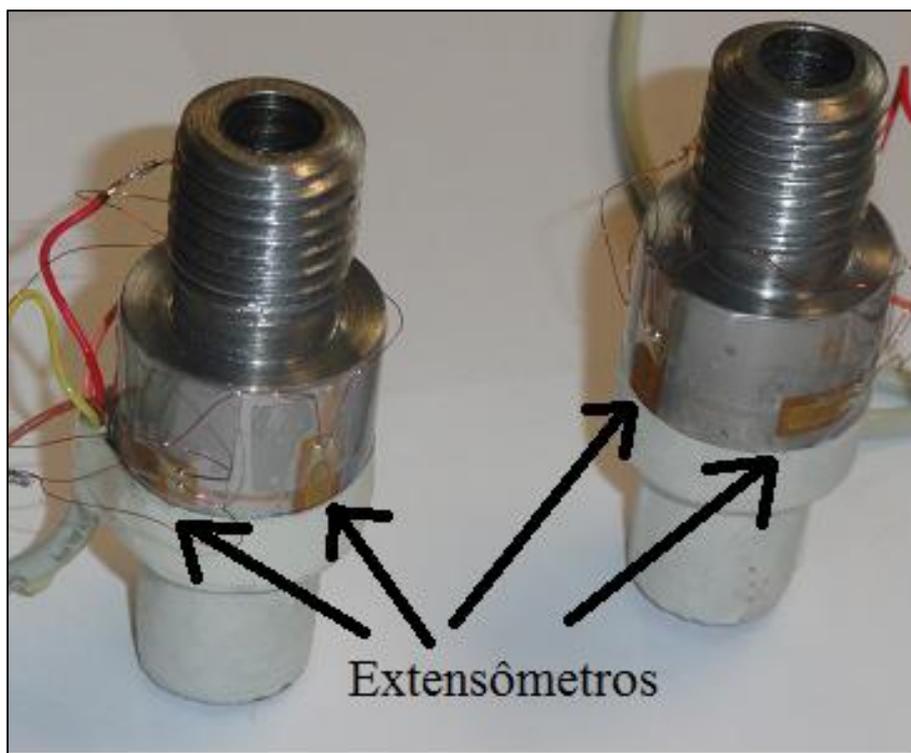


Figura 3.6 - Posicionamento dos extensômetros em oposição ortogonal

A Fig. 3.7 mostra as várias fases da confecção das células de carga, desde a usinagem até a proteção com luvas de PVC e cobre. As células com luvas de PVC foram utilizadas no topo e as de cobre próximo ao cone do DPL. Conseguiu-se com as de cobre ter um diâmetro da célula menor que o diâmetro do cone.



1 - Níquel usinado pronto para assentamento dos *strain gauges*.
 2 - Níquel com *strain gauges* e fiação elétrica.
 3 - Células de carga prontas para uso. As revestidas com cobre para instalação próxima ao cone do DPL. As revestidas com PVC para instalação próxima ao topo do DPL.

Figura 3.7 – Fases da confecção da célula de carga

3.2.1 PLACA DE AMPLIFICAÇÃO E FILTRO DE SINAIS ORIUNDO DA CÉLULA DE CARGA

O circuito eletrônico para amplificação do sinal do *strain gauge* foi elaborado e fabricado no decorrer desta pesquisa. Ele é composto por três estágios, sendo um pré-amplificador, um filtro “rejeita faixa”, e o amplificador final. O pré-amplificador eleva o sinal do *strain gauge* na faixa de poucos microVolts para um sinal de miliVolts, assim o filtro pode retirar os ruídos indesejáveis, e o amplificador final eleva o sinal para unidades de Volts. O filtro foi colocado entre os dois amplificadores para retirar os ruídos antes da amplificação final, e também porque o sinal está na casa de miliVolts, ou seja, os ruídos possuem pequena amplitude.

Os dois circuitos amplificadores são formados principalmente pelo INA 122, da Burr-Brown, atualmente pertencente à *Texas Instruments*. Conforme o *datasheet* do fabricante, o INA 122, 1977, é um circuito integrado – CI - cujo interior abriga uma configuração conhecida como amplificador de instrumentação, formada por três amplificadores operacionais, e o ganho é determinado por um resistor externo. A faixa de ganho é de 5 a 10.000 V/V. O CI INA 122 proporciona um baixo *off-set* (menor que 250 μV), um elevado ganho (até 10 mil V/V), baixo ruído diferencial no sinal a ser mensurado, baixa corrente no ponto de operação (menor que 60 μA).

O filtro “rejeita faixa” foi implementado para reduzir os ruídos que dificultam a leitura do sinal do *strain gauge*. Comumente, nos sistemas de aquisição de dados para *strain gauges* é utilizado um filtro passa baixa – PB -, com frequência de corte em 30 Hz, rejeitando os sinais de frequência maiores, principalmente o sinal da rede elétrica de 60 Hz. Este tipo de filtro PB, atende a maioria das aplicações com *strain gauges*, pois suas leituras são estáticas.

Porém, para o propósito desta tese, que se trata de medida em um sistema dinâmico, com frequência de operação em kHz, o filtro PB “mataria” o sinal de interesse. O filtro rejeita faixa foi implementado para que a faixa rejeitada fosse de 30 a 120 Hz, resultando em uma frequência central de 60 Hz. O *datasheet* TL081/082/084, 2004, da *Texas Instruments* informa que o TL081/02/084 tem um amplificador com entrada JFET resultando em uma grande impedância de entrada, ideal para este tipo de aplicação. O CI também possui baixo *off-set* (menor que 3 mV), baixa corrente no ponto de operação (menor que 2,8 mA). O filtro foi desenvolvido para ter ganho unitário. O circuito completo pode fornecer um ganho de até 10^8 , que é ajustado por meio de potenciômetros. O circuito também possui um potenciômetro de ajuste de zero

(calibração) e possui regulador de tensão (LM78S05) para alimentar o *strain gauge* em 5 V, e reguladores de tensão (LM7812 e LM7912) para alimentar os INA e o TL081. A Fig. 3.8, resume o circuito da placa com amplificador de microvolt para milivolt, filtro e amplificador de milivolt para volt.

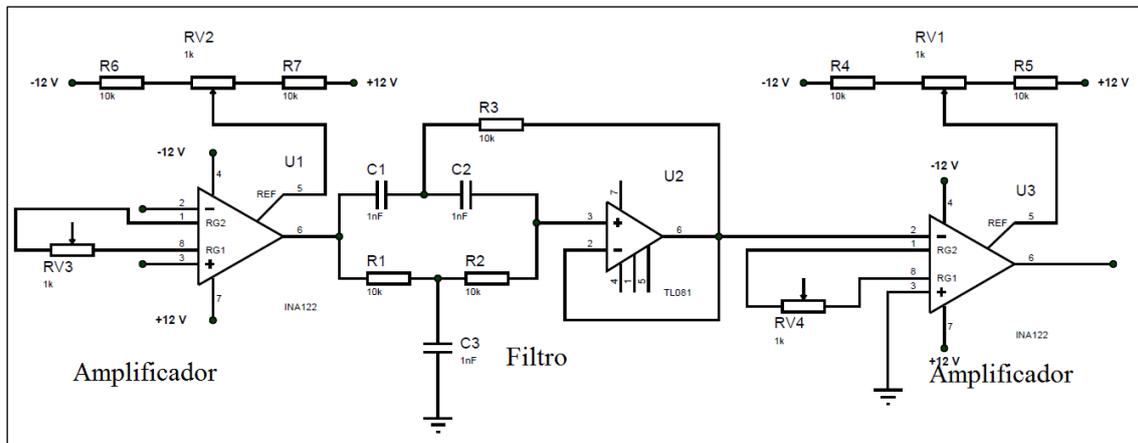


Figura 3.8 – Esquema do circuito de amplificação de microvolt para milivolt e para volt com filtro

3.2.2 ENSAIO DE VERIFICAÇÃO DE LINEARIZAÇÃO DAS CÉLULAS DE CARGA

Após a confecção das células, foram realizadas a verificação da linearização, isto é, ensaiadas com várias cargas estáticas adicionadas por meio de uma prensa CBR com anel dinamométrico aferido. A leitura da carga aplicada fez-se diretamente em um extensômetro analógico. A medida de tensão elétrica fez-se na saída da placa de amplificação com a utilização de um osciloscópio digital Agilent DSO 7054 B, com capacidade de armazenamento do sinal capturado em arquivo de texto. Esse cuidado se deu pelo fato da amplitude da tensão variar de zero a 12 Volts e a simples leitura direta em um voltímetro, ainda que digital, poderia acarretar erro de leitura, tendo em vista que o osciloscópio oferece uma resolução muitas vezes maior que o voltímetro. Essa resolução é necessária porque a tensão elétrica oscila em torno de um valor médio.

Após a anotação da leitura de carga, esta foi correlacionada numericamente com a média dos pontos do sinal de tensão capturados pelo osciloscópio. A média foi feita com base em 1000 pontos de leitura de tensão elétrica para cada leitura de carga.

A leitura de carga foi feita de forma acumulada, isto é, até o limiar de 2200 N sem zerar a célula, quando, então, a célula era aliviada da carga e novamente se iniciava nova bateria de carga aplicada. A cada série ajustava-se a posição da célula em relação à posição inicial para 120°, de

modo a fechar a terceira série em 0°. Cada célula sofreu pelo menos três baterias de carga. Constatou-se, em todos os ensaios de verificação, a linearidade das células de carga, que as medidas apresentaram uma sequência de pontos com ajuste de $R^2= 0,99$. A repetibilidade teve uma correspondência de 100%. A Fig. 3.9, mostra a linearização da célula de topo. Nota-se que a interpolação tem R^2 de 0,9999 e uma correspondência de dados das baterias de ensaios que garantem a repetibilidade da célula de carga.

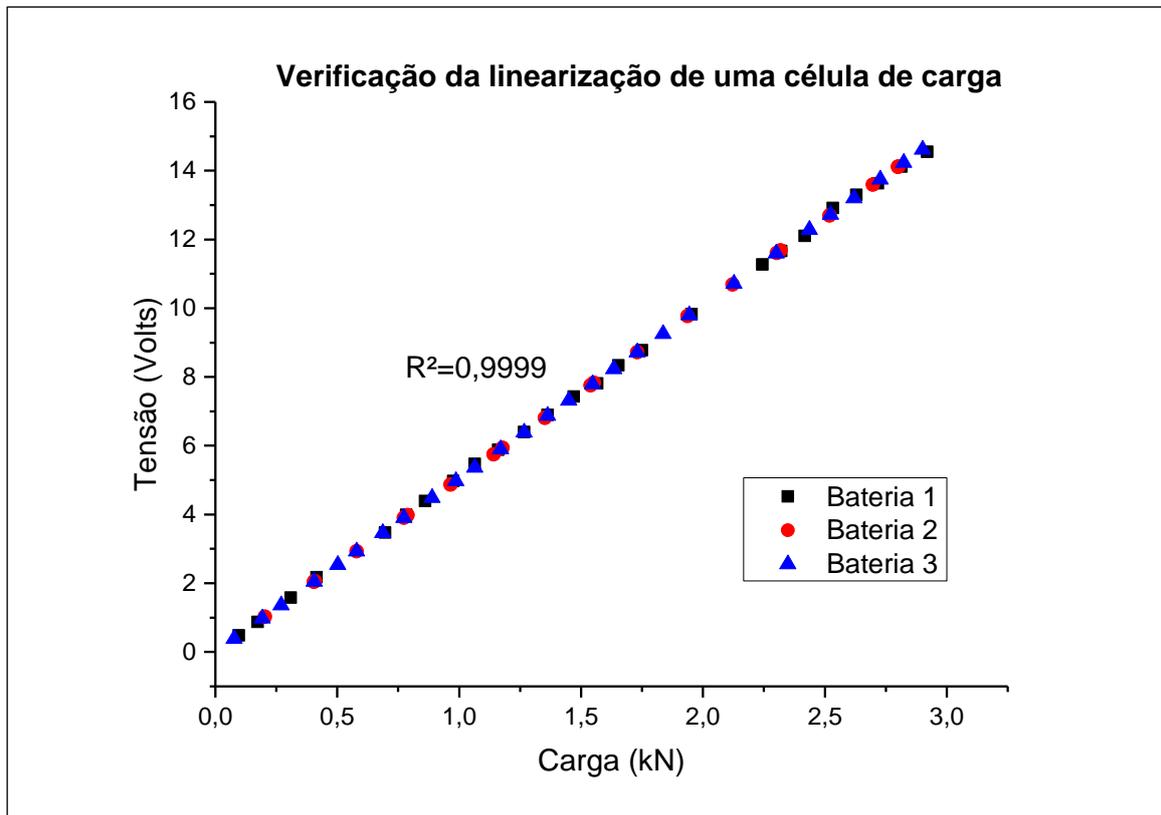


Figura 3.9 – Linearização da célula de carga

A Fig. 3.10, mostra a bancada do ensaio de linearização com a prensa CBR, o osciloscópio, a célula de carga e a placa de amplificação do sinal oriunda da célula de carga. Os sinais registrados foram exportados em ASCII, no formato CSV, que permitiu fazer a análise de linearização com mil pontos de dados pareados. A célula de carga (1) foi alimentada eletricamente por uma fonte regulada e estável (2), que por sua vez teve seus sinais elétricos amplificados por uma placa eletrônica (3), construída especialmente para a tese, após amplificado os sinais, estes foram gravados em Volts em um arquivo de texto. Para cada leitura analógica da prensa foi gravado um arquivo correspondente ao valor do sinal capturado em Volts, oriundo da placa amplificadora. Em resumo o processo consistiu da aplicação de uma

carga (força) pela prensa CBR à célula de carga e a gravação do sinal elétrico correspondente a carga no osciloscópio eletrônico.

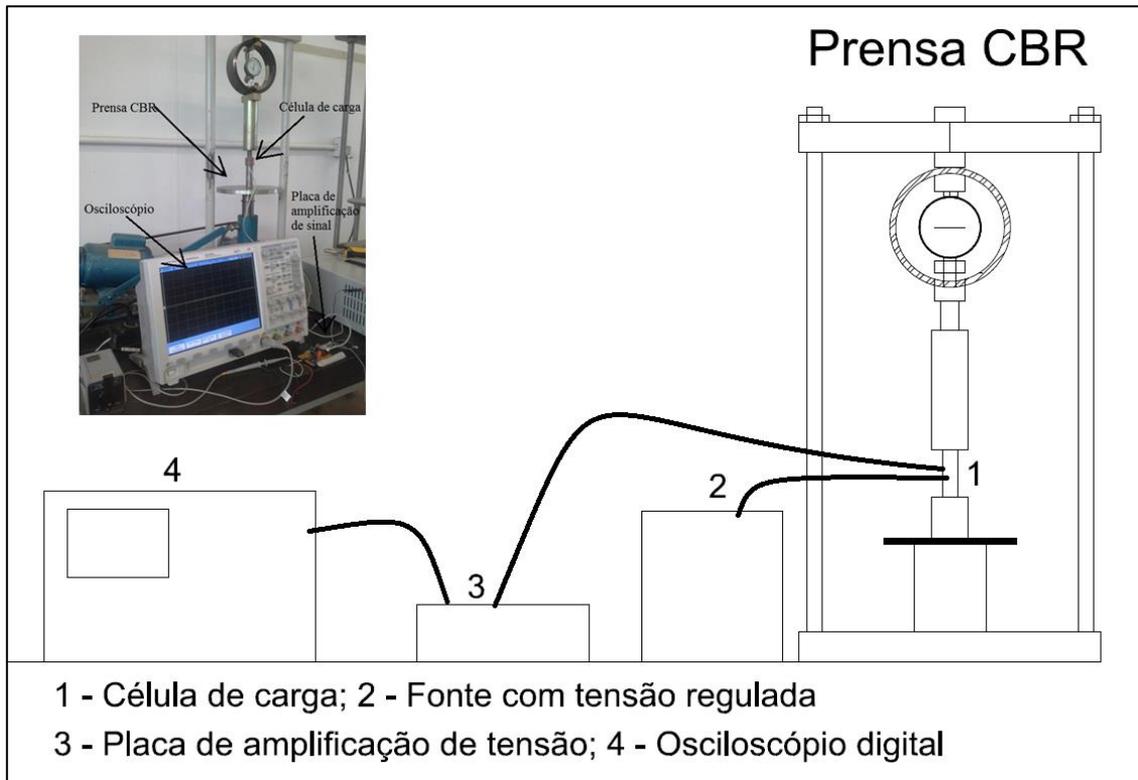


Figura 3.10 – Ensaio de linearização de célula de carga

3.3 ACELERÔMETROS DO TIPO MEMS

Uma inovação na área de sensores de aceleração são os fabricados com base na tecnologia de miniaturização ou nanotecnologia, conhecida na Ásia como micromáquina, na Europa como microssistemas e mais conhecido nos E.U.A como *Micro-Electro-Mechanical Systems* ou simplesmente MEMS. Segundo Ribas (2000), os microssistemas poderiam ser definidos como sistemas miniaturizados compostos por três blocos fundamentais: o bloco de comunicação com o meio exterior que age como sensor e atuador (parte mecânica); o bloco de interface analógica para aquisição, transmissão e amplificação dos sinais dos sensores e atuadores (parte eletrônica); e o bloco de controle e tratamento numérico. A Fig. 3.11, esquematiza essa definição.

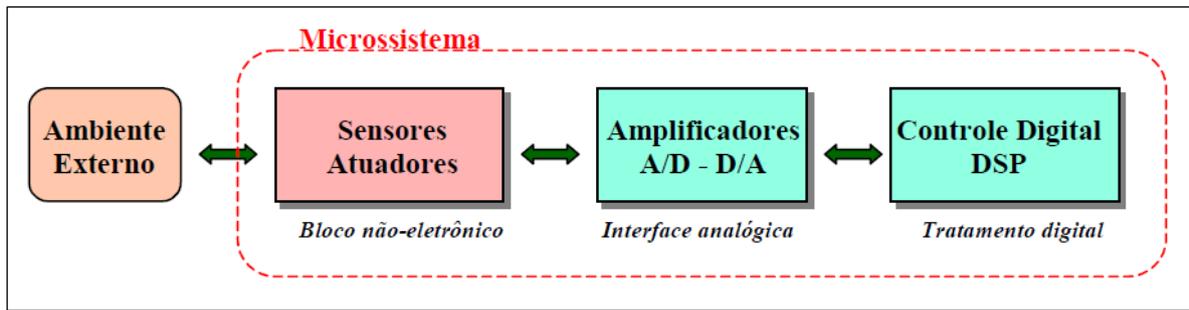


Figura 3.11 – Esquema de um MEMS (Ribas, 2000)

A opção por essa tecnologia de acelerômetros foi pelo custo do equipamento. Os acelerômetros empregados para medir a velocidade da partícula em estacas ou SPT têm custos elevados, embora sejam práticos no tocante a montagem no segmento da estaca ou do penetrômetro. O emprego do ADXL-193, além de custo exponencialmente mais baixo dos que são empregados em ensaios dinâmicos de estacas, traz uma inovação em relação a outros acelerômetros do tipo MEMS pelo fato de serem embarcados, isto é, não há necessidade de implantar o acelerômetro em uma placa de circuito eletrônico e ainda acresce que, como visto na Figura 3.12, a amplificação está no mesmo bloco do *chipset*.

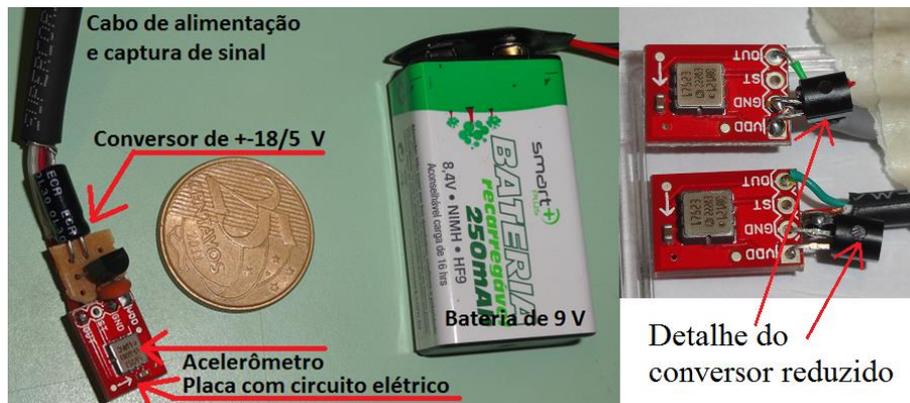


Figura 3.12 – Detalhe do *chipset* ADXL-193 com o conversor instalado

Resta, contudo, a manutenção da tensão de entrada constante, no caso de 5 Volts. Para isso foi instalado junto ao *chipset* um conversor com regulador de tensão que garantia a voltagem de entrada de até 18 Volts e de saída sempre em 5 Volts. A fonte de alimentação foi feita com bateria de 9 Volts. A Fig. 3.13, mostra em detalhe dois *chipsets* ADXL-193 com o acelerômetro, a placa cartonada e o conversor com regulador de voltagem para 5 Volts. Observa-se que a magnitude de miniaturização do acelerômetro obrigou a instalar um conversor de tamanho reduzido porque a fiação quebrava a solda, e ainda assim foi necessário fundir a estrutura cartonada com o conversor e parte da fiação em uma cápsula com resina de epóxi. A preparação

de cada acelerômetro foi feita com alinhamento vertical e horizontal, de modo que a excentricidade não afetasse a acurácia das medidas como detalha na Figura 3.14, onde se nota que a fixação de acelerômetros obedece a uma redundância de modo a garantir a fidelidade dos sinais de aceleração. Observa-se, também, que a posição dos acelerômetros em relação à célula de carga resulta em uma defasagem dos sinais oriundos dos sensores que será avaliada em seção adiante, neste capítulo.

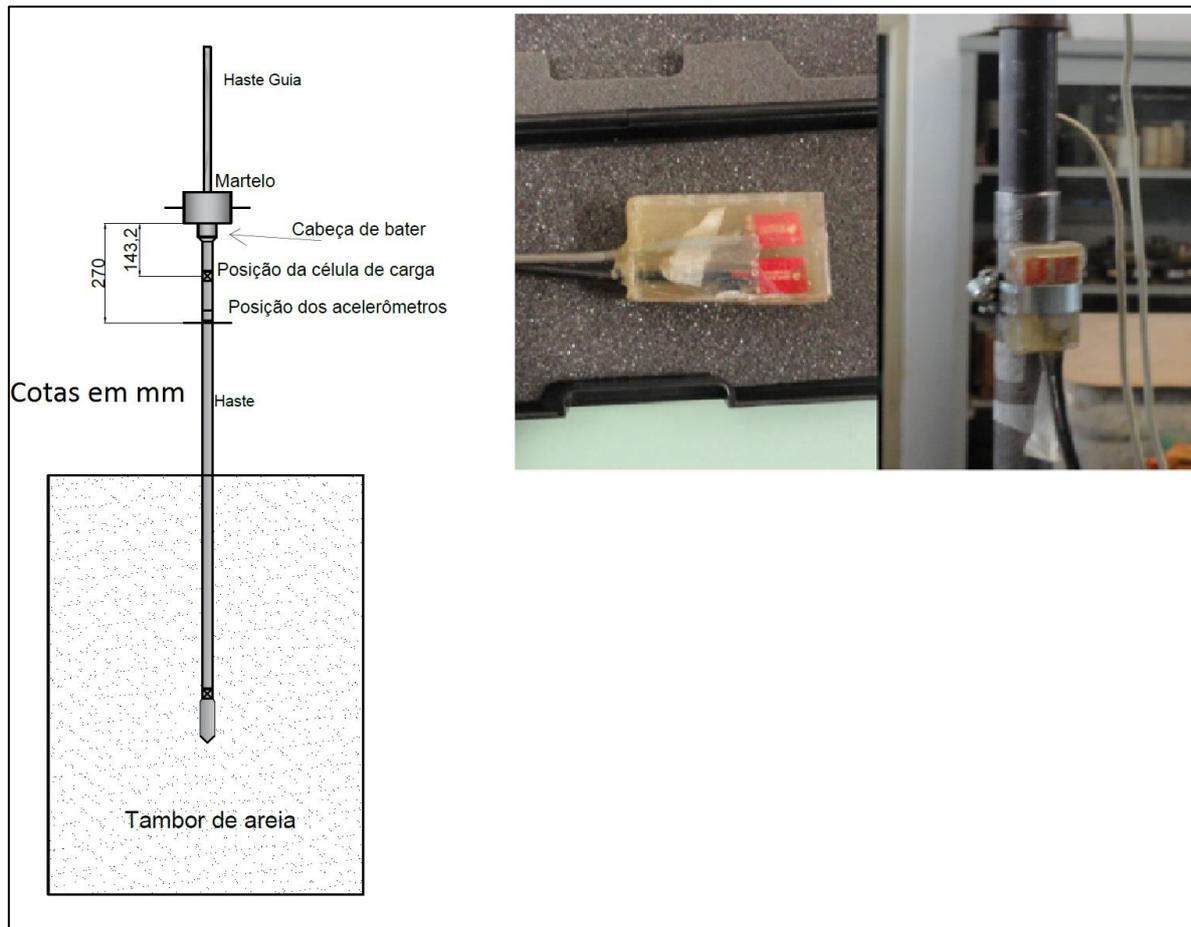


Figura 3.13 – Acelerômetros encapsulados em resina epóxi e fixos na haste do DPL

3.3.1 TRATAMENTO DOS SINAIS DA CÉLULA DE CARGA E DO ACCELERÔMETRO

O sinal do acelerômetro ADXL-193 combinado com a utilização do osciloscópio digital, descrito na seção anterior, levou a dispensa de técnicas de tratamento do sinal como, por exemplo, a de *smooth* – ou suavização da curva. O sinal não apresenta interferências e ruídos significativos, isso porque a tecnologia MEMS providencia para esse acelerômetro a filtragem

do sinal. Não há como ter picos de aceleração atribuídos pelo autor a perturbações não axiais sofrida pelo sensor, citado como por Odebrecht (2003). Sabe-se que os sinais oriundos de impactos podem conter alta amplitude com componentes de alta frequência. Estes componentes contêm muito pouca informação útil e precisam ser reduzidos. O ADXL-193 utiliza um filtro de Bessel de 400 Hz, esquema mostrado na Fig. 3.14, com dois polos na saída do acelerômetro. O sinal pode saturar em qualquer lugar antes do filtro de Bessel, ou o sensor pode atingir o limite mecânico se a aceleração aplicada for muito além da capacidade física deste. Para esse caso, o ADXL utiliza um sensor de ressonância para frequência acima do limite do acelerômetro. Essa medida demonstrou sua eficácia na realização dos ensaios, pois as ressonâncias eram facilmente identificadas pela forma do sinal, o que indicava a necessidade de reaperto das conexões do DPL.

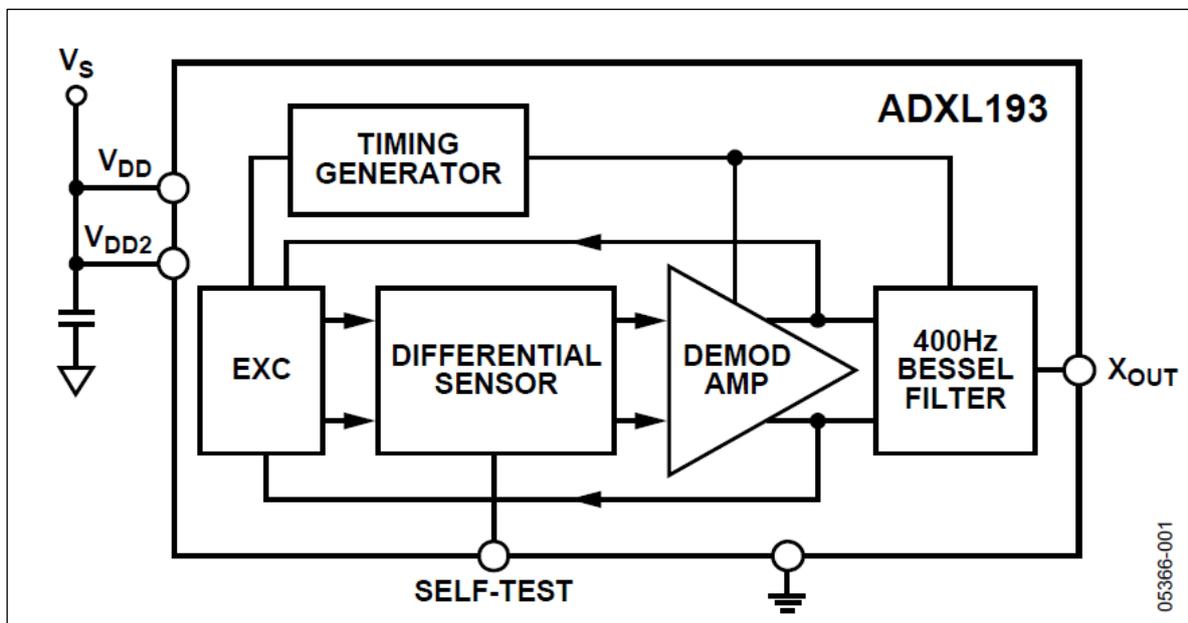


Figura 3.14 – Diagrama de bloco do ADXL-193 (MEMS® Accelerometers ADXL 193)

Do mesmo modo, em relação aos sinais oriundos das células, os filtros foram embarcados em uma placa, descritos na seção 3.2.1 deste capítulo. Nota-se que tanto a integração dos sinais sem tratamento, Fig. 3.15 (a) e (c), quanto os que sofreram processamento, Fig. 3.15 (b) e (d), suavização ou *smooth* pelo método Savitzky-Golai, têm a mesma área integrada. Esse método tende a preservar as características da distribuição inicial, como máximos e mínimos relativos, bem como os picos que com outras técnicas são achatados. Ainda assim, se o sinal apresenta muito ruído, há a perda de ganho na área sob a curva, que no caso não ocorreu. Isto veio a comprovar a eficiência da passa alta e baixa para os sinais capturados pela célula de carga e acelerômetro. Essa diferença mínima entre o sinal bruto e o sinal tratado levou a integrar

numericamente o sinal sem tratamento, apenas com a correção da linha dos zeros na integração da aceleração, quando então a velocidade tende a apresentar uma inclinação em relação à abscissa.

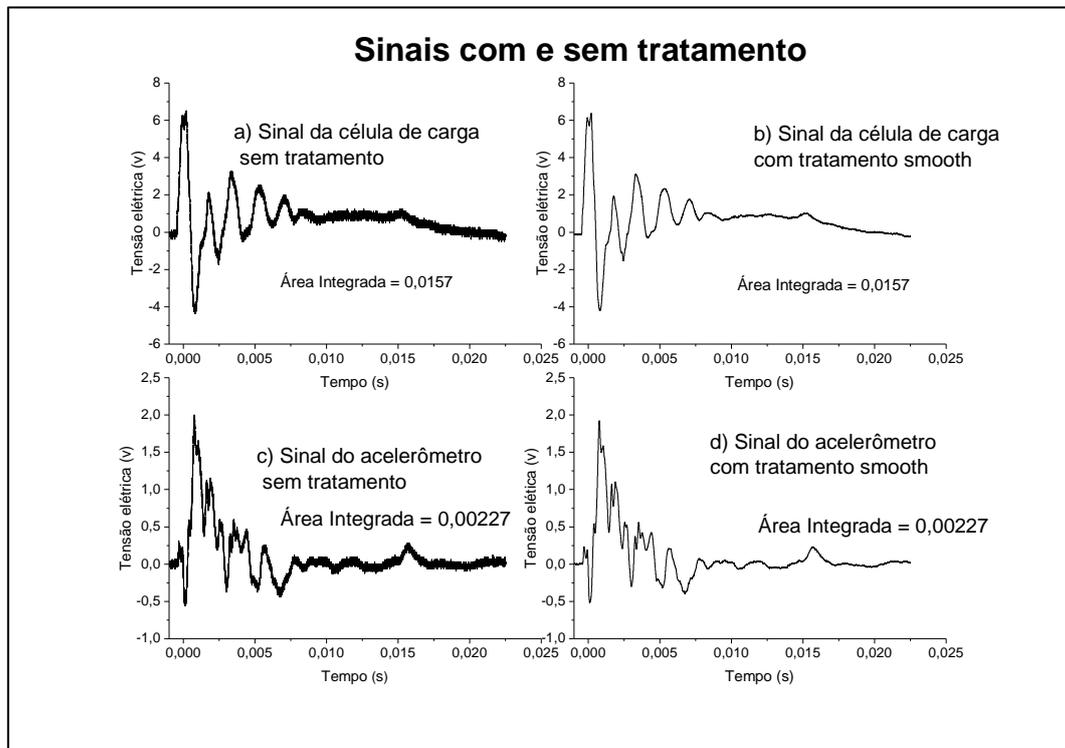


Figura 3.15 – Integração de sinais com e sem tratamento

3.3.2 REDUNDÂNCIA E *OFFSET* DO SINAL DO ACELERÔMETRO

Não foi possível fazer a calibração dos acelerômetros, além da realizada pelo fabricante que apresenta como parâmetro a correlação típica de 8 mv/g com variação de 7,6 a 8,4 mv/g em torno desse parâmetro ou de ± 297 a ± 328 g. Nominalmente o fabricante indica uma aceleração máxima de uma escala cheia de ± 250 g. A calibração de acelerômetro do tipo empregado nesta tese exige uma mesa de calibração para altas acelerações, não disponível nesta tese. Vale lembrar que Odebrecht (2003), também optou pela calibração do fabricante pelo mesmo motivo aqui apresentado. Esse valor, com variação de 5 % em torno da média perde o significado para o cálculo da velocidade, uma vez que esta representa a integração da aceleração no domínio do tempo, que é diminuto, em termos de escala, se comparado com a aceleração. O *offset* do acelerômetro é 2,5 Volts, quando o acelerômetro não está submetido a uma aceleração maior do que g. A alimentação do sensor é de 5,0 Volts. Assim, toda a tensão de saída medida deve ser diminuída de 2,5 Volts. A Fig. 3.16 mostra um sinal de acelerômetro com saída da linha de terra em 2,5 Volts, e depois, o mesmo sinal, rebatido com a diminuição do valor do *offset*.

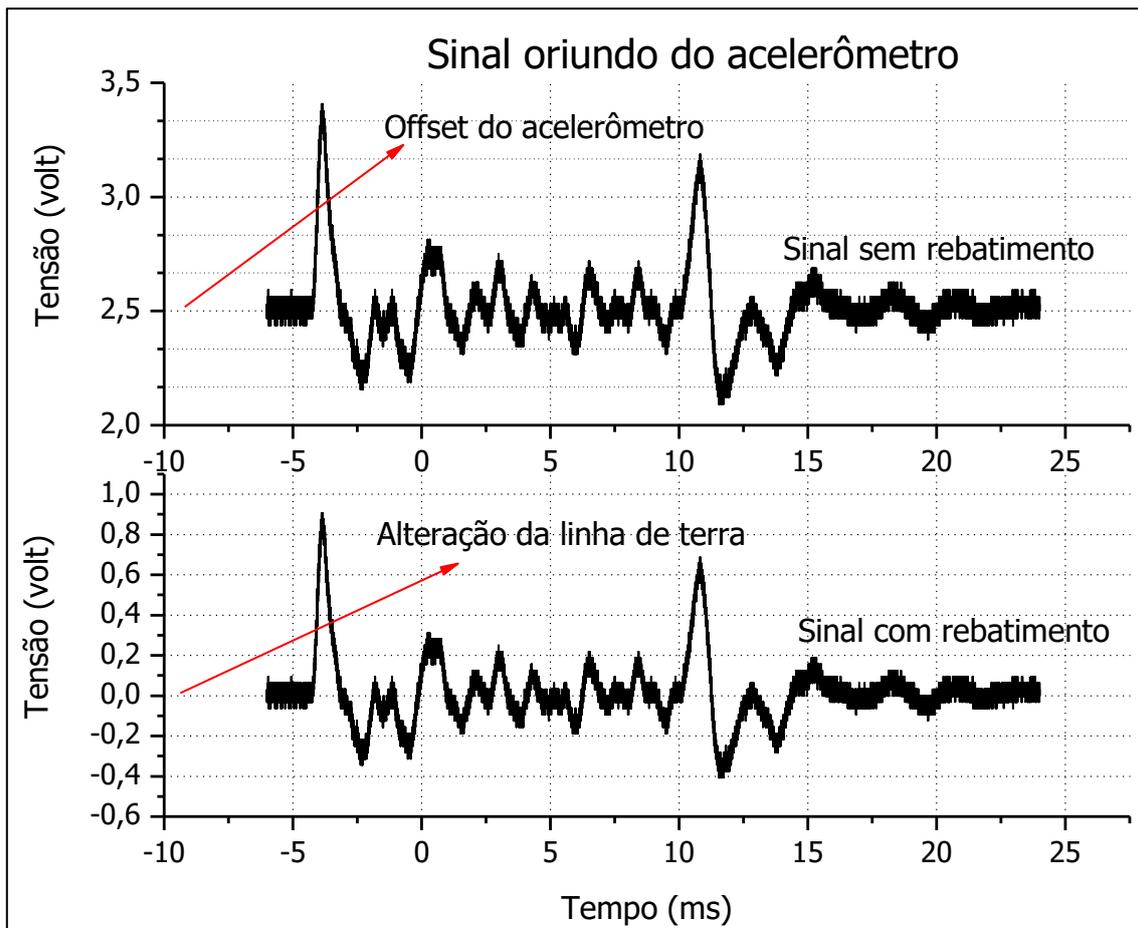


Figura 3.16 – Sinal de acelerômetro com rebatimento e sem rebatimento

Uma forma de validar a integridade do sinal foi a execução da redundância dos acelerômetros. Centenas de testes foram realizados cujo objetivo era observar se os sinais de aceleração tinham correspondência no primeiro trimestre de 2013. Todos os resultados desse ensaio foram positivos.

A Fig. 3.17 mostra o sinal oriundo de dois acelerômetros (A e B). Nota-se que, o sinal foi correlacionado para o valor da aceleração e rebatido para a metade da tensão de entrada de 5 Volts, porque, originalmente, o sinal do acelerômetro não é rebatido. Percebe-se a coincidência dos sinais, que pode ser verificada até mesmo visualmente. Os sinais do acelerômetro foram capturados com um osciloscópio digital Agilent DSO 7054 B, com capacidade de capturar até 2 bilhões de amostras por segundo. No caso dos ensaios, foram feitas capturas de quatro sinais, cada um com uma matriz numérica de duas colunas e 50.000 linhas para até 45 milissegundos que representam $1,11 \times 10^6$ pontos ou amostras por segundo.

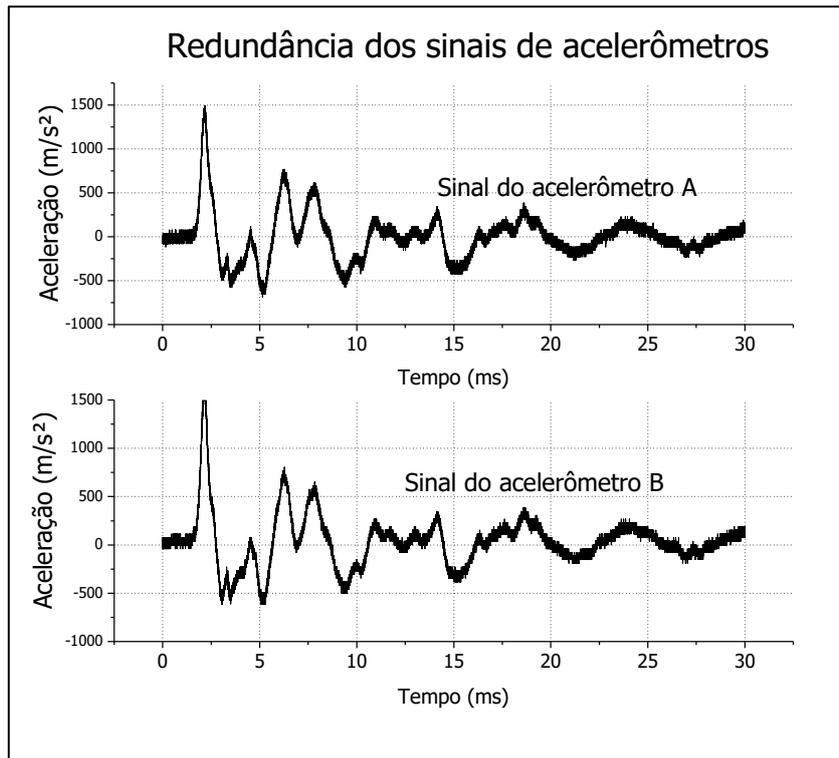


Figura 3.17 – Redundância dos sinais de acelerômetro

3.3.3. CORREÇÃO DO SINAL DA ACELERAÇÃO NA VELOCIDADE INTEGRADA

A integração da aceleração, invariavelmente, deve apresentar a linha de base ou linha de terra com início da amplitude em zero e finalização, no domínio do tempo, também em zero. Contudo, isso nem sempre isto é constatado. Odebrecht (2003) fez a correção da aceleração no próprio sinal do acelerômetro, como mostra a Fig. 3.18, subtraindo os valores registrados pelos valores da reta para rebater o sinal de aceleração.

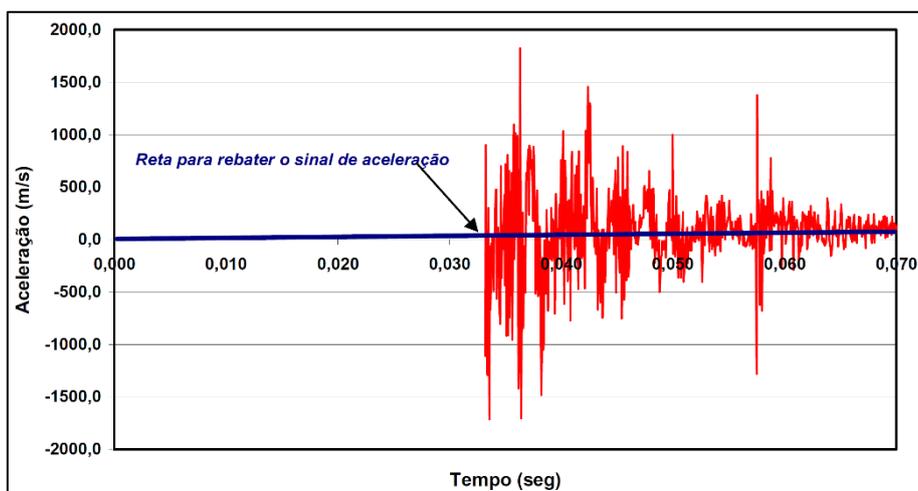


Figura 3.18 – Sinal de aceleração com correção da linha de rebatimento (Odebrecht, 2003)

Nesta tese a opção da correção do sinal, através de uma reta de subtração da amplitude, foi feita na primeira integração do sinal do acelerômetro, i.e., na plotagem da velocidade. Para comprovar se o sinal foi devidamente corrigido fez-se a derivação do sinal da plotagem da velocidade comparando com o sinal primário da aceleração. A Fig. 3.19 mostra uma sequência que demonstra a técnica de correção do sinal primário oriundo do acelerômetro, como se segue:

- a) A Figura 3.19 (a), mostra o sinal primário do acelerômetro que foi, depois, integrado no domínio de tempo que corresponde a aceleração e que resulta na velocidade, como mostrado na Figura 3.19 (b);
- b) Nota-se na Figura 3.19 (b), que o fechamento do domínio integrado está desbalanceado, i.e., o esperado é que os pontos extremos da integração tenham amplitudes iguais a zero;
- c) Para corrigir desnível, mostrado na Figura 3.19 (b), toma-se as extremidades da integração como linha base e subtrai-se os valores das amplitudes da curva de integração dos valores da amplitude da reta definida como linha de base (linha tracejada na Figura 3.19 (b));
- d) Feito isso, a integração do sinal primário (velocidade) passa a ter as extremidades iguais a zero do acelerômetro corrigido, como mostrado na Figura 3.19 (c).
- e) Para certificar-se que a correção foi consistente, faz-se a derivação do sinal da velocidade e o resultado é comparado com sinal primário, como mostrado na Figura 3.19 (d);

Observa-se que a correção da reta de rebatimento no sinal primário do acelerômetro é de difícil execução tendo em vista que cada tomada de sinal dos sensores corresponde a uma matriz de 2 colunas por 50.000 linhas, isso leva a um desnivelamento da reta base quando da integração. Nota-se que nem sempre há necessidade dessa correção pois o osciloscópio digital empregado na captura dos sinais tem filtros que operam no nivelamento da reta base. Foi feito um algoritmo para correção da reta de rebatimento do sinal oriundo do acelerômetro em C (linguagem computacional) que depois foi abandonado por conta do emprego de aplicativos numéricos com capacidade de correção da reta base.

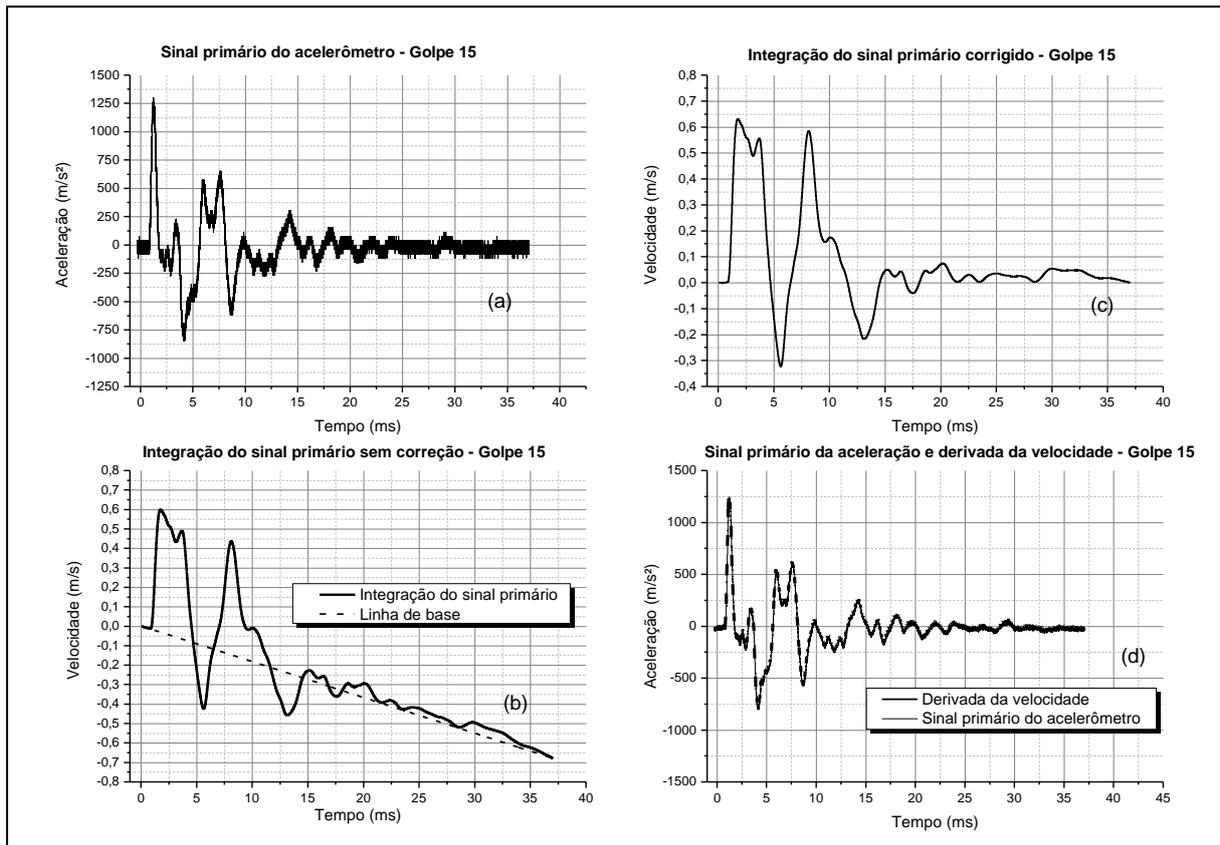


Figura 3.19– Correção da linha base da integração do sinal do acelerômetro para o Golpe 15

3.4. REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE DPL EM TAMBOR DE AREIA

O DPL foi cravado em um tambor de areia com diâmetro de 0,60 metros e altura de 0,85 metros. Fez-se a determinação do índice de vazios mínimo da areia, conforme o método B da NBR 12051(1991) e, a determinação do índice de vazios máximo da areia conforme o que prescreve o método das NBR 12004 (1990). A areia seca, previamente medida a massa, foi lançada no tambor em camadas de 10 cm, e compactada com avaliação de umidade e determinação de índices de vazios máximo e mínimo. Além disso, foi feita a medida de peso específico natural da areia, peso específico dos grãos e compactidade relativa, após colocada no tambor. A granulometria da areia, bem como os parâmetros de coeficiente de uniformidade e coeficiente de curvatura, além dos já descritos acima são mostrados na Fig. 3.20.

Os ensaios de DPL, posteriormente, comprovaram a eficácia da compactação pois, as penetrações a partir de 20 cm de profundidade sempre foram menores que 2 cm por golpe e, a partir de 35 cm de profundidade em torno de 5 milímetros, próxima da nega do DPL que é de 2 milímetros. A Fig. 3.21, mostra o tambor de areia com o DPL já em parte penetrado, com

toda a parafernália de medição. Nota-se que pelo fato da fiação e placas de amplificação abertas, os ensaios em campo aberto seriam inexequíveis.

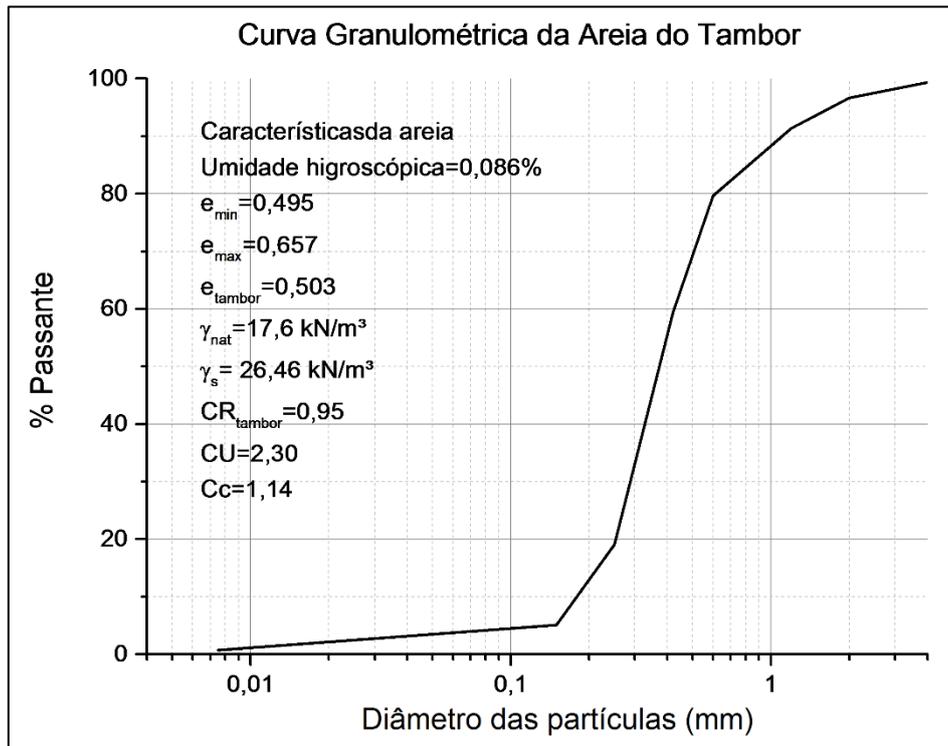


Figura 3.20 - Granulometria da areia utilizada para o ensaio de medida de energia



Figura 3.21- DPL montado no tambor de areia com toda a parafernália de medição

3.5 MÉTODO DE ENSAIO PARA A MEDIÇÃO DE ENERGIA DO DPL

A primeira tarefa foi medir todas as massas e o comprimento no sentido da profundidade dos componentes do penetrômetro. A seguir, foi montado o DPL no tambor de areia com a fiação dos sensores conectada às fontes de alimentação e osciloscópio. Quatro canais do osciloscópio foram utilizados, sendo dois para as células de carga e dois para acelerômetros. O posicionamento das células de carga foi a 15 cm da superfície de contato entre martelo e cabeça de bater, para a célula próxima ao topo do DPL, e 10 cm acima do cone para a célula de carga inferior. Os acelerômetros foram fixados a uma distância equivalente a 10 diâmetros da haste, a partir da superfície de contato entre martelo e cabeça de bater, 26,8 cm.

Para a captura de sinais dos sensores realizava-se o seguinte procedimento:

- a) Medida do comprimento da haste da superfície de contato entre martelo e cabeça de bater até a superfície de areia, com uma trena eletrônica com resolução milimétrica;
- b) Alinhamento dos sensores para o *offset* estático: as células de carga para zero e os acelerômetros para 2,5 Volts;
- c) Ajuste dos canais do osciloscópio para captura de 50.000 pontos e uma faixa de domínio de 35 ms;
- d) Armazenamento das variáveis de ajuste no osciloscópio;
- e) Bloqueio da captura dos sinais pelo osciloscópio pelo pesquisador;
- f) Levantamento do martelo para altura de 50 cm pelo operador;
- g) Desbloqueio da captura dos sinais pelo osciloscópio pelo pesquisador;
- h) Soltura do martelo após comando do pesquisador ao operador;
- i) Bloqueio do osciloscópio e conferência na tela dos registros dos sinais capturados;
- j) Ajuste do zero inicial e gravação em arquivo texto em uma unidade de armazenamento digital;
- k) Nova medida do comprimento da haste da superfície de contato entre martelo e cabeça de bater até a superfície de areia, com uma trena eletrônica com resolução milimétrica e com isso a conferência da penetração permanente.

Todas as medidas de penetração foram anotadas manualmente. Ao zerar os sensores assumiu-se o peso do conjunto do DPL como parte da carga estática o que mais tarde foi corrigido no cálculo da integração do sinal. As células de carga após o primeiro ajuste para zero não necessitavam de ajustes para os golpes subsequentes. Os acelerômetros sempre estavam calibrados para 2,5 Volts. A seguir é mostrada uma sequência de figuras.

A Fig. 3.22 mostra um esquema com o DPL no tambor com os três estágios comentados. A Fig. 3.23 apresenta os dois estágios finais, 2º e 3º estágios, com detalhes e a Fig. 3.24 mostra um esquema com o instrumental de alimentação energia elétrica com a tensão controlada para cada tipo de sensor: 5 Volts para os acelerômetros e 12 Volts para as células de carga.

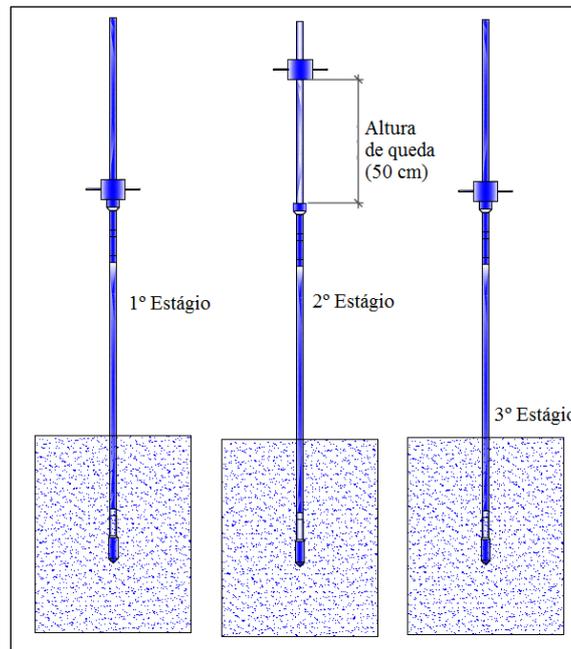


Figura 3.22 - Estágios do ensaio para medida de energia do DPL

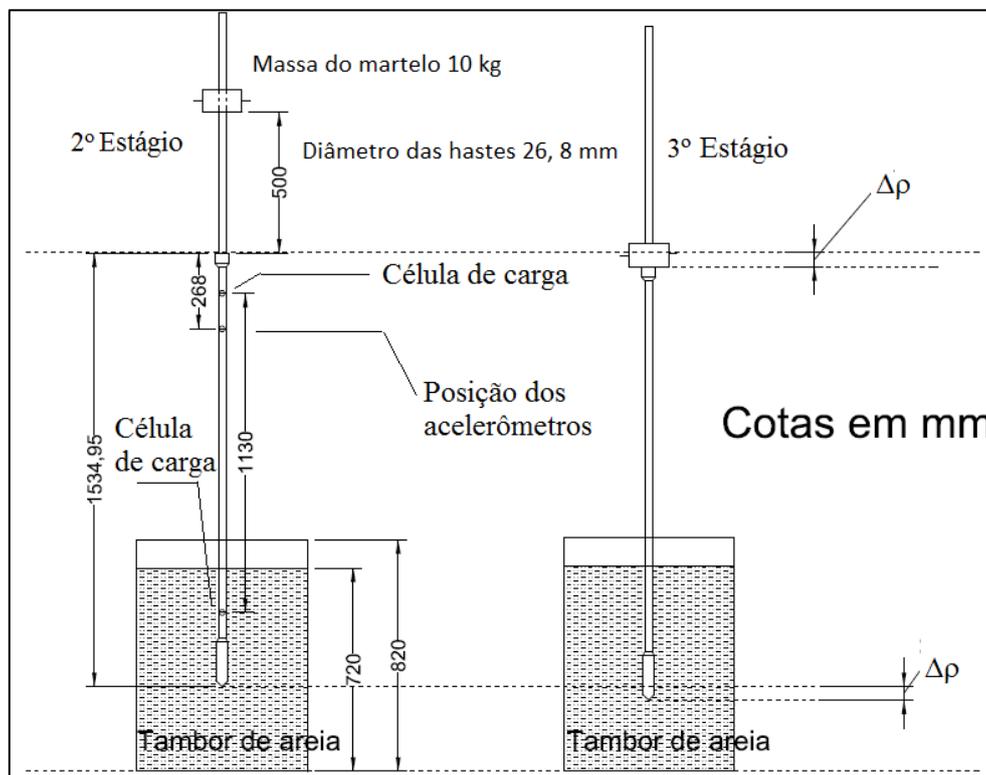


Figura 3.23 - Detalhe do segundo e terceiro estágios do ensaio de medida de energia do DPL

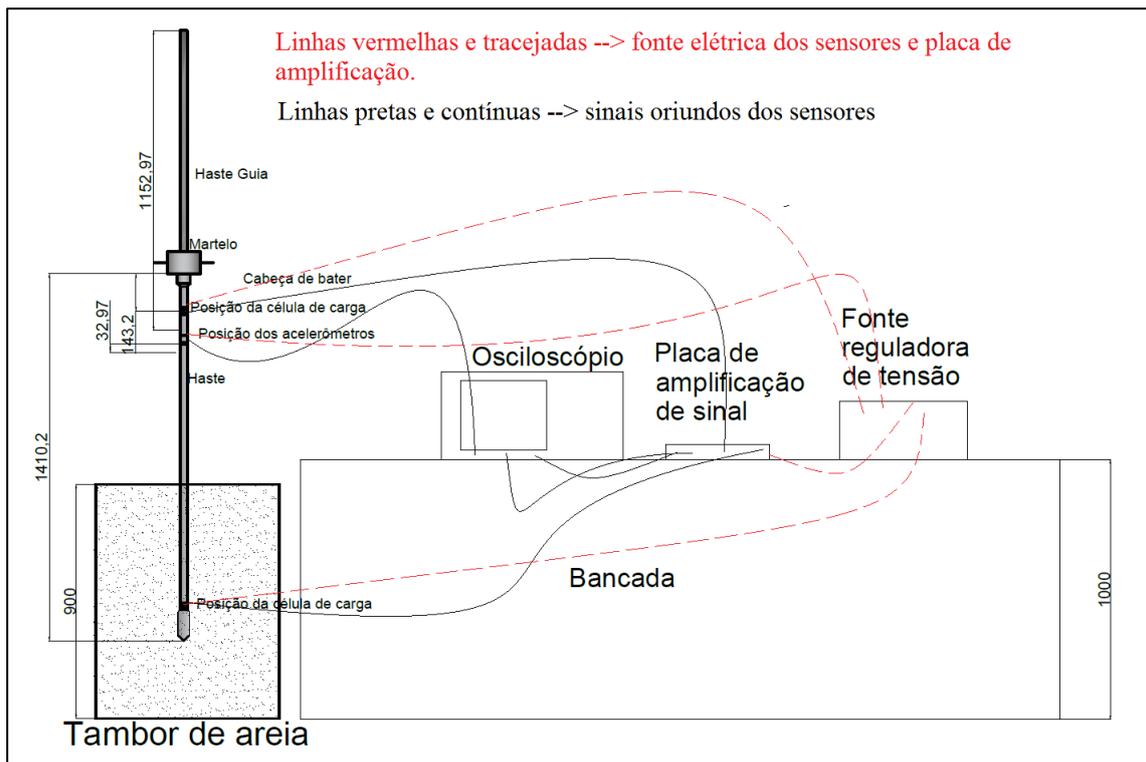


Figura 3.24 - Esquema do tambor, DPL instrumentado, fonte de estabilização e osciloscópio

3.5.1 CÁLCULO DA ENERGIA TRANSFERIDA NO DPL

Adotou-se nesta pesquisa o método EFV, comentado no capítulo 2. A decisão tomada foi dada a característica da medida em haste comprimento curta com mudanças de impedâncias sucessivas causadas pelas conexões típicas do DPL (nípeis) leva a uma desproporcionalidade entre as medidas registradas e as indiretas derivadas da Equação 2.29. No Capítulo 4, essa decisão será discutida com detalhes.

3.5.2 MEDIDA DE PENETRAÇÃO DO CONE DO DPL NO SOLO

Uma das tarefas na medição de energia do DPL foi a de medir a penetração e comparativamente associar esta ao valor da energia entregue ao cone do DPL. Feita a medida oriunda do sinal comparou-se com a medida da penetração com uma trena a laser. No Capítulo 4 será apresentado os detalhes dessa tarefa.

3.5.3 DURAÇÃO DO TEMPO DE CAPTURA DOS SINAIS DOS SENSORES

A preocupação com o domínio do tempo foi a determinação da duração do “tempo ideal” para análise dos sinais dos acelerômetros e células de carga para a medida acurada da energia entregue à haste do DPL. Para os ensaios realizados no tambor de areia o tempo ideal foi de

± 25 ms e a faixa de captura do osciloscópio foi de 50 ms. O detalhamento desse balizamento, também será discutido no Capítulo 4.

3.5.4 CÁLCULO DA INTEGRAÇÃO DA FORÇA E VELOCIDADE

Os registros de aceleração foram integrados para se extrair a velocidade e ajustados, além da conversão da tensão elétrica registrada para aceleração pelo fabricante do sensor. Para a determinação de energia oriunda da queda do martelo do DPL, conforme explicitada na Equação 2.61, foi calculado o produto da velocidade com a força registrada pela célula de carga, na mesma faixa de domínio de tempo. Em termos numéricos, os valores foram calculados em planilhas com a determinação de área sob a curva do produto da força e velocidade. No Capítulo 4 será detalhada essa tarefa. Observa-se que para golpe essa operação matemática foi executada.

3.5.5 CORREÇÃO DA ENERGIA COM ACRÉSCIMO DO PESO ESTÁTICO DPL ANTES DA CÉLULA DE CARGA

Antes de iniciar a medida de um golpe (veja o 2º estágio na Fig. 3.24), as células de carga eram zeradas para alinharem os sinais oriundos dos sensores com a linha de terra. Os acelerômetros também foram alinhados, com a observação que o *offset* desses sensores é de 2,5 Volts. Desse modo, bastou somar a força estática de todo o DPL aos registros das células de carga para se ter a real medida de força de cada golpe. No capítulo 4, será feito uma abordagem sobre esse artifício.

3.5.6 RACIONALIZAÇÃO DA DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA ENERGIA NO DPL

A formulação da medida de eficiência do DPL, adotada para esta tese, é similar ao que propôs Odebrecht (2003) para o SPT. Nesse escopo a medida de eficiência pode ser compreendida como:

- a. Eficiência do martelo ou η_1 que corresponderia à medida de energia integrada (medida por sensores) dividida pela energia potencial do martelo;
- b. Eficiência da composição ou η_2 , fator que corresponde à medida de energia potencial correspondente às energias potenciais da soma da haste, haste guia, cabeça de bater e cone cuja altura de queda corresponde à penetração permanente. O valor de η_2 é igual a 1; e

- c. Eficiência da composição ou eficiência do comprimento da haste, η_3 , elaborada pela formulação de Odebrecht (2003) e rearranjada para o DPL por Ibañez *et al.* (2012), em função do comprimento e raio da haste.

O grupo de formulações, a seguir, discrimina cada parcela componente da energia total no sistema DPL. Desse modo tem-se:

$$E_M = (0,50 + \Delta\rho)M_m g \quad (3.1)$$

$$E_H = \Delta\rho M_H g \quad (3.2)$$

$$E_{cb} = \Delta\rho M_{cb} g \quad (3.3)$$

$$E_{cone} = \Delta\rho M_{cone} g \quad (3.4)$$

$$E_{MDPL} = E_H + E_{cb} + E_{cone} = \Delta\rho M_{DPL} g \quad (3.5)$$

onde:

E_M = Energia potencial do martelo em Joules;

E_H = Energia potencial da haste inclusive as conexões e haste guia em Joules;

E_{cb} = Energia potencial da cabeça de bater em Joules; e

E_{cone} = Energia potencial do cone do DPL em Joules;

E_{MDPL} = Energia potencial do DPL, excetuando o martelo, em Joules

$\Delta\rho$ =penetração permanente do cone em metros;

g =aceleração da gravidade (9,806 m/s²)

Para o cálculo da eficiência do martelo foi considerada a altura de queda de 0,50 metros somada à penetração permanente (Equação 3.1). Desse modo, para o cálculo da energia teórica foram considerados os valores de $g=9,806$ m/s²; massa do martelo de 10 kg e altura de queda de 0,5 m, assim a energia teórica (E^*) foi definida em 49,03 Joules. As formulações de eficiência do DPL correspondem a energia integrada no topo da composição.

$$\eta_{1DPL} = \frac{\int_0^{t^{\max}} FV dt}{[(0,50 + \Delta\rho)M_m g]} \quad (\text{Método EFV}) \quad (3.6)$$

Para uma definição mais acurada da eficiência do DPL é necessário considerar o efeito da força produzida pela massa da haste (η_2) e ainda o efeito do comprimento da haste (η_3). O η_2 tem eficiência de 100% ou igual a 1; o η_3 foi definido por Odebrecht (2003) conforme a formulação mostrada na Eq. 3.7:

$$\eta_3 = 1 - 0,0042 \times l \quad (3.7)$$

l = comprimento da haste em metros.

Feita as considerações de eficiência, considera-se para esta tese, no cálculo da variação de energia no sistema DPL (VES), como se segue a Eq. 3.8, neste caso a eficiência do martelo pelo método EFV, como:

$$VES = [(\eta_{1DPL} (0,50 + \Delta\rho) \times M_m \times g) + \eta_2 (M_H + M_{cb} + M_{cone}) \times g \times \Delta\rho] \times \eta_3 \quad (3.8)$$

onde:

VES = variação de energia do sistema DPL;

η_{1DPL} = Eficiência da energia do martelo;

η_2 = Eficiência da energia da haste;

η_3 = Fator de correção do efeito da haste;

A análise da eficiência do DPL (η_{DPL}) para qualquer método é dada Eq. 3.9, i.e., razão da variação da energia do sistema pela energia teórica:

$$\eta_{DPL} = \frac{VES}{E^*} \quad (3.9)$$

onde:

η_{DPL} = Eficiência do DPL;

VES = variação da energia do sistema;

E^* = energia teórica, fixada em 49,03 Joules.

Uma variante da Equação 3.7 seria a energia do sistema (E.S.), sem considerar a eficiência do martelo, apenas a sua energia potencial somada às outras energias derivadas das partes do DPL, mostrada na Eq. 3.9:

$$E.S. = M_m (0,50 + \Delta\rho) + \Delta\rho (M_H + M_{cb} + M_{cone}) \quad (3.10)$$

A variação da energia para uma mesma composição e mesma penetração, é a eficiência do martelo. É para conseguir esse resultado, a eficiência, que se tem os métodos de medida de energia.

Um comentário final sobre a eficiência do DPL adotada para esta tese refere-se ao valor de η_{1DPL} que, nos trabalhos de medida de energia do SPT, é fixado como uma constante e neste trabalho será considerado como uma variável dependente em relação a dois testes de domínio: penetração permanente do cone e comprimento da haste penetrada. A Tab. 3.2 apresenta o

resumo das formulações empregadas para a determinação da energia transmitida às hastes do DPL

Tabela 3.2 – Parcelas computadas para o cálculo energia do sistema do DPL

Parcela	Formulação	Observação
EFV Equação 2.61	$EFV = \int_0^{tmax} Fvdt$	EFV → energia máxima transferida às hastes, obtida com registros de força e de velocidade. Ambos os registros integrados no mesmo intervalo de tempo
E_M Equação 3.1	$E_M = (0,50 + \Delta\rho)M_m g$	E_M → energia oriunda da queda do martelo do DPL M_m = massa do martelo do DPL 10,0 kg $\Delta\rho$ = penetração permanente confirmada com trena a laser
E_h Equação 3.2	$E_H = \Delta\rho M_h g$	E_H → energia da haste do DPL M_h = massa da haste do DPL, inclusive a massa das conexões anotada como 2,34 kg/m
E_{cb} Equação 3.3	$E_{cb} = \Delta\rho M_{cb} g$	E_{cb} =Energia oriunda da cabeça de bater M_{cb} = massa da cabeça de bater → 0,595 kg
E_{cone} Equação 3.4	$E_{cone} = \Delta\rho M_{cone} g$	E_{cone} → energia oriunda do cone M_{cone} = massa do cone → 1,24 kg

A aceleração da gravidade g foi definida para 9,806 m/s² e a energia teórica do DPL em 49,03 Joules

3.5.7 CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA A PENETRAÇÃO DO CONE DO DPL

São analisadas as condições de contorno para a penetração do cone do DPL para verificar se as hipóteses previstas para estacas, também são válidas para o cone do DPL. Segundo Gonçalves *et al.* (1996) e observando a Fig. 3.25, a força total na ponta (F_p) e a velocidade da ponta (V_p) da estaca são obtidas pelas equações de equilíbrio e compatibilidade, respectivamente:

$$F_p = F \downarrow + F \uparrow \quad (\text{Equilíbrio}) \quad (3.11)$$

$$V_p = V \downarrow + V \uparrow \quad (\text{Compatibilidade}) \quad (3.12)$$

Na primeira condição a ponta é livre e as forças se anulam com a resistência de ponta (F_p) igual a zero. A sequência de cálculo mostra que essa condição duplica a velocidade de partícula. Para Gonçalves *et al.* (1996) os sinais em estacas curtas, análogo ao DPL analisado, há uma redução da força e um aumento da velocidade. Assim para quando a resistência de ponta é igual a zero, $F_p=0$, e a velocidade $V=V_p$ tem-se:

$$F_p = 0 \Rightarrow F \uparrow = -F \downarrow \quad (3.13)$$

$$V_p = V \downarrow + V \uparrow \quad (3.14)$$

$$V_p = F \downarrow / Z - F \uparrow / Z \quad (3.15)$$

$$V_p = F \downarrow / Z - (-F \uparrow / Z) = 2F \downarrow / Z = 2V \quad (3.16)$$

Na segunda condição a ponta é engastada, as velocidades se anulam e não há deslocamento (p) da ponta do cone do DPL. A sequência de cálculo mostra que essa condição duplica a força. Para Gonçalves *et al.* (1996) a onda refletida é de uma onda de compressão com a velocidade das partículas negativa que provoca um aumento no sinal da força e a diminuição da velocidade. Assim, se estabelece a hipótese que o cone é indeslocável com conseqüente velocidade igual a zero ($V_p=0$) e força igual a força ponta ($F=F_p$), assim tem-se:

$$V_p = 0 \Rightarrow V \uparrow = -V \downarrow \quad (3.17)$$

$$F_p = F \downarrow + F \uparrow \quad (3.18)$$

$$F_p = ZV \downarrow - ZV \uparrow \quad (3.19)$$

$$F_p = ZV \downarrow - (-ZV \downarrow) = 2ZV \downarrow = 2F \quad (3.20)$$

Conclui-se que as duas condições de contorno determinam os limites para os quais se dá, na prática, a penetração do cone do DPL. Na prática há sempre penetração do cone do DPL de modo que se dê a reação do solo. Quando a resistência do solo à penetração é baixa a onda de tração é elevada; quando a resistência do solo é elevada a onda de tração é baixa, Há sempre um balanço, entre força e velocidade de partícula, que depende da resistência do solo.

Se a penetração é elevada, tem-se a força diminuída e o aumento da velocidade. De modo inverso se dá quando a penetração do cone se aproxima da nega ou impenetrável para o DPL (50 golpes para penetrar 100 mm) com o aumento da força e diminuição da velocidade de partícula. De modo prático, para o ensaio, fica mais fácil avaliar os registros de força e velocidade em função da penetração permanente do cone do DPL.

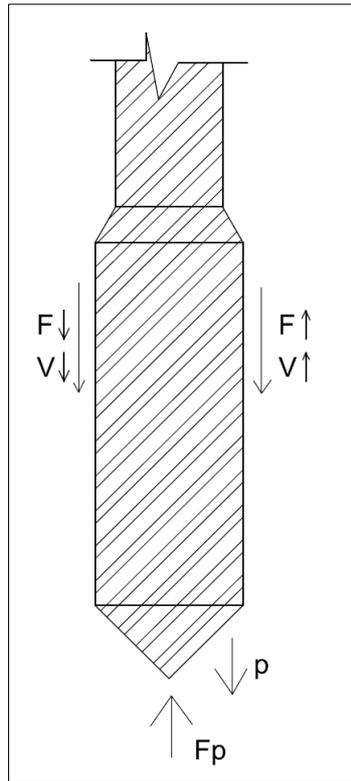


Figura 3.25– Condições de contorno abaixo da ponta (adaptação de Gonçalves *et al.* (1996))

Como última tarefa relativa a métodos para medir e controlar os registros de força e velocidade, a velocidade de queda do martelo do DPL foi medida nesta tese com a em 2,97 m/s. Toda a formulação teórica adotada bem como os ensaios realizados são descritos no Apêndice B, desta tese. A velocidade medida serviu para avaliar a impedância apresentada discutida no Capítulo 4.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E ANÁLISES DA MEDIDA DE ENERGIA DO DPL

Este capítulo, apresenta os ensaios para medida de energia do DPL com a aplicação do método EFV. Foram selecionados 50 sinais das células de carga do topo e do cone e registrados e anotados os valores de penetração do cone conforme explicitado no Capítulo 3. Os dados registrados são apresentados na Tab. A.1, do Apêndice A desta tese, com os valores de energias calculadas para cada registro. Todos os registros, apresentados na Tabela A.1, são resultados dos ensaios no tambor de areia. Vale lembrar que os acelerômetros foram instalados próximos, mas não exatamente na mesma posição que célula de carga do topo com uma distância entre esses sensores de 10,7 cm, como se observa na Figura 3.1. Desse modo, o método EFV, pela ausência de acelerômetros próximo ao cone, foi empregado com os registros capturados do par de acelerômetros e célula de carga instalados no topo da composição do DPL (Figura 3.1).

4.1 AVALIAÇÃO DOS SINAIS

De maneira preparatória para a medida pelo método EFV, foram realizados mais de 400 golpes e, para cada golpe, foi analisado o tipo do sinal de força no qual se observou se havia histerese e ruídos no caso dos sensores de força. Para os acelerômetros observou se os sinais apresentavam coerência com o tráfego do sinal de força na primeira ascendente e se não havia inversão do sinal. A seleção dos sinais da célula de carga não apresentou dificuldade. Os sinais oriundos das células não apresentaram “transbordamento” ou *overflow*, aliás durante toda a pesquisa nesta tese, isso não ocorreu, tanto para o acelerômetro quanto para as células de carga. Contudo, alguns sinais das células de carga e acelerômetros apresentaram-se incoerentes com os resultados esperados e por isso foram descartados. A seguir são apresentadas essas anomalias e as possíveis causas. Ao final dessa preparação prévia, como já referido, foram selecionados 50 golpes de um ensaio que foram organizados na Tabela A.1.

4.1.1 SINAIS DE FORÇA COM HISTERESE

A histerese é a tendência de um material ou sistema de conservar suas propriedades na ausência de um estímulo que as gerou. A deformação causada pelo impacto do martelo, representada pela onda de força, é preservada mesmo na ausência de um estímulo. A Fig. 4.1 mostra um sinal da célula de carga que apresentou uma carga de tração estática mantendo-se abaixo da linha de terra a partir de 24 milissegundos. Ressalta-se que, esse fenômeno foi raro entre as

capturas de sinais. Uma Hipótese seria o aquecimento das grelhas dos *strain gauges*, contudo sinais seguintes aos que apresentavam um desnivelamento da linha de terra não confirmaram essa possibilidade. Outra possibilidade seria que a estabilidade da fonte não se conservasse durante o impacto. Silva (2014) faz notar que se trata de célula defeituosa, contudo, o fato de não se repetir em sequência, mostra que a medida com sensores elétricos é afetada, por pequena que seja, como aparenta ser o caso, pela variação da alimentação elétrica. A histerese foi eliminada com o ajuste, a cada ensaio, da fonte de alimentação da placa de amplificação dos sinais da célula de carga.

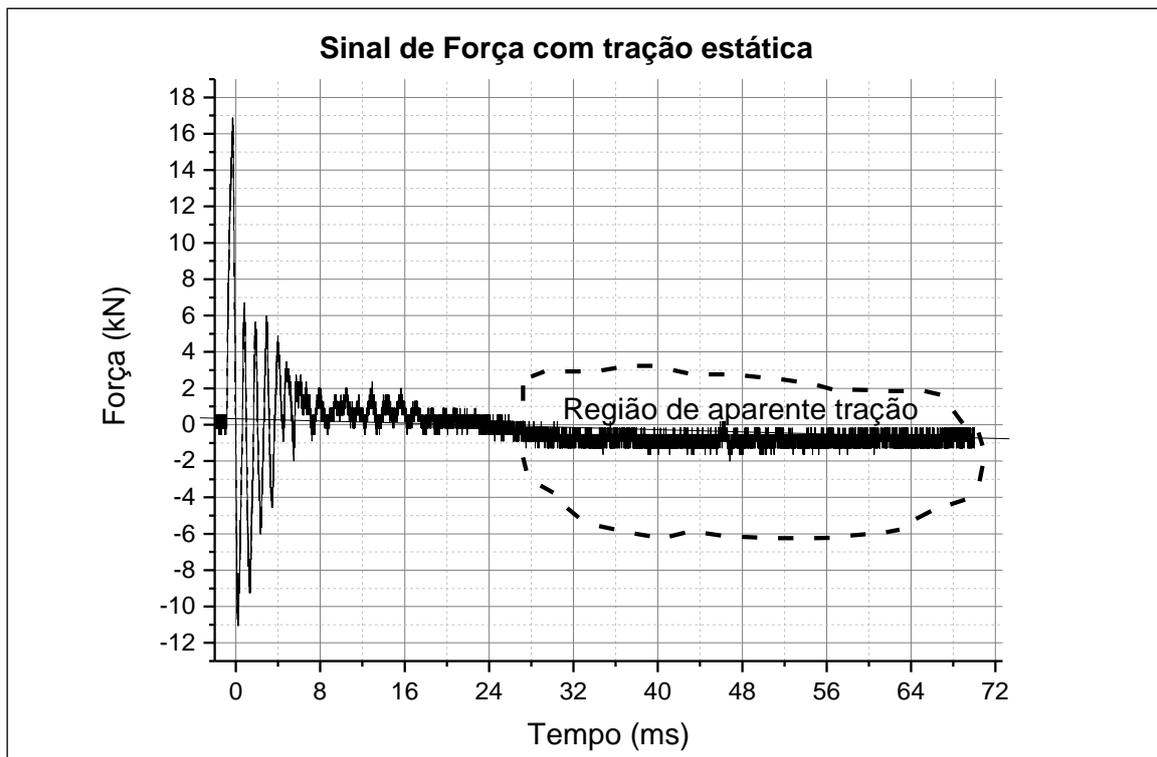


Figura 4.1– Sinal de Força com início de histerese

4.1.2 SINAIS DE FORÇA COM RUÍDOS EXCESSIVOS

Alguns sinais apresentaram ruído excessivo como mostrado na Fig. 4.2. Observou-se que esse tipo de ruído era detectado quando as conexões se encontravam frouxas. A própria visualização da onda no osciloscópio mostrava se a composição estava ou não com as conexões bem atarraxadas pela forma desse tipo de sinal. Silva (2014), faz referência a esse tipo de problema na captura de sinais, observando que a composição não pode ter folgas entre as conexões de modo a garantir que a composição se comporte como uma peça única. Essa anomalia foi eliminada com a verificação do aperto das conexões a cada dez golpes (ensaios).

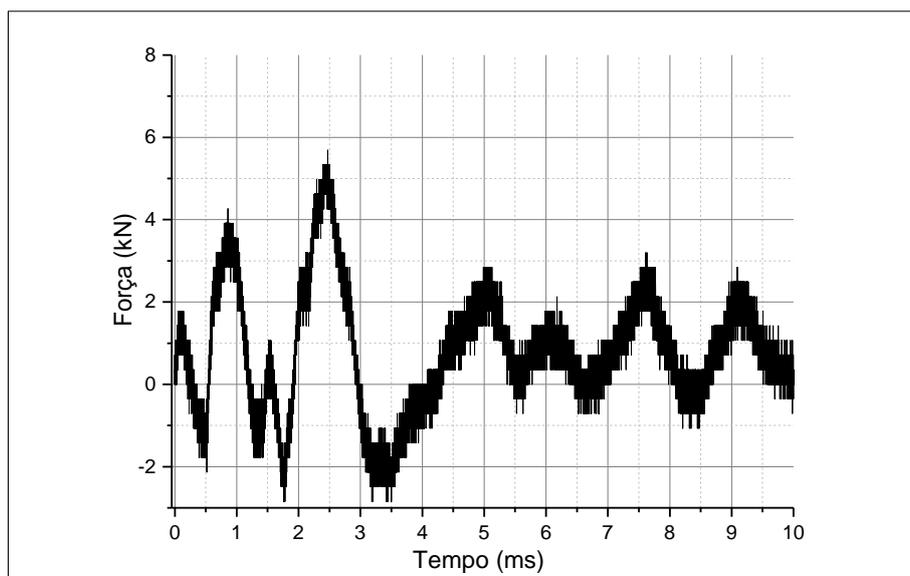


Figura 4.2 – Sinal de Força com ruído excessivo

4.1.3 SINAIS DE ACELERAÇÃO COM INVERSÃO

Alguns sinais oriundos do acelerômetro apresentavam-se invertidos sem proporcionalidade em relação ao sentido do sinal da força. Mais uma vez atribuiu-se a anomalia à fonte de alimentação elétrica, embora cada placa de acelerômetro tivesse um dispositivo para manter a tensão e corrente elétrica estáveis e também ao excesso de vibração que ocorre quando do início da penetração da haste do DPL, nos primeiros golpes. Para o autor desta tese, ambas as hipóteses concorrem para que esse fenômeno ocorra. As baterias forneciam cerca de 12 Volts de tensão e 1,5 ampères e por volta de 9 Volts ocorria esse fenômeno e, sempre, concomitante ao excesso de vibração. Embora a variação de tensão da fonte, em cada acelerômetro foi instalado um conversor com regulador de tensão fixada em 5 Volts, comentado no Capítulo 3, Figura 3.13.

A Fig. 4.3 mostra dois sinais: o sinal A apresenta a aceleração ascendente como esperado, uma vez que ocorre a penetração da haste em sequência à queda do martelo do DPL, e o sinal B uma aparente inversão. Contudo, o exame mais detalhado do sinal B leva a assegurar que não se trata de inversão, mas de uma pequena ascendência da primeira onda. Essas aparentes inversões de sinais do acelerômetro ocorreram, sempre, nos primeiros golpes, quando o cone do DPL ainda não estava inteiramente afixado na areia do tambor de areia. Ajustes das conexões e partes do DPL e controle da estabilidade de carga das baterias ao acelerômetro eliminaram essa inversão. A cada bateria de golpes eram trocadas as baterias que alimentavam os acelerômetros.

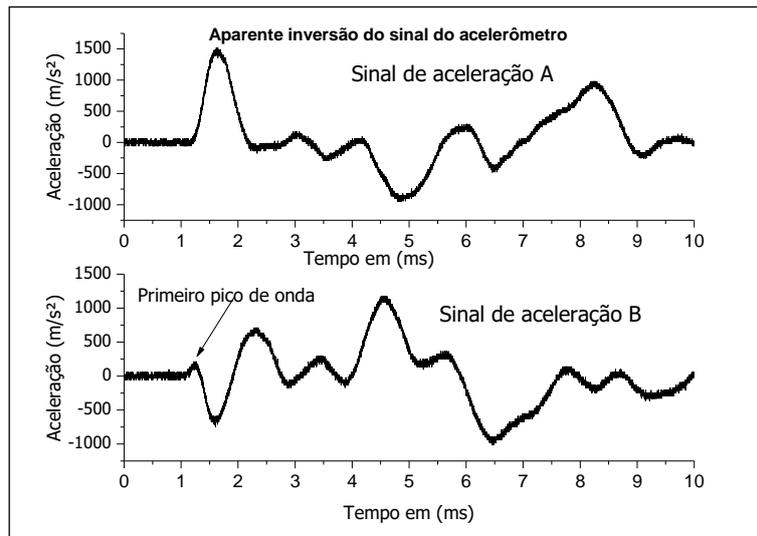


Figura 4.3– Sinais de aceleração com aparente inversão

4.1.4 VERIFICAÇÃO DA FORÇA MÁXIMA REGISTRADA E DO IMPULSO

A força registrada no topo da composição próxima cabeça de bater e a registrada logo acima do cone foram comparadas. Não foram instalados acelerômetros próximo ao cone, de modo, como já comentado, a medida de energia foi feita apenas no topo da composição. Contudo chamou a atenção na medida de L/c a diferença de magnitude da força máximas que ocorre no pico da primeira onda de compressão. Foi feita, então a medida do pico máximo de força registrada da célula do topo célula do cone e avaliado os 50 registros anotados na Tabela A.1. Foi, também, calculado o impulso de cada sinal de força registrada nas células de carga. O impulso é a ação da força sobre um corpo, fazendo-o mover, em um intervalo de tempo. Embora, no caso em estudo, o efeito elástico da haste e a restituição oferecida pelo solo devam ser consideradas, a grosso modo pode-se utilizar dessa grandeza física para a análise em curso. Para tanto se fez a integração dos registros no intervalo de tempo do tráfego da onda resultada do impacto do martelo na cabeça de bater.

A Fig. 4.5 mostra os registros das forças máximas e mínimas e os impulsos calculados para cada posição de célula de carga, topo e cone. A Figura 4.5 mostra que os afastamentos entre a força máxima e mínima são maiores, relativamente, que os relativos aos impulsos calculados. Percebe-se. Também, que as forças máximas no topo são invariavelmente maiores que as registradas para o cone. Nota-se que a penetração permanente (ρ) aparenta não influenciar aos registros de força máxima. Esse fato reforçou a decisão de relegar o método EF2 tendo em vista que a impedância tomada no cálculo para esse método é constante. Em relação aos impulsos, estes são maiores para os calculados no topo em relação às penetrações permanentes menores

que 12 mm. Nota-se que a penetração permanente influencia o impulso. Fica evidente que para deslocamento maiores, que significam velocidades maiores, os impulsos diminuem, tanto no topo quanto no cone; para deslocamentos menores, que significam menores velocidades, os impulsos aumentam. Isso mostra que para haste curta a hipótese tratada para a condição de contorno, vista no Capítulo 2, para a reação da ponta do DPL, se confirma.

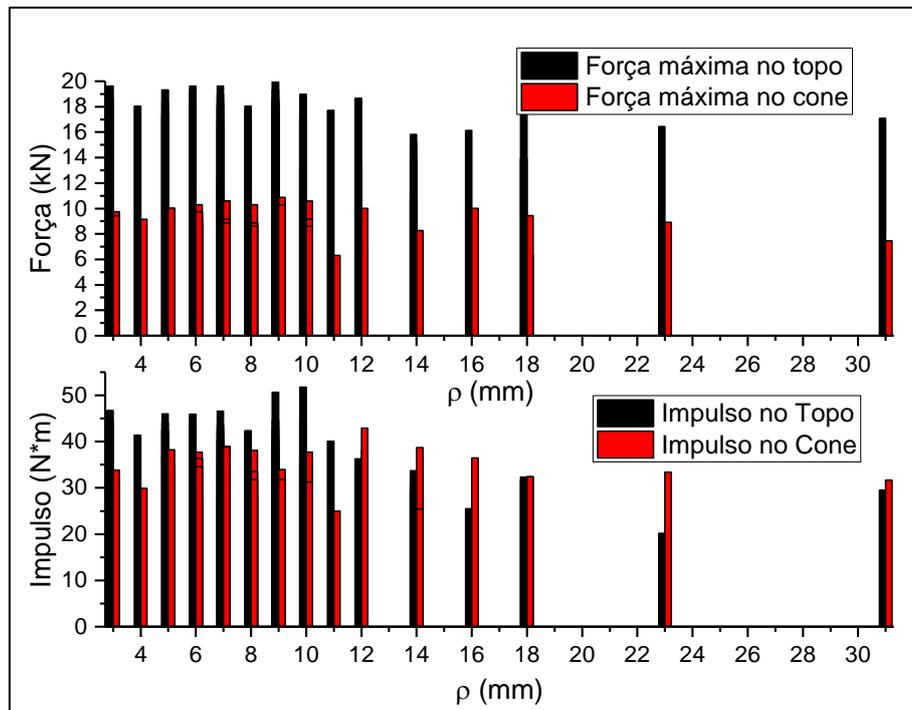


Figura 4.4 – Diferença entre os máximos de força e impulsos calculados com os registros das células de carga

A Tab. 4.1 resume os dados estatísticos descritivos para a força máxima e impulso. A média da força máxima no topo é de 17,28 kN e no cone de 9,09 kN, quase o dobro da máxima do topo em relação à máxima do cone. O coeficiente de variação (C.V.), respectivamente de 12% e 13% para topo e cone, em relação à força máxima, confirma que a força não é influenciada pela penetração permanente (ρ). A relação entre a força máxima do cone e do topo tem média de 52,97% com coeficiente de variação de 13%. Esses números relativos aos picos de força máxima mostram que a variabilidade em relação à penetração permanente é baixa.

Em relação aos impulsos os dados da Tabela 4.1 a média dos impulsos são, 38,83 N.m com coeficiente de variação de 17% e 32,66 N.m com coeficiente de variação 13%. A média da relação entre os impulsos do cone pelos do topo aproximam para 100%, ou da igualdade, contudo o coeficiente de variação é elevado, 27%, quando comparado com diferença ente os picos de força máxima. A dispersão dos dados para os impulsos mostra que a penetração

permanente influencia, a lembrar que o impulso é o produto integrado no tempo da força pelo deslocamento.

Tabela 4.1 – Dados estatísticos dos registros de força e impulsos calculados

	Registros	Média	Desvio Padrão	Variância	C.V.	Mínimo	Mediana	Máximo
Força no topo (kN)	50	17,28	2,03	4,12	0,12	10,76	17,87	19,93
Força no cone (kN)	50	9,09	1,18	1,39	0,13	6,01	9,16	10,88
Fc/Ft em %	50	52,97	7,03	49,48	0,13	35,58	52,07	76,90
Impulso no topo It (N*m)	50	38,83	6,62	43,88	0,17	20,17	40,37	51,76
Impulso no cone Ic (N*m)	50	32,66	4,10	16,82	0,13	24,96	32,40	42,94
Ic/It em %	50	87,30	22,60	510,96	0,26	48,31	79,19	165,52

4.1.5 VERIFICAÇÃO DO TEMPO DA ONDA DE PROPAGAÇÃO DE TENSÃO

No conjunto de ações para a seleção dos sinais um deles foi a verificação do tempo de tráfego do sinal da onda de propagação de tensão, oriunda da força incidente no topo do DPL. A distância entre as células de carga do topo e cone (L), considerada de centro a centro, é de 1134 mm (detalhado na Figura 3.1). O tempo de tráfego registrado é de 0,2214 ms. Para esse tempo registrado a velocidade da onda de tensão c, calculada pela razão L/c é 5119,64 m/s. Vale ressaltar que se adota para o aço 1020 (que constitui a composição do DPL) o valor de “c” em 5120 m/s. A Fig. 4.4 detalha a distância entre o início de chegada da onda de compressão para as células de topo e cone.

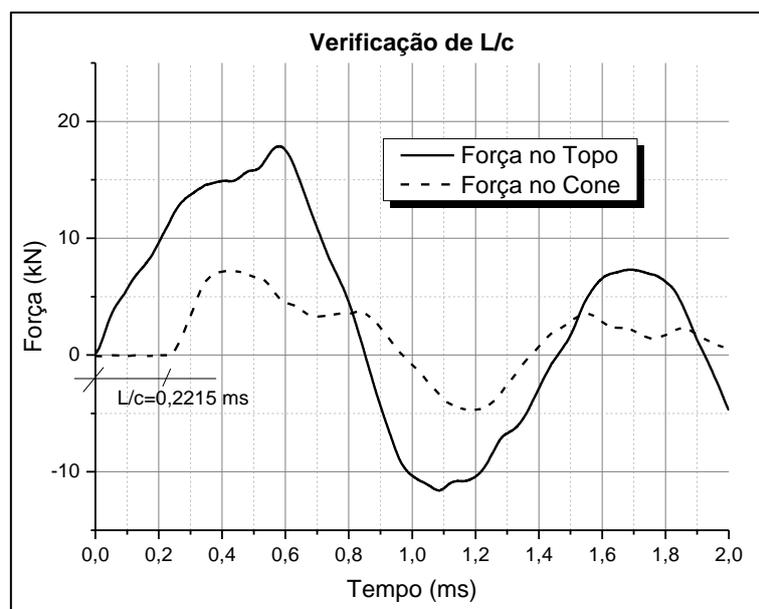


Figura 4.5 – Tempo (L/c) de propagação de tensão entre as duas células de carga

4.2 MEDIDA DE ENERGIA DO DPL - MÉTODO EFV

Nesta seção será abordada a análise dos dados medidos pelo método EFV. A sequência da análise contemplou a avaliação da impedância do DPL adaptado para mensuração da energia pelo método EFV de modo a verificar a influência da geometria no tráfego de força e velocidade com base nas formulações oriundas de Abou-matar e Goble (1977), vistas no Capítulo 2; a avaliação de dois registros típicos de força e velocidade para duas penetrações permanentes distintas do cone do DPL; a escolha da variável independente mais adequada para a medida de eficiência de energia do DPL; a definição do fator de eficiência do martelo e a formulação direta da eficiência do DPL com o número de golpes do DPL.

4.2.1 COMPARAÇÃO DE REGISTRO DE FORÇA COM A IMPEDÂNCIA

Abou-matar e Goble (1977) definiram para a determinação da força e velocidade incidentes, transmitidas e refletidas, com as formulações das equações 2.70, 2.71, 2.72 e 2.73, descritas no Capítulo 2. No capítulo 3 foi apresentada a Fig. 3.1 com os detalhes de posicionamento e área das conexões do DPL.

A Fig. 4.6 mostra o tráfego das ondas de força registradas pelas células de carga do topo e cone e a velocidade a partir dos registros de aceleração do acelerômetro instalado no topo. Nota-se que há um atraso do registro da velocidade em relação à força. Segundo Gonçalves *et al.* (1996), esse fenômeno ocorre em estacas quando o atrito lateral é baixo.

A partir dos do registro na célula de carga do topo, 16,95 kN (Figura 4.6) fez-se os cálculos da força transmitida (Equação 2.70) para o tráfego da força da célula de carga do topo até a célula de carga próxima ao cone. Em relação à velocidade não foi possível a comparação com registros próximos ao cone.

A Tab. 4.2, mostra as forças transferidas até ao último nível (conforme visto na Figura 3.1). A força inicial medida é a do registro, vista na Figura 3.1, de 16,95 kN. O fluxo da onda de compressão segue do nível 1, onde se assenta a célula de carga do topo, que transmite a uma luva alongada que transmite a o nível 2 que transmite à haste que transmite ao nível 3, onde se assenta a célula de carga próxima ao cone. Reitera-se que a razão de impedância é dada por α , isto é, a seção que transmite (Z_1) é sempre o denominador e a seção que recebe a onda de compressão (Z_2) é o numerador. A transmissão de forças através do cálculo das impedâncias resultou em 11,31 kN no nível 3 e o registro oriundo da célula de carga assentada no mesmo

nípel é 10,61 kN (Figura 4.6). A diferença entre a força calculada pela impedância e a fornecida pelo registro da célula próxima ao cone, corresponde a 5,8% do registro da força de compressão.

Tabela 4.2 – Força transmitida da cabeça de bater ao cone do DPL

Encontro de seções	$\alpha=Z_2/Z_1$	Força transmitida	
Célula de carga no topo (nípel1) -> Luva alongada	0,58	$F_i=16,91$ kN	12,40 kN
Luva alongada -> Nípel 2	1,73	12,40 kN	15,70 kN
Nípel 2 -> Haste	0,58	15,70 kN	11,51 kN
Haste -> Célula de carga próxima ao cone (nípel 3)	0,97	11,51 kN	11,31 kN

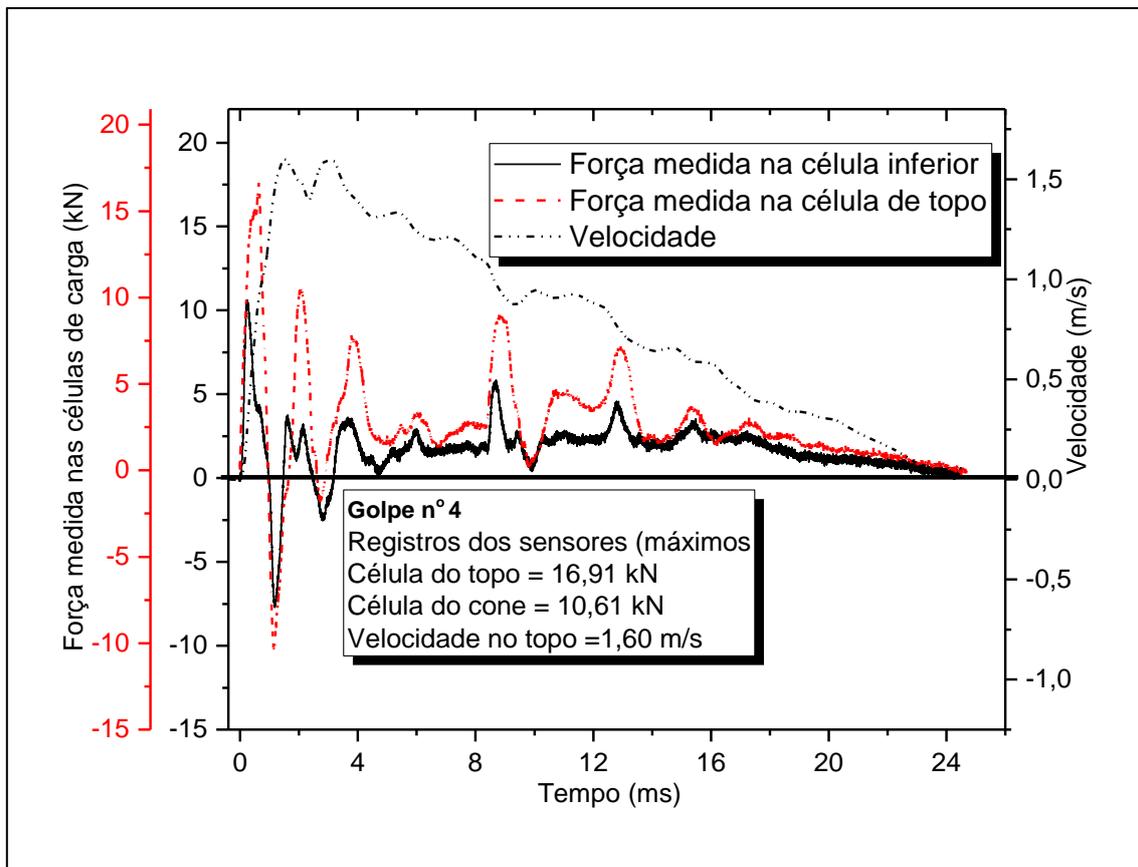


Figura 4.6 – Tráfego de velocidade incidente no topo e forças incidentes no topo e cone

4.2.1.1 COMPARAÇÃO DE IMPEDÂNCIAS ENTRE O DPL ADAPTADO E O NÃO ADAPTADO

Antes de analisar a medida de energia, para os métodos já descrito no Capítulo 3, foi feita uma análise comparativa da impedância das hastes e conexões do DPL adaptado com o DPL sem adaptações. Para tanto foi simulada duas situações: a primeira situação com velocidade inicial (v_i) igual a 2,97 m/s, medida retirada do ensaio de velocidade final de queda do martelo do DPL, apresentada no Apêndice B, desta tese. A segunda situação foi estimada uma força de impacto inicial a partir da razão da energia potencial pelo deslocamento da composição.

Considerou-se esse deslocamento igual a nega do DPL, isto é, 50 golpes para penetrar 10 cm que corresponde a 2×10^{-3} m, a aceleração da gravidade em $9,806 \text{ m/s}^2$, a altura de queda de 0,50 m e massa do martelo em 10 kg para os quais se obtém a força inicial de impacto (F_i):

$$F_i = \frac{M_m \times g \times h}{\rho} = \frac{10 \times 9,806 \times 0,5}{2 \times 10^{-3}} = 24515 \cong 24,52 \text{ kN}$$

Para o DPL sem adaptações a sequência de transmissão da impedância foi: cabeça de bater, haste e cone. Para o DPL com adaptações a sequência de transmissão de impedância foi:

Em relação às junções, pelo fato de serem junções a discretização do tráfego da onda de compressão e de velocidade fica à mercê das geometrias dessas junções que causam várias reflexões em todas as direções, fato muito conhecido no estudo de impacto em hastes. Para uma discretização mais aproximada do tráfego de força e velocidade calculados pela impedância adotou-se dividir em três planos de superfície a beça de bater e duas o cone, conforme detalhado na Fig. 4.7 (a) e (b), respectivamente.

Da Figura 3.3, extraiu-se a seção da cabeça de bater, mostrada na Fig. 4.7 (a). O tráfego nessa peça a partir do impacto na face denominada de S1CB com $13,99 \text{ cm}^2$ e depois a onda de compressão e ou velocidade espriam-se para uma seção maior, S2CB com $19,64 \text{ cm}^2$, que passa para a próxima seção de contato, S1CB $5,64 \text{ cm}^2$, e esta última seção transmite à próxima junção que pode ser a haste, no caso do DPL normal (h1) ou a luva alongada (L1), no caso do DPL adaptado. Da Figura 3.5 foi detalhado o tráfego no cone do DPL Adaptado em duas seções, S1C com $5,64 \text{ cm}^2$ e S2C com $10,75 \text{ cm}^2$.

O exame da Fig. 4.8 mostra o tráfego da força de impedância calculada pelas equações 2.70, 2.71, 2.72 e 2.73. Em relação ao DPL, a partir da força de inicial, de 24,52 kN, há um aumento da força de impedância na face de cabeça de bater (do ponto 0 para o ponto 1) para, logo a seguir, uma queda da força, até alcançar a haste (ponto 1 ao ponto 3). Da haste para o corpo do cone, a força volta a aumentar (ponto 3 ao ponto 5).

Em relação ao DPL adaptado, a partir da força inicial, de 24,52 kN, há um aumento da força de impedância na face de cabeça de bater (do ponto 0 para o ponto 1) para, logo a seguir, uma queda até alcançar a primeira luva alongada (L1), (ponto 1 ao ponto 3). Da primeira luva alongada (L1) até alcançar nípel usinado (nu), a influência dos nípeis são compensadas, embora com queda na transmissão da força de impedância (ponto 3 ao ponto 7). A força transmitida volta a aumentar no trecho entre o nípel usinado (nu) e o corpo do cone, (ponto 7 ao ponto 9).

A perda de força na transmissão calculada pela impedância é de 38,95% para o DPL e 43,64% para o DPL com adaptações. A diferença entre os DPL's, em relação à perda, é de 4,70%.

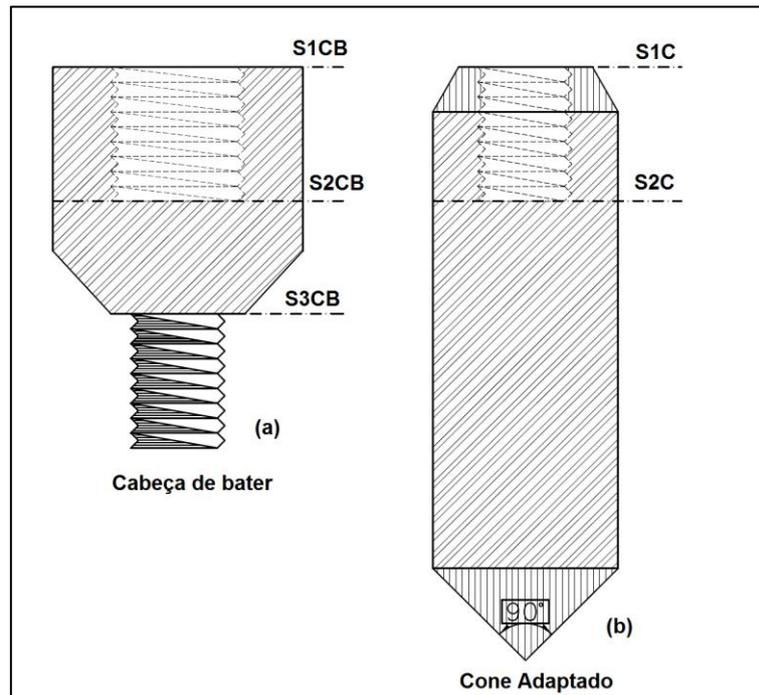


Figura 4.7 – Mudanças de área de seções na cabeça de bater e no cone adaptado do DPL

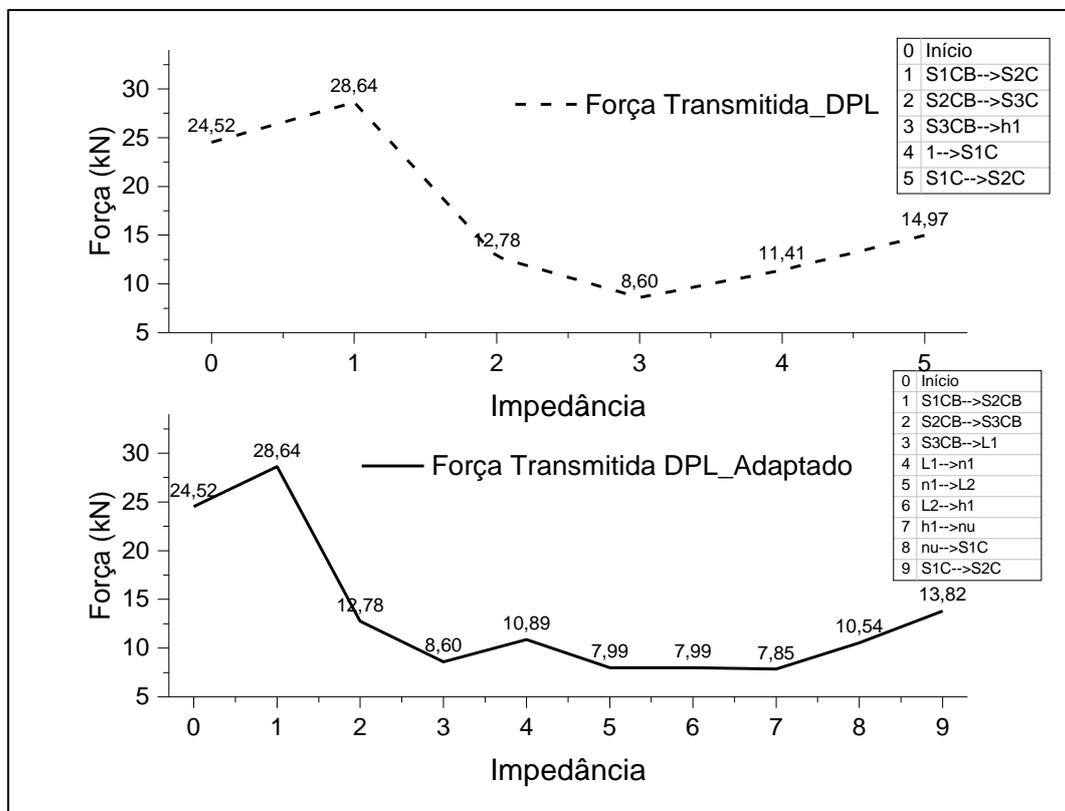


Figura 4.8 – Tráfego da força de impedância Velocidade transmitida da cabeça de bater ao cone do DPL

O exame da Fig. 4.9 mostra o tráfego de velocidade de impedância calculada pelas equações 2.70, 2.71, 2.72 e 2.73. Em relação ao DPL, a partir da velocidade inicial, de 2,97 m/s, há uma diminuição da velocidade de impedância na face de cabeça de bater (do ponto 0 para o ponto 1) para, logo a seguir, um aumento da velocidade, até alcançar a haste (ponto 1 ao ponto 3). Da haste para o corpo do cone, a velocidade volta a aumentar (ponto 3 ao ponto 5).

Em relação ao DPL adaptado, a partir a velocidade de inicial, de 2,97 m/s, há uma diminuição da velocidade de impedância na face de cabeça de bater (do ponto 0 para o ponto 1) para, logo a seguir, um aumento da velocidade até alcançar a primeira luva alongada (L1), (ponto 1 ao ponto 3). Da primeira luva alongada (L1) até alcançar a o primeiro nípel (n1) a velocidade decresce, (ponto 3 ao ponto 4). A velocidade volta a aumentar do nípel 1 (n1) para a segunda luva alongada (L2), (ponto 4 ao ponto 5). Da segunda luva alongada (L2) até o nípel usinado (nu) não há variação significativa, embora ocorra o aumento da velocidade, (ponto 5 ao ponto 7). A partir do nípel usinado (nu) até o corpo do cone a velocidade decresce. A perda de velocidade na transmissão calculada pela impedância é de 20,54% para o DPL e 26,60% para o DPL com adaptações. A diferença entre os DPL's é de 6,06%.

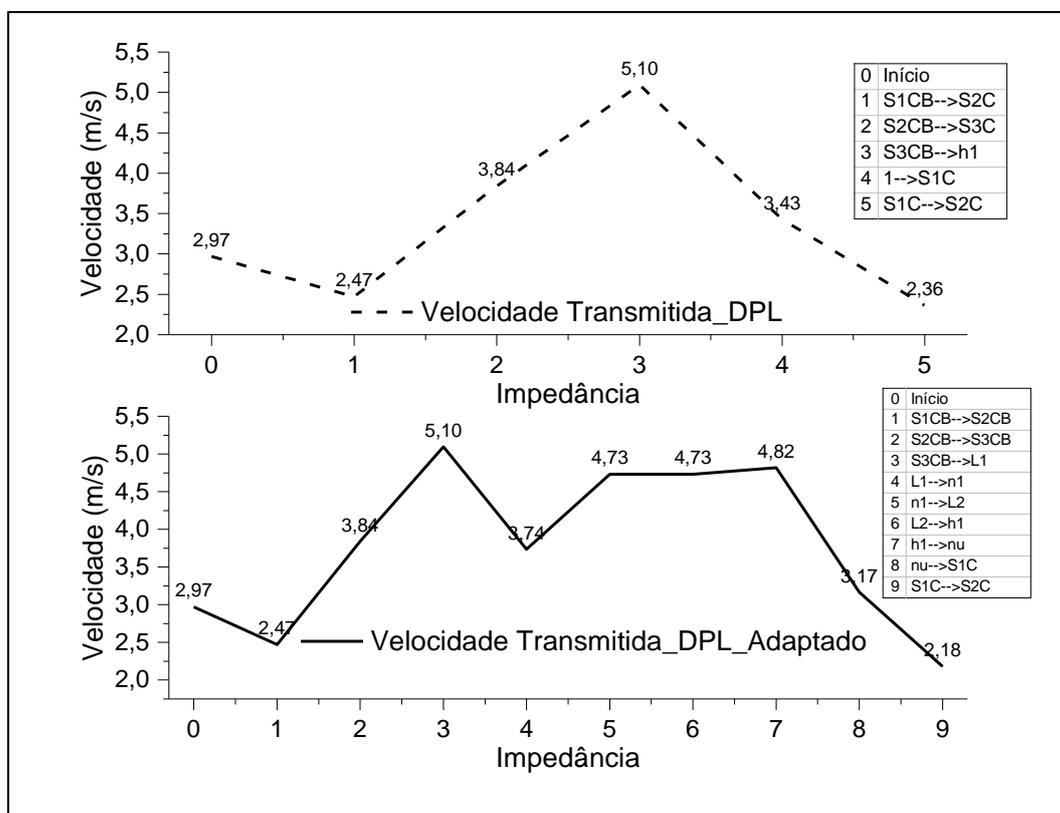


Figura 4.9 – Tráfego da velocidade impedância nos DPL e DPL adaptado para o ensaio

4.2.1.2 CONCLUSOES SOBRE A IMPEDÂNCIA DO DPL

Foram feitas duas experiências para o exame da impedância: a comparação entre os registros de força anotados para os sensores próximos ao topo e cone e comparados com a força de impedância calculada no mesmo trecho, vista na seção 4.2.1, e a comparação do tráfego de impedância para força e velocidade entre o DPL normalmente composto e o DPL que foi adaptado para receber sensores, mostrada na seção 4.2.2.

No primeiro caso é possível afirmar que, de modo geral, a impedância afeta o tráfego tanto da velocidade quanto da força. Em relação à força foi possível medir os picos de força em dois sensores, topo e cone, com perda de 35,70% da força registrada no topo. Para o mesmo trecho o cálculo da força de impedância apresentou uma diferença entre o topo e o cone de 31,09%. A diferença entre o medido e calculado foi de 4,61%. Para tal diferença pode ter sido decisiva a geometria dos nípeis.

A simulação feita para comparar os efeitos da geometria do DPL adaptado para o ensaio e o DPL que não sofreu adaptações mostrou que o DPL adaptado tem perda na transmissão de força e velocidade, comparado ao DPL sem adaptações de 4,6% para força de impedância e de 6,06% para a velocidade.

4.2.2 AVALIAÇÃO DE REGISTROS TÍPICOS DE FORÇA E VELOCIDADE

Foram selecionados dois registros para análise do comportamento de força, velocidade, penetração e energia medidas no DPL, em função da penetração permanente do cone do DPL: de 23 mm e 3 mm. A seleção contemplou um sinal com a maior penetração e outro com a menor penetração registrado no ensaio, entre os 50 registros anotados na Tabela A.1. A seguir é apresentada a avaliação para cada registro

4.2.2.1 AVALIAÇÃO DO SINAL COM PENETRAÇÃO PERMANENTE DE 23 mm

A Fig. 4.10 é referente a uma penetração de 23 mm que mostra a evolução da força, velocidade de partícula, penetração e energia medida pelo método EFV. Observa-se, nitidamente, que o martelo repica mais três vezes além do primeiro impacto na cabeça de bater. Outro fato observável é o tempo para os quais as ondas de velocidade e força zeram (± 23 ms). Nota-se, também, uma proporcionalidade, de forma, entre a energia consumida na penetração e a penetração permanente e trajetória, assim como não há proporcionalidade entre força e

velocidade. A penetração é diretamente proporcional à energia entregue às hastes do DPL. O ponto máximo de força é de 16 kN e a velocidade atinge 2,18 m/s.

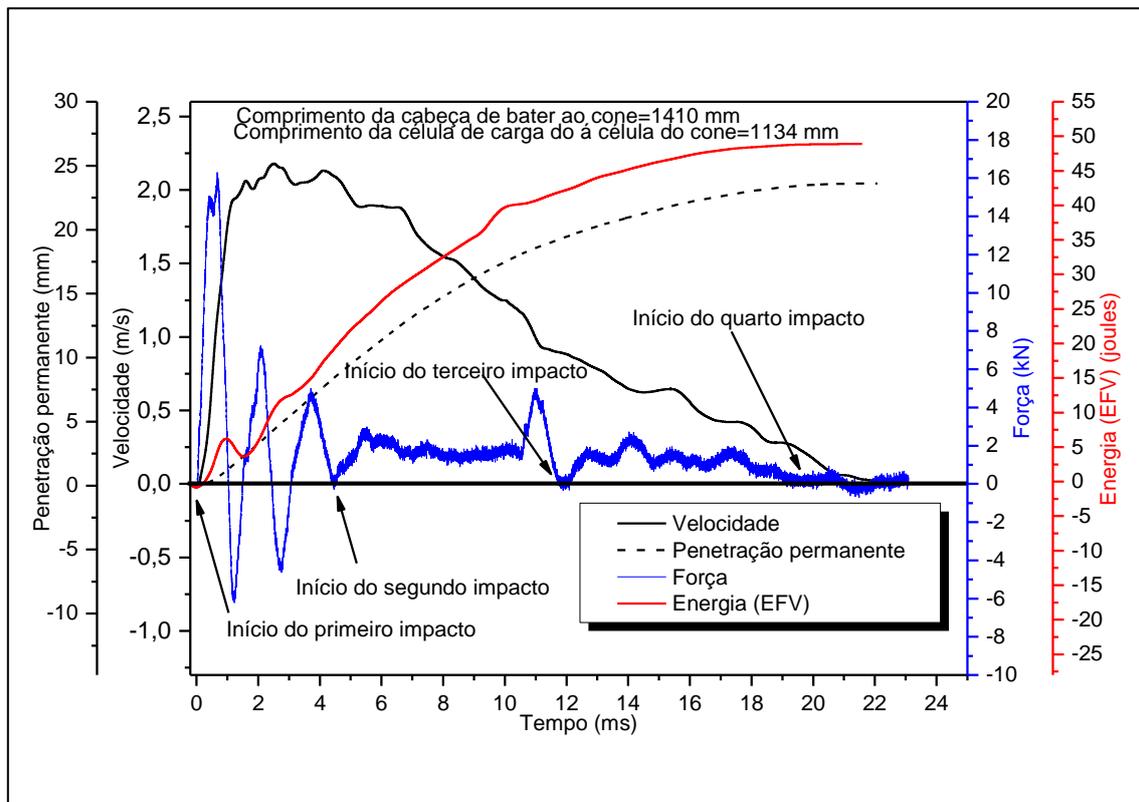


Figura 4.10 – Evolução da energia, força, velocidade e penetração a partir dos dados coletados nas células de carga e acelerômetros para a penetração de 23 mm

AVALIAÇÃO DOS REGISTROS ENTRE O PRIMEIRO E SEGUNDO IMPACTOS PARA PENETRAÇÃO PERMANENTE DE 23 mm

As Fig. 4.11 mostra com maior detalhamento o primeiro e segundo impactos, uma aproximação da Figura 4.10 no domínio de tempo de 0 a 6 ms. O deslocamento do cone do DPL (penetração permanente), no trecho selecionado, continua em ascensão e a evolução da energia é proporcional ao deslocamento. Embora a evolução da energia seja sensível aos impactos e reflexões das conexões, isso não se detecta na evolução da penetração permanente, nesse trecho.

No tempo correspondente $2l/c$, onde l é o comprimento do sensor do topo até o sensor na cabeça do cone, pontos A e B. Observa-se a chegada reflexão da onda de compressão, que tem origem no aumento da impedância do cone do DPL, com uma pequena queda e logo a seguir uma ascendente (pontos B, C e D) refletindo a geometria do cone. No trecho CD, a força aumenta, mas a velocidade mantém-se estabilizada, lembrando que a relação de impedância entre o cone e o nípel, isto é, entre a seção que recebe a onda de compressão (cone) e a seção de entrada

de onda (nível) é bem maior que entre o nível e a haste, por exemplo. A força cai, bruscamente, até ao ponto E de tração na haste do DPL e depois passa de tração a compressão até o ponto F, de compressão a tração até o ponto G, de tração a compressão até H e de compressão até o ponto I, quando começa o segundo impacto. A penetração do cone atinge 8,38 mm até o segundo impacto.

A velocidade não mantém proporcionalidade com a força registrada, pontos A e J. A partir do ponto J e até o ponto K a velocidade permanece quase constante, embora a penetração e energia apresentem uma taxa de crescimento positiva quase linear.

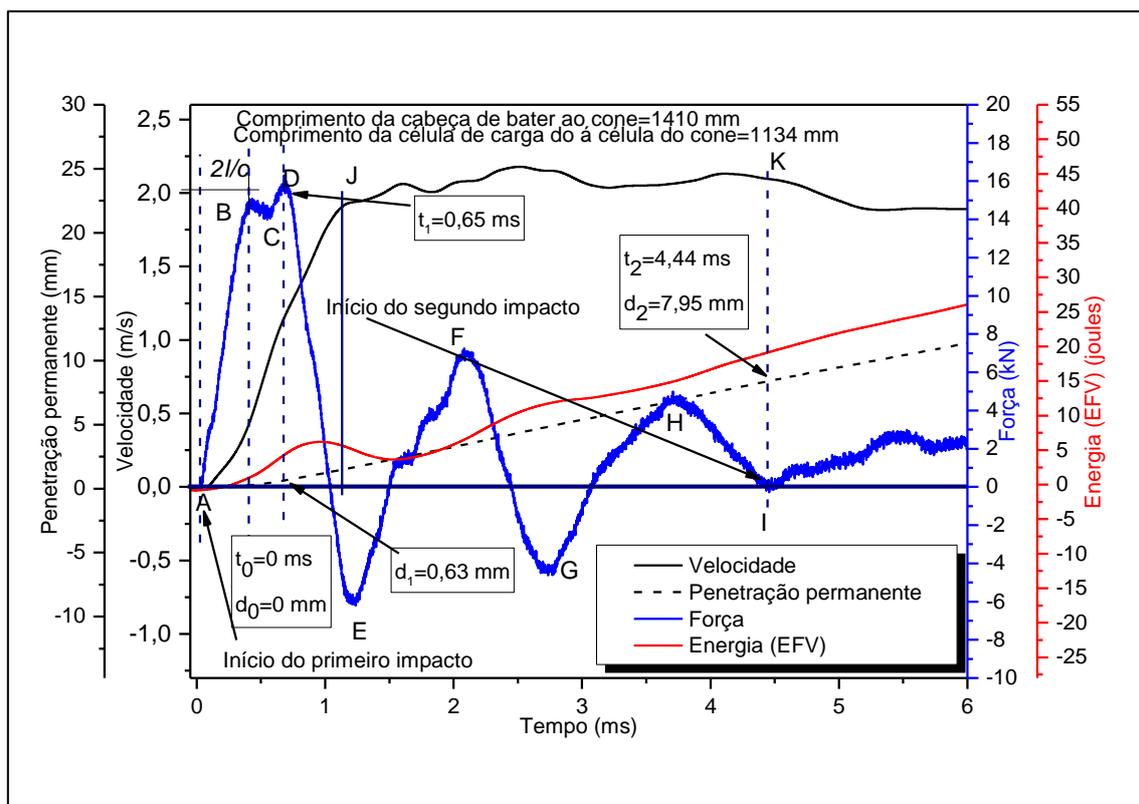


Figura 4.11 – Evolução da energia, força, velocidade e penetração de 23 mm do primeiro até o segundo impacto

A velocidade do martelo é igual à velocidade do topo da composição do DPL até que a força se anule, quando, então, é refletida por efeito da tração na ponta do cone. Segundo Cavalcante (2002), quando a onda de tração atinge o topo, a composição de hastes, em velocidade descendente, sofre uma puxada para baixo, desligando-se do martelo.

É possível calcular a velocidade média do deslocamento do martelo com as medidas calculadas ponto a ponto do deslocamento e considerando os valores do ponto onde inicia o descolamento do martelo. Extraído do gráfico da Figura 4.11, tem-se que:

$$v_{m\u00e9dia_at\u00e9_segundo_impacto} = \frac{d_2 - d_1}{t_2 - t_1} = \frac{7,95 - 0,63}{4,44 - 0,65} = \frac{7,32}{3,79} = 1,93 \text{ m/s} \quad (4.1)$$

Fica evidenciado que embora o martelo do DPL, no intervalo considerado, fique descolado da cabe\u00e7a de bater (D at\u00e9 I), a velocidade de part\u00edcula mant\u00e9m-se alta e quase constante, como geometricamente se percebe no gr\u00e1fico da Figura 4.11, e isso resulta em um deslocamento quase linear do conjunto da haste. Baseado ns resultados espelhados na Figura 4.11, pode-se estimar a velocidade de impacto (v_i) no segundo impacto do martelo, com base nas equa\u00e7\u00f5es da Mec\u00e2nica. Logo, supondo o deslocamento como queda livre e com os valores anotados no gr\u00e1fico, tem-se a velocidade inicial (v_0):

$$d_3 - d_2 = v_0 \times (t_3 - t_2) + \frac{9,806(t_3 - t_2)^2}{2} \quad \therefore v_{0_segundo_impacto} = 1,91 \text{ m/s} \quad (4.2)$$

A velocidade no segundo impacto pode ser calculada como:

$$v_{impacto} = v_0 + \frac{g(\Delta t)}{2} \quad (4.3)$$

$$v_{segundo_impacto} = 1,91 + \frac{9,806(t_3 - t_2)}{2} = 1,95 \text{ m/s}$$

Cavalcante (2002) estima a varia\u00e7\u00e3o da velocidade de part\u00edcula no topo da haste com base na equa\u00e7\u00e3o de Fairhurst (1961), tomando a rela\u00e7\u00e3o de imped\u00e2ncia entre a haste e a cabe\u00e7a de bater. Dessa forma tem-se a Eq. 4.3:

$$v_{haste} = v_{impacto} \times \left(\frac{1}{1+r} \right) \quad (4.4)$$

A transmiss\u00e3o da velocidade, no DPL utilizado para o ensaio, conforme visto em se\u00e7\u00e3o anterior (4.2.1.1) j\u00e1 fora feita o c\u00e1lculo de r (rela\u00e7\u00e3o da \u00e1rea que incide pela \u00e1rea que transmite a velocidade de part\u00edcula). Reitera-se que para a cabe\u00e7a de bater foram consideradas tr\u00eas \u00e1reas de incid\u00eancia e transmiss\u00e3o (S1CB, S2CB e S3CB), detalhadas na Figura 4.7 (a). Desse modo, a tentativa foi, apesar da geometria do DPL, aumentar a acur\u00e1cia da velocidade calculada com a registrada. A Tab. 4.3 apresenta os valores da velocidade transmitida da cabe\u00e7a de bater at\u00e9 os sensores, considerando a velocidade do segundo impacto:

Tabela 4.3 Valores da velocidade na transmissão desde a cabeça de bater até o sensor do topo do cone no segundo impacto

Transmissão (área incidente/ área transmitida)	Valor de r	Velocidade transmitida calculada
Cabeça de bater	-----	Velocidade de impacto = 1,95 m/s
S1CB --> S2CB	1,40	Vt1=0,81 m/s
S2CB --> S3CB	0,29	Vt2=0,63 m/s
S3CB --> Luva 1	0,51	Vt3=0,42 m/s
Luva 1 --> Nípel 1 (usinado)	1,44	Vt4=0,17 m/s
Nípel 1--> Luva 2	0,69	0,10
Luva2 --> Nípel 2 (Acelerômetros instalados)	1,73	0,06

A medida da velocidade, pouco antes do segundo impacto é 2,08 m/s que somada a última velocidade calculada na transmissão da cabeça de bater até os sensores (vt4=0,06 m/s) resulta em 2,14 m/s. O registro aponta como velocidade máxima 2,18 m/s. A diferença pode ser atribuída à geometria da cabeça de bater. Essa diferença representa -1,8% do valor do registro e, até o segundo impacto, pode-se afirmar que a hipótese do martelo em queda livre é adequada para o trecho analisado.

AVALIAÇÃO DOS REGISTROS ENTRE O SEGUNDO E TERCEIRO IMPACTOS PARA PENETRAÇÃO DE 23 mm

A Fig. 4.12, mostra os registros de força, velocidade de partícula, penetração e energia para a parte final do sinal de força do segundo ao quarto impacto. Observa-se, no trecho entre o segundo e terceiro impactos, pontos A e B, que a velocidade de partícula decresce quase linearmente, enquanto a penetração e energia continuam em ascensão. A velocidade média de partícula no trecho é calculada a seguir:

$$v_{\text{média_terceiro_impacto}} = \frac{d_3 - d_2}{t_3 - t_2} = \frac{19,36 - 7,95}{11,90 - 4,44} = \frac{11,41}{7,46} = 1,53 \text{ m/s}$$

Logo, supondo o deslocamento como queda livre e com os valores anotados no gráfico, tem-se a velocidade inicial (v_0):

$$d_3 - d_2 = v_0 \times (t_3 - t_2) + \frac{9,806(t_3 - t_2)^2}{2} \quad \therefore v_0_{\text{terceiro_impacto}} = 1,49 \text{ m/s}$$

A velocidade do terceiro impacto pode ser calculada como:

$$v_{\text{terceiro_impacto}} = 1,49 + \frac{9,806(4,44 - 0,65)}{2} = 1,57 \text{ m/s}$$

A Tab. 4.4 apresenta os valores da velocidade transmitida da cabeça de bater até os sensores, considerando a velocidade do terceiro impacto.

Tabela 4.4 Valores da velocidade na transmissão desde a cabeça de bater até o sensor do topo do cone no terceiro impacto para a penetração de 23 mm

Transmissão (área incidente/ área transmitida)	Valor de r	Velocidade transmitida calculada
Cabeça de bater	-----	Velocidade de impacto = 1,57 m/s
S1CB --> S2CB	1,40	Vt1=0,65 m/s
S2CB --> S3CB	0,29	Vt2=0,51 m/s
S3CB --> Luva 1	0,51	Vt3=0,33 m/s
Luva 1 --> Nípel 1 (usinado)	1,44	Vt4=0,14 m/s
Nípel --> Luva 2	0,69	Vt5=0,081
Luva 2 --> Nípel 2	1,73	Vt6==0,03

A medida da velocidade, pouco antes do terceiro impacto é 0,90 m/s que somada a última velocidade calculada na transmissão da cabeça de bater até os sensores ($v_{t4}=0,03$ m/s) resulta em 0,93 m/s. O registro aponta como velocidade máxima 0,88 m/s. A diferença representa entre as velocidades calculada e registrada é de 5,3%. Pode-se afirmar que a hipótese do martelo em queda livre não é adequada para o trecho analisado. Nota-se que, embora o impacto ocorra, este não é suficiente para alterar o decrescimento da velocidade.

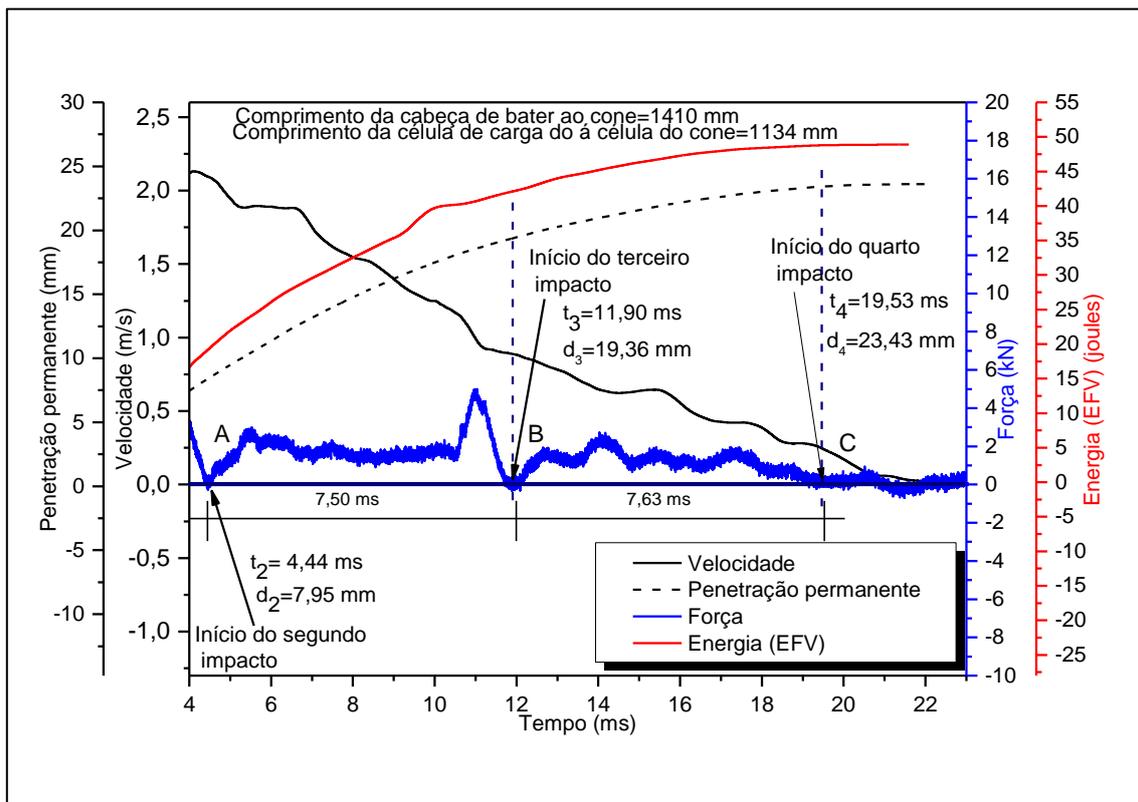


Figura 4.12 – Evolução da energia, força, velocidade e penetração de 23 mm do segundo até o quarto impacto

AVALIAÇÃO DOS REGISTROS ENTRE O TERCEIRO E QUARTO IMPACTOS PARA PENETRAÇÃO DE 23 mm

Observa-se na Figura 4.12, no trecho entre o terceiro e quarto impactos, pontos B e C, que a velocidade de partícula continua a decrescer quase linearmente, enquanto a penetração e energia continuam em ascensão. A velocidade média de partícula no trecho é calculada a seguir:

$$v_{\text{média_quarto_impacto}} = \frac{d_4 - d_3}{t_4 - t_3} = \frac{23,43 - 19,36}{19,53 - 11,90} = \frac{4,07}{7,63} = 0,53 \text{ m/s}$$

Logo, supondo o deslocamento como queda livre e com os valores anotados no gráfico, tem-se a velocidade inicial (v_0):

$$d_3 - d_2 = v_0 \times (t_4 - t_3) + \frac{9,806(t_4 - t_3)^2}{2} \quad \therefore v_0 \text{_terceiro_quarto} = 0,50 \text{ m/s}$$

A velocidade do terceiro impacto pode ser calculada como:

$$v_{\text{quarto_impacto}} = 0,50 + \frac{9,806(t_4 - t_3)}{2} = 0,57 \text{ m/s}$$

A Tab. 4.5 apresenta os valores da velocidade transmitida da cabeça de bater até os sensores, considerando a velocidade do quarto impacto.

Tabela 4.5 Valores da velocidade na transmissão desde a cabeça de bater até o sensor do topo do cone no quarto impacto

Transmissão (área incidente/ área transmitida)	Valor de r	Velocidade transmitida calculada
Cabeça de bater	-----	Velocidade de impacto = 0,57 m/s
S1CB --> S2CB	1,40	Vt1=0,24 m/s
S2CB --> S3CB	0,29	Vt2=0,18 m/s
S3CB --> Luva 1	0,51	Vt3=0,12 m/s
Luva 1 --> Nípel 1 (Sensores instalados)	1,44	Vt4=0,05 m/s
Nípel --> Luva 2	0,69	Vt5=0,03
Luva 2 --> Nípel 2	1,73	Vt6==0,01

A medida da velocidade, pouco antes do terceiro impacto é 0,27 m/s que somada a última velocidade calculada na transmissão da cabeça de bater até os sensores (vt4=0,01 m/s) resulta em 0,28 m/s. O registro aponta no ponto de impacto a velocidade de 0,24 m/s. A diferença entre a velocidade calculada e a registrada representa 11,11% do valor do registro no quarto impacto. Pode-se afirmar que a hipótese do martelo em queda livre não é adequada para o trecho analisado.

A Tab. 4.6 mostra a evolução da penetração, velocidade média, energia medida (EFV) e ainda a acumulação da energia medida (EFV) e da penetração nos trechos analisados. Nota-se que o trecho do primeiro impacto até a força máxima é pouco significativo para a penetração e coincide com velocidade média, também pequena. Com o aumento da velocidade média no trecho entre o primeiro e segundo impactos aumenta-se a penetração que alcança 1/3 da penetração total. No trecho entre o segundo e terceiro impactos do martelo, a velocidade média cai, mas isso não reflete na penetração pois este é o trecho para o qual a penetração apresenta o maior valor. No último trecho a analisado a velocidade média decai, embora a penetração represente quase 18% da penetração total, nesse trecho. Pode-se afirmar que a transmissão do primeiro golpe tem efeito inercial para penetração, ainda que a velocidade decresça a penetração aumenta. Em relação à energia medida (EFV), esta mantém proporcionalidade com a penetração.

Tabela 4.6 – Tempo de tráfego da velocidade média de partícula, energia (EFV) e penetração do cone por trecho dos impactos do martelo do DPL

Pontos analisados	Tempo (ms)	Penetração (mm)	Velocidade média (m/s)	Energia (EFV) (Joules)	Energia acumulada (%)	Penetração acumulada (%)
1º-Máximo da força	0,65	0,63	0,97	3,90	7,97	2,69
Máximo da força - 2º Impacto	4,44	7,32	1,93	15,29	39,21	33,93
2º - 3º Impactos	7,50	11,41	1,44	23,72	87,68	82,63
3º - 4º Impactos	7,63	4,07	0,34	6,03	100	100
Totais	19,53	23,43	----	48,94	--	--

4.2.2.2 AVALIAÇÃO DOS REGISTROS PARA A PENETRAÇÃO DE 3 mm

A Fig. 4.13 mostra a evolução da força, velocidade de partícula, penetração e energia medida pelo método EFV para uma penetração do cone de 3mm. Há um longo trecho, depois do segundo impacto até zerar, sem descolamento nítido do martelo. Após o pico da velocidade, na descendente, nota-se uma retomada ascendente que o autor atribui ao segundo impacto do martelo. Isso também ocorreu com a penetração de 23 mm, embora pouco notada devido a escala dos sinais. O tempo de primeiro para o segundo impacto diminuiu e o descolamento do martelo é menor para a penetração de 3mm. Uma particularidade observada, é o número de picos que o sinal de força produz antes de entrar em descenso até o ponto zero. Provavelmente esses picos sejam devido ao estado vibracional da haste devido à resistência à penetração da haste no solo.

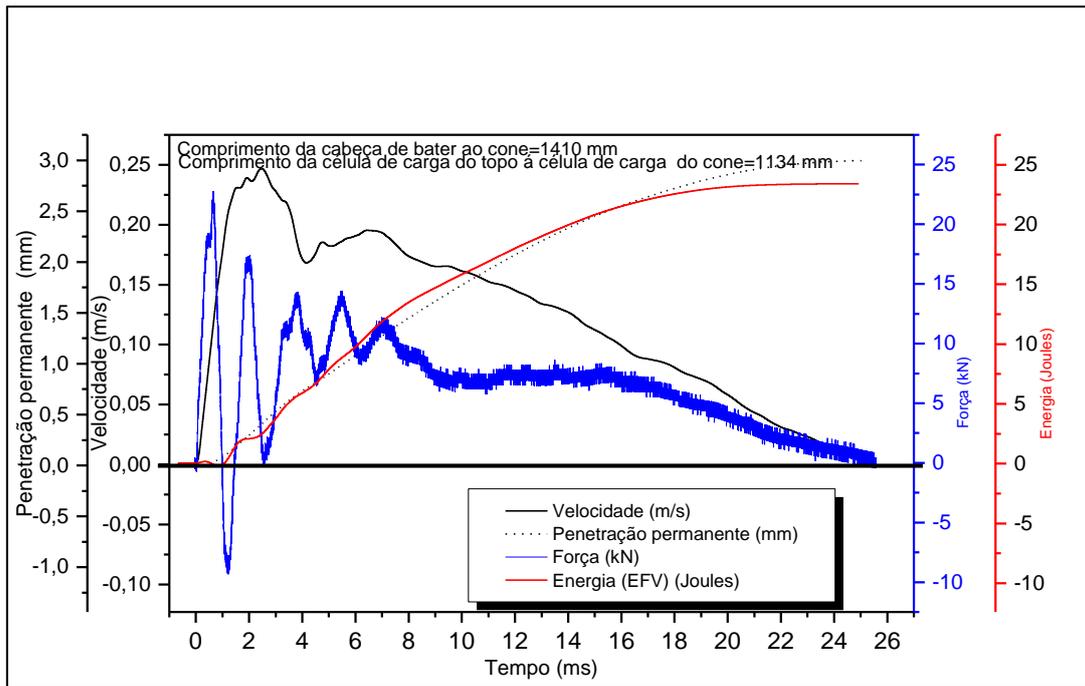


Figura 4.13 – Evolução da energia, força, velocidade e penetração a partir dos dados coletados nas células de carga e acelerômetros para a penetração de 3mm

Na Fig. 4.14, uma aproximação detalhada da figura 4.13, pode-se calcular a velocidade média de modo geométrico e, se observa através dos registros no trecho do primeiro ao segundo impacto que esta velocidade é 0,21 m/s. Assim, a velocidade inicial do martelo, calculada pela formulação da Mecânica, dada a penetração de 0,40 mm e tempo de 1,90 ms, é de 0,20 m/s, e a velocidade de impacto é de 0,22 m/s. O cálculo da velocidade transmitida até os sensores é mostrado na Tab. 4.7

Tabela 4.7 Valores da velocidade na transmissão desde a cabeça de bater até o sensor do topo do cone no segundo impacto para a penetração de 3 mm

Transmissão (área incidente/ área transmitida)	Valor de r	Velocidade transmitida calculada
Cabeça de bater	-----	Velocidade de impacto = 0,22 m/s
S1CB --> S2CB	1,40	Vt1=0,09 m/s
S2CB --> S3CB	0,29	Vt2=0,07 m/s
S3CB --> Luva 1	0,51	Vt3=0,05 m/s
Luva 1 --> Nípel 1 (Sensores instalados)	1,44	Vt4=0,02 m/s
Nípel --> Luva 2	0,69	Vt5=0,01
Luva 2 --> Nípel 2	1,73	Vt6==0,004

A medida da velocidade, pouco antes do terceiro impacto é 0,24 m/s que somada a última velocidade calculada na transmissão da cabeça de bater até os sensores (vt4=0,004 m/s) resulta em 0,244 m/s. O registro de velocidade no ponto 0,25 m/s. Pode-se admitir que, entre o primeiro e segundo impactos, a hipótese do martelo em queda livre é adequada.

Observa-se que o mesmo fenômeno que se verificou na penetração para 23 mm, ocorre, também, para 3mm, isto é ascendência dos registros de penetração e energia proporcionais.

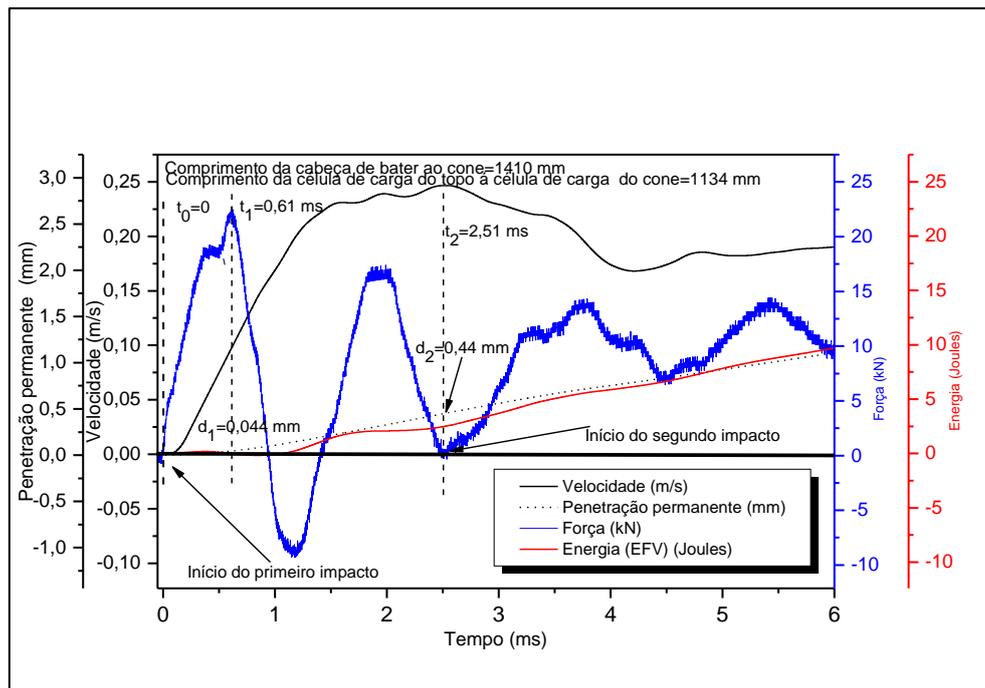


Figura 4.14 – Evolução da energia, força, velocidade e penetração a partir dos dados coletados nas células de carga e acelerômetros para a penetração de 3mm com detalhe do segundo impacto

CONCLUSÕES DA ANÁLISE DAS PENETRAÇÕES DE 23 mm e 3 mm

A Tab. 4.8 apresenta um resumo dos parâmetros oriundos das análises feitas pelo autor para as penetrações permanentes do cone do DPL de 23 mm e 3 mm. Observa-se os valores calculados e medidos para cada penetração da velocidade média, velocidade máxima, a quantidade de movimento ou impulso, da velocidade máxima, da força máxima e da força dinâmica alcançada na ponta do DPL (cone) em função da penetração permanente, além dos registros de penetração permanente e energia total transmitida às hastes.

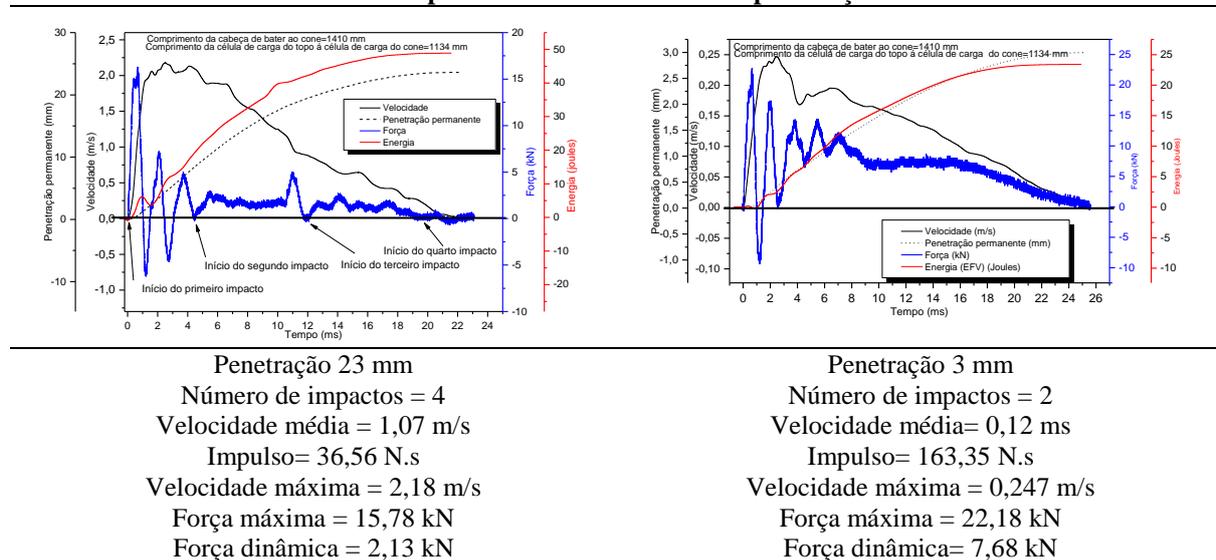
Nota-se a semelhança de forma da velocidade de partícula entre as duas amostras avaliadas, embora as energias totais sejam diferentes. É possível delinear que enquanto a reação do solo é menor para a penetração de 23 mm, esta aumenta mais de quatro vezes, se considerar a variação da quantidade de movimento representada pelo cálculo do impulso (área matemática do produto da força pelo tempo). O DPL assemelha-se a uma estaca cravada, muito mais que o SPT, dado que a geometria da ponta é cônica. Na análise do comportamento da ponta de uma estaca Gonçalves *et al.* (1996) arguiram que as características da onda transmitida e refletida ao solo dependem das condições de contorno abaixo da ponta da estaca. Se a resistência do solo

é pequena, então a velocidade tende a aumentar e a força a diminuir como se verifica na penetração de 23 mm; de modo oposto a velocidade tende a diminuir e a força a aumentar como se verificou na penetração de 3 mm.

Chama a atenção o fato de a penetração de 23 mm apresentar o dobro do número de impactos em relação a penetração de 3 mm. Embora a força na penetração de 3 mm seja maior que na penetração de 23 mm, a energia restituída pelo solo é menor por conta da velocidade que na penetração de 3 mm é menor que em 23 mm. Ainda que ocorra a reflexão de ondas de tração na penetração de 3 mm, esta é diminuta e insuficiente para descolar o martelo do topo da haste a partir do segundo impacto.

A penetração ocorre, em ambos os casos analisados, concomitante à transferência de energia às hastes. Nas duas situações entre o ponto máximo da força e o segundo golpes observa-se que a composição obedece à hipótese de queda livre. Observa-se se em ambos os casos uma trajetória descendente quase constante da penetração. A partir do primeiro impacto a penetração tem comportamento inercial com pouco significado das ondas de tração que ocorrem após o golpe do martelo.

Tabela 4.8 – Resumo dos parâmetros das análises das penetrações de 23 mm e 3 mm



4.2.3 SINAIS ADQUIRIDOS E INTEGRADOS PELO MÉTODO EFV

Os sinais adquiridos para a integração de energia com o método EFV, mostrados na sequência das Fig. 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29 representam grupos típicos, conforme a penetração permanente: para penetração maior que 20 mm; para penetração maior que 11mm e até 20 mm; para penetração de 6 a 10 mm e menor que

5 milímetros. Os sinais foram compilados com mais detalhes na Tabela E.1, anexo a esta tese. Todas as figuras apresentam, além das evoluções da energia medida pelo método EFV e da trajetória da penetração permanente, a posição dos sensores de força e aceleração em referência ao topo da haste e a equivalência da penetração permanente do cone do DPL ($\Delta\rho$) em milímetros.

A escala de energia é mantida de maneira a facilitar a constatação visual das figuras dos sinais que mostram com clareza que a penetração permanente é diretamente proporcional à evolução da energia. Esse comportamento da evolução da energia versus a penetração permanente conduz à primeira constatação: que a perda de energia integrada, necessariamente, tem a participação do atrito lateral a considerar que a penetração da haste do DPL é contínua. Embora, isso ocorra, o atrito lateral, não foi medido nesta tese. De fato, o autor, não viu necessidade da medida de torque pelo fato do método EFV considerar a integração de todas as ondas de força e compressão transmitidas à haste.

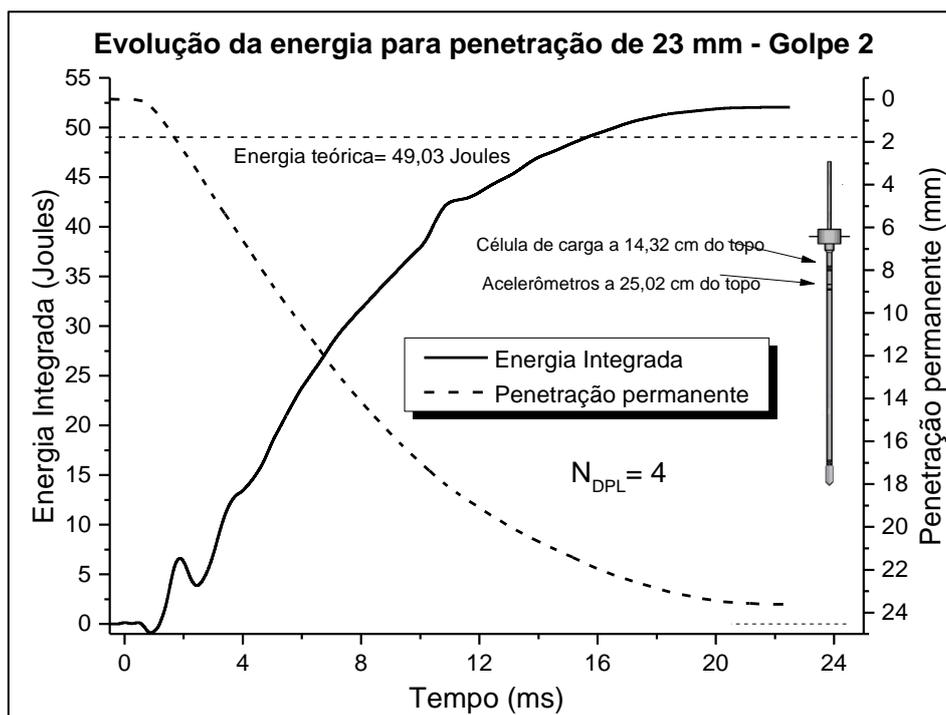


Figura 4.15 – Evolução da energia para penetração permanente - Golpe 2

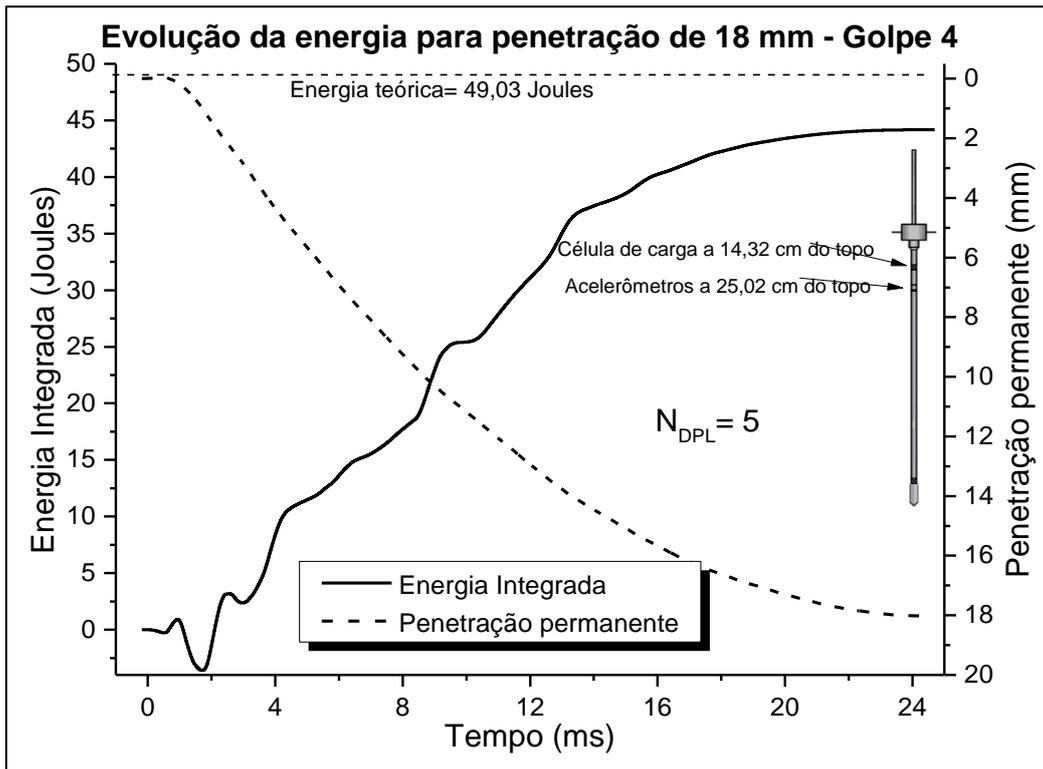


Figura 4.16 – Evolução da energia para a penetração permanente - Golpe 4

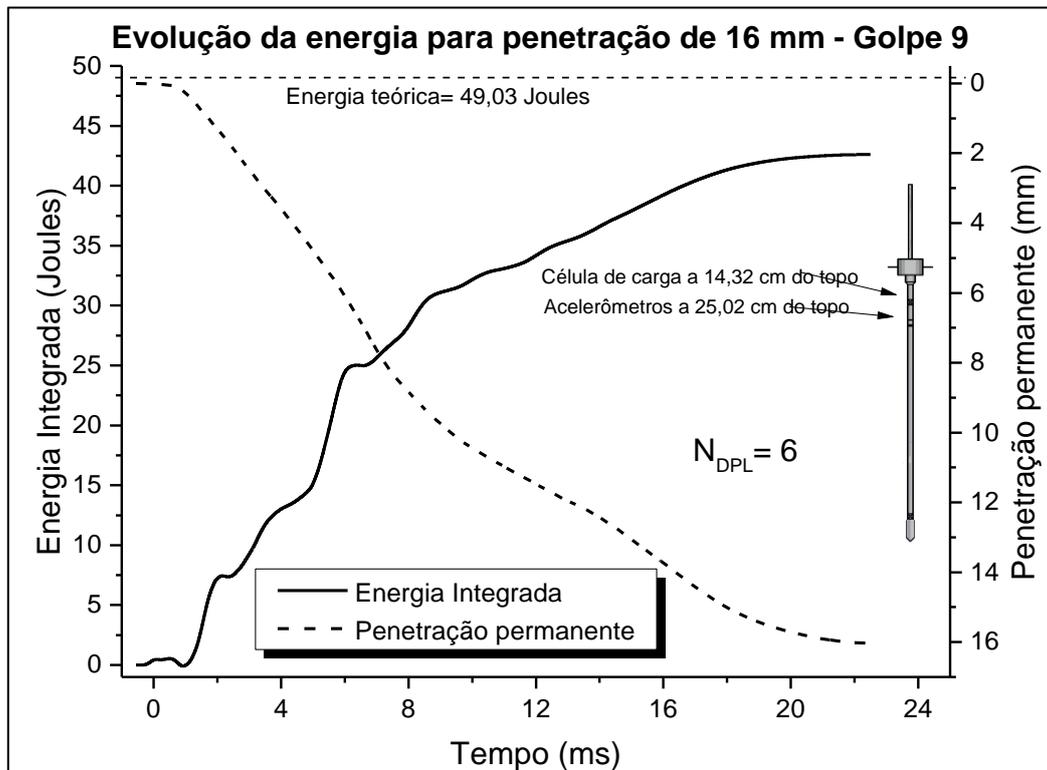


Figura 4.17 – Evolução da energia para a penetração permanente - Golpe 9

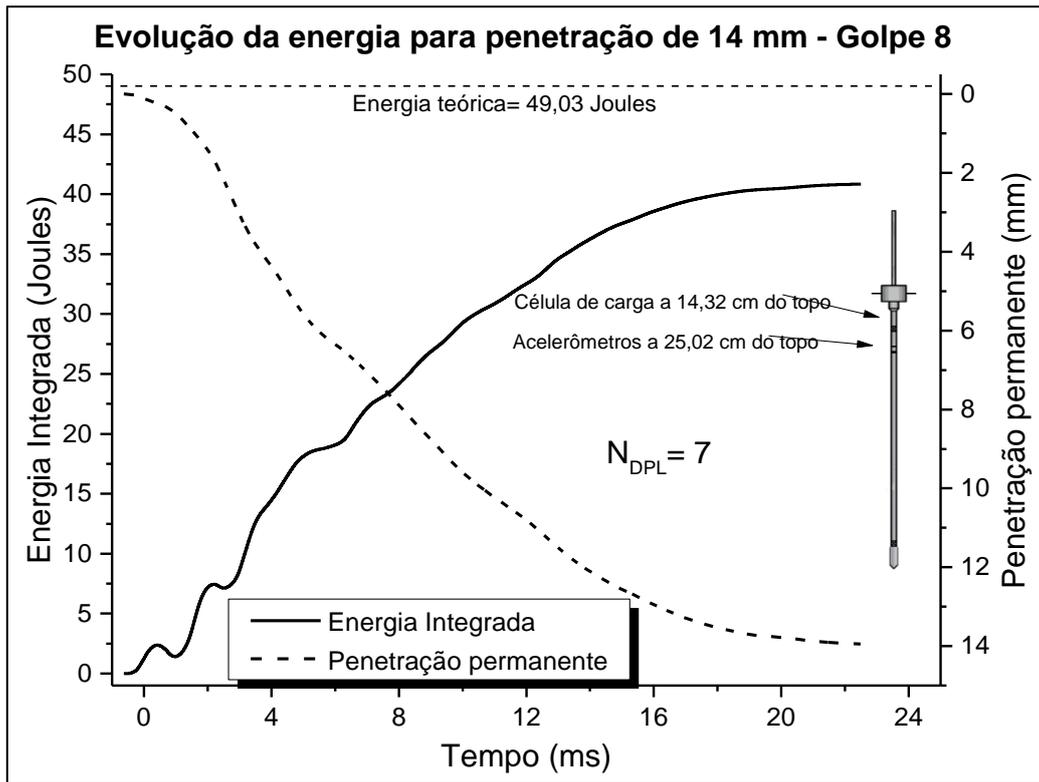


Figura 4.18 – Evolução da energia para a penetração permanente - Golpe 8

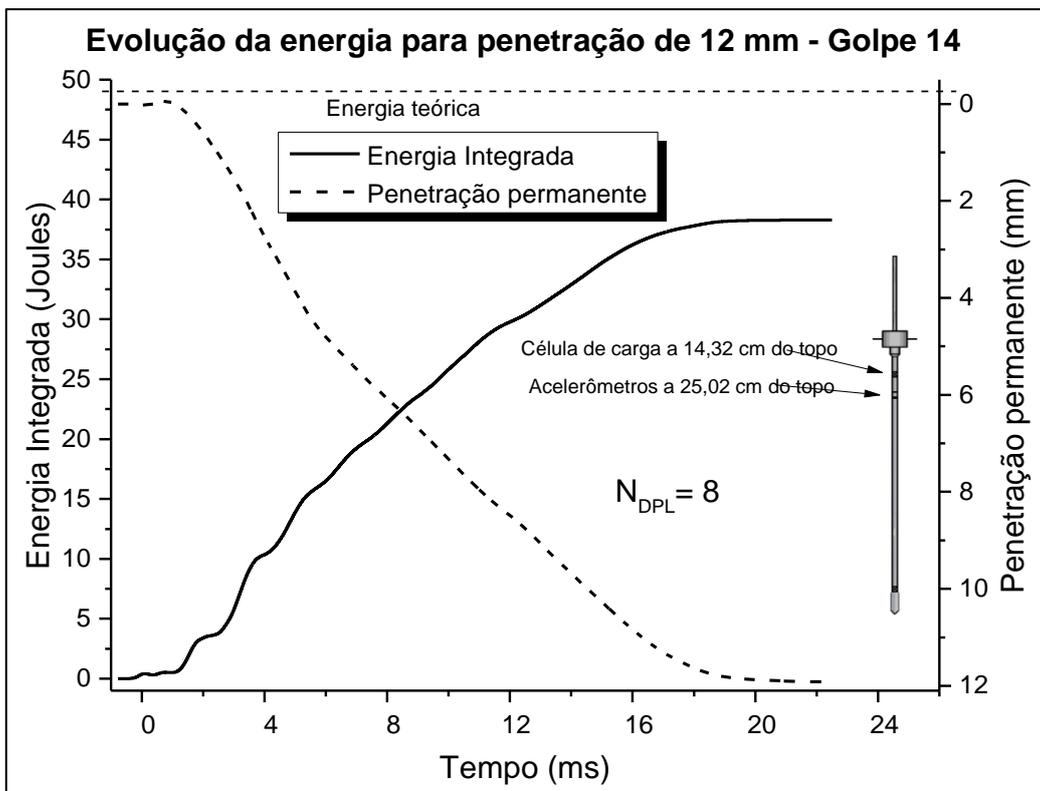


Figura 4.19 – Evolução da energia para penetração permanente - Golpe 14

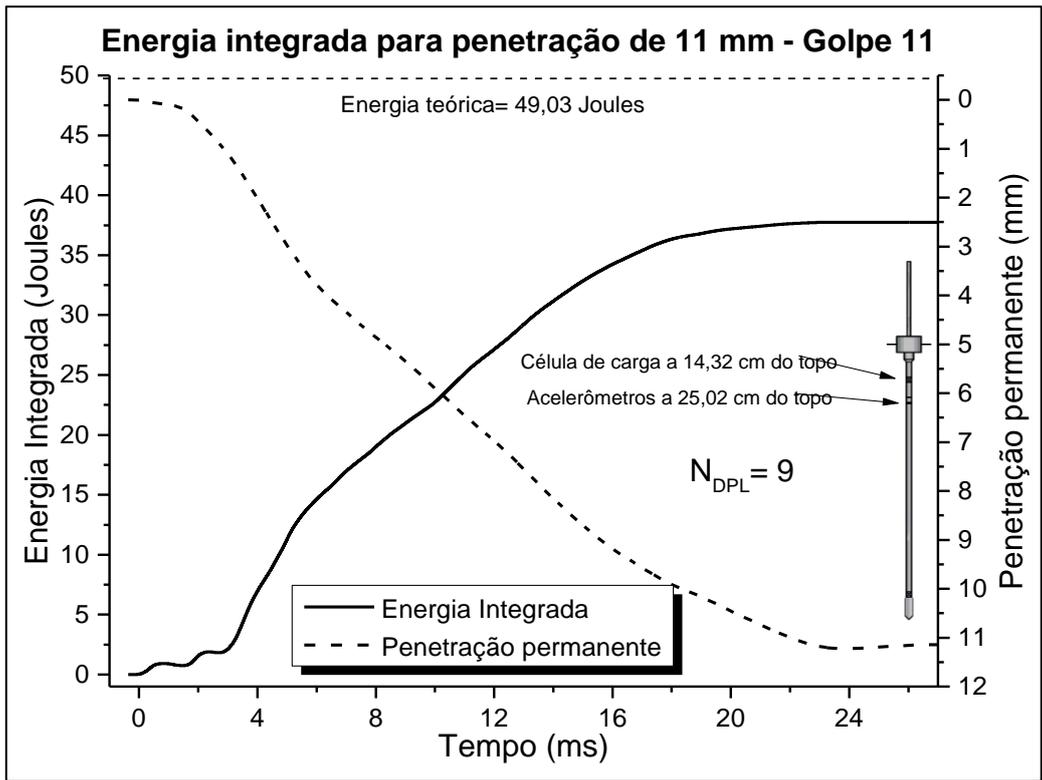


Figura 4.20 – Evolução da energia para a penetração permanente - Golpe 11

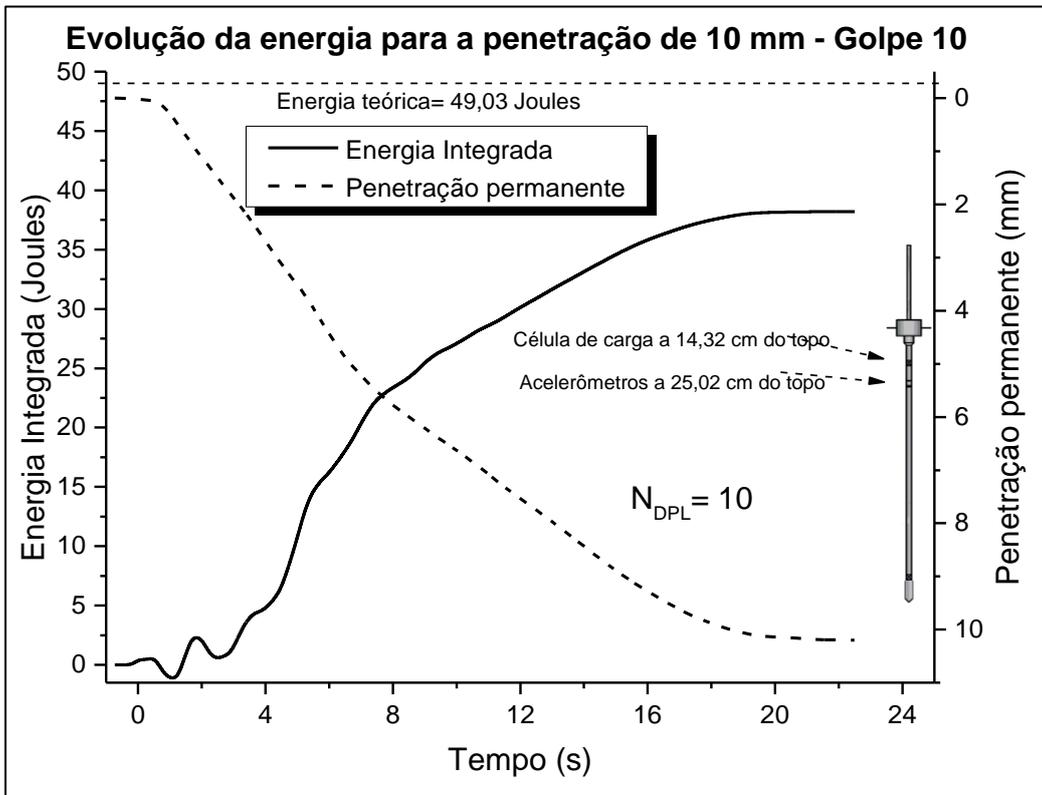


Figura 4.21 – Evolução da energia para penetração permanente - Golpe 10

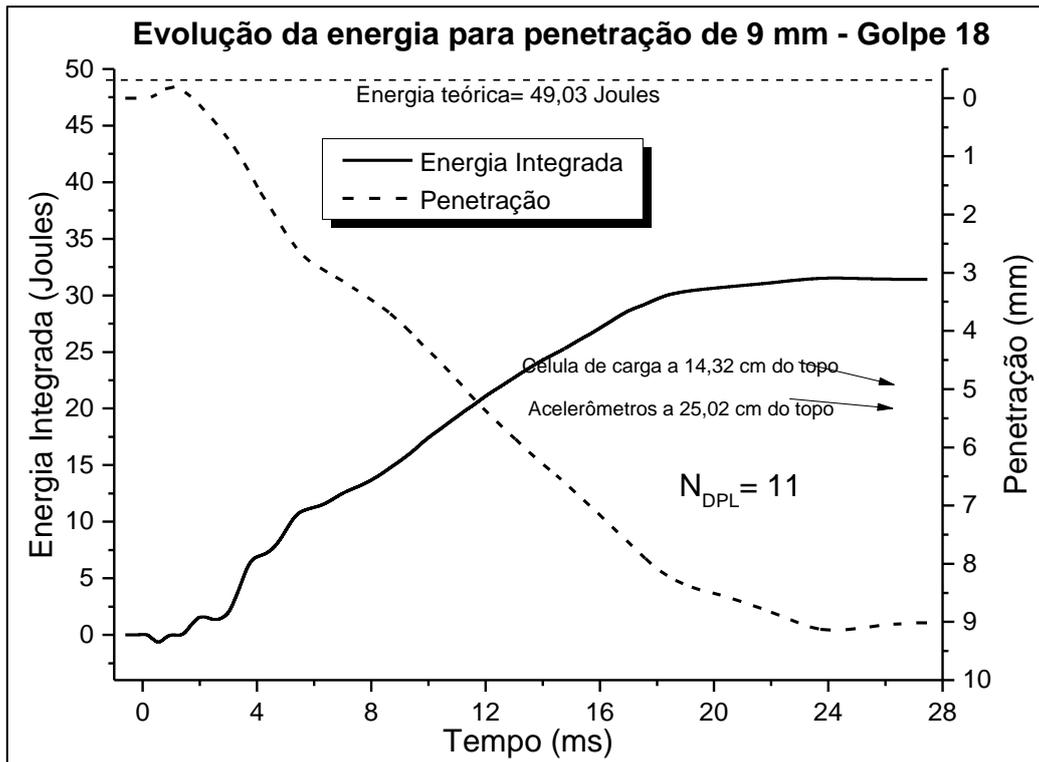


Figura 4.22 – Evolução da energia para a penetração permanente – Golpe 18

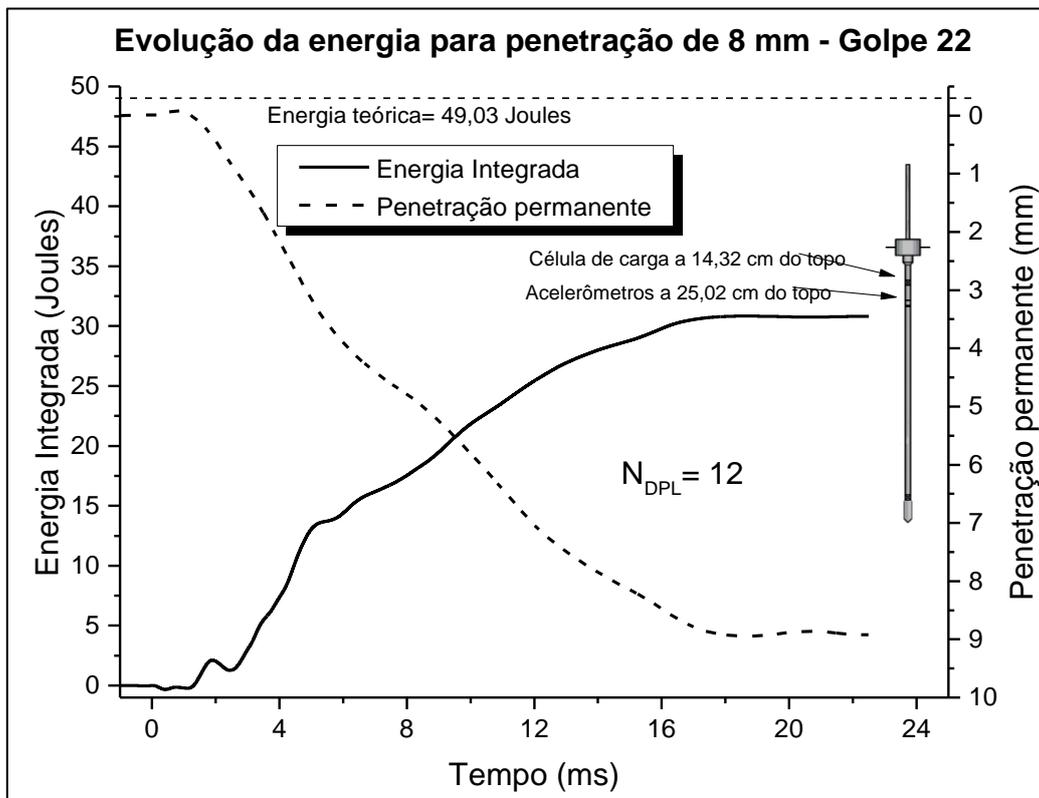


Figura 4.23 – Evolução da energia para a penetração permanente – Golpe 22

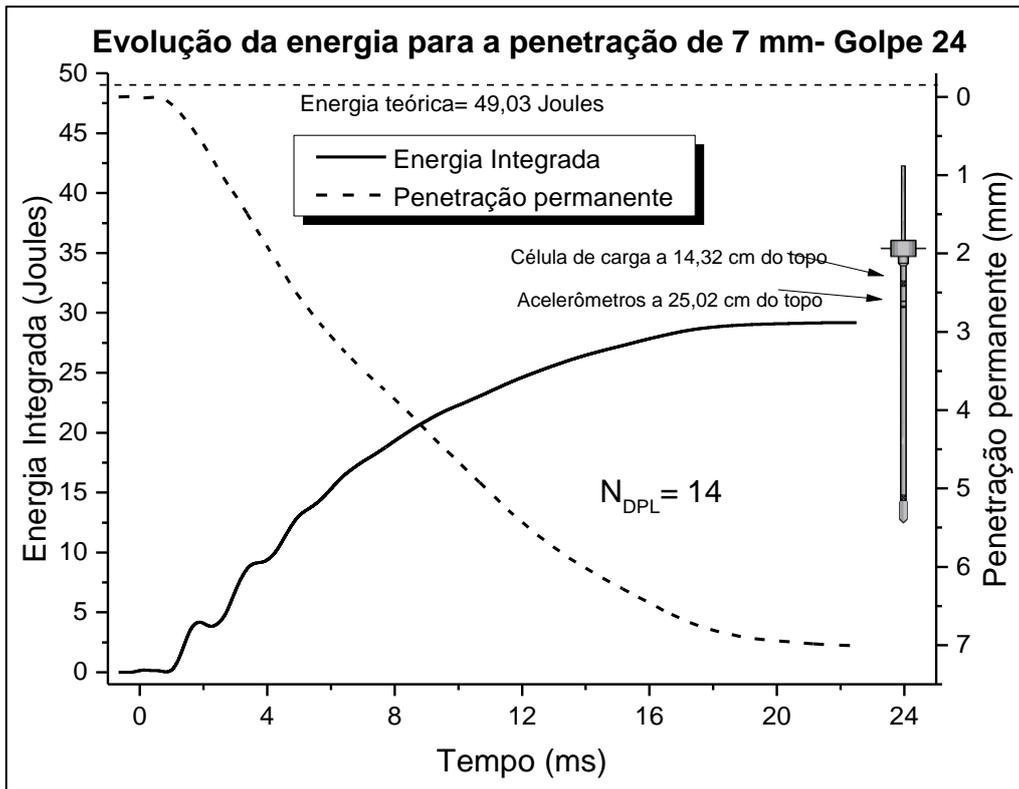


Figura 4.24 – Evolução da energia para a penetração permanente - Golpe 24

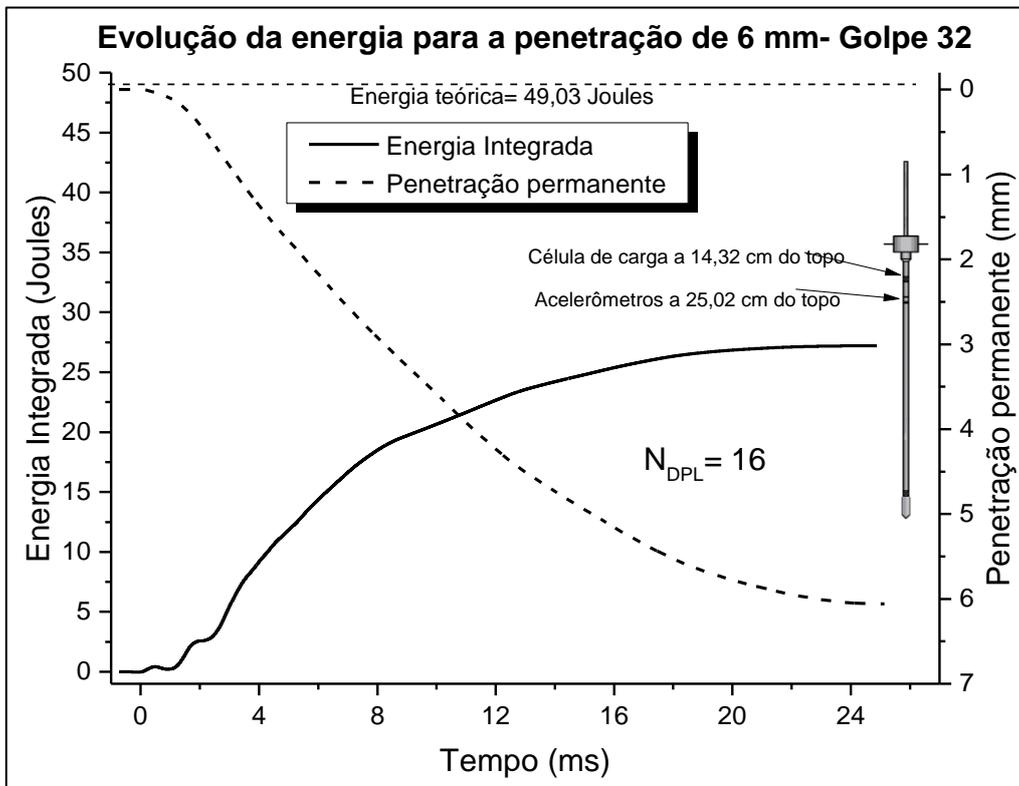


Figura 4.25 – Evolução da energia para a penetração permanente – Golpe 32

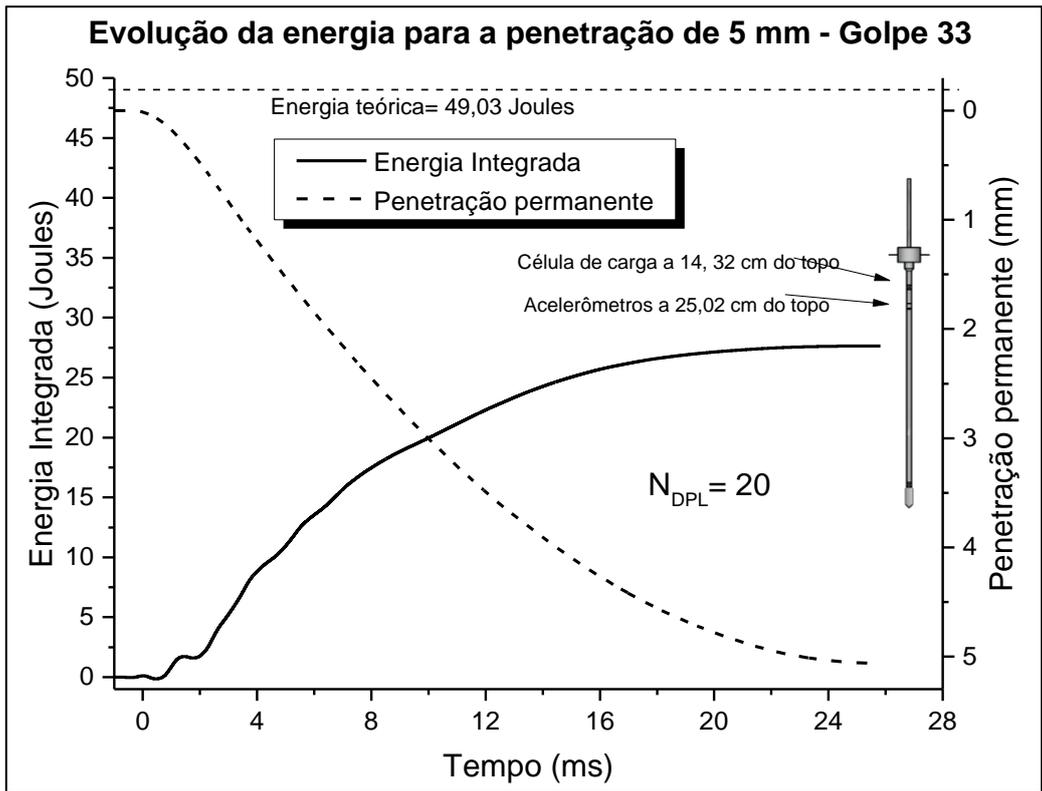


Figura 4.26 – Evolução da energia para a penetração permanente - Golpe 33

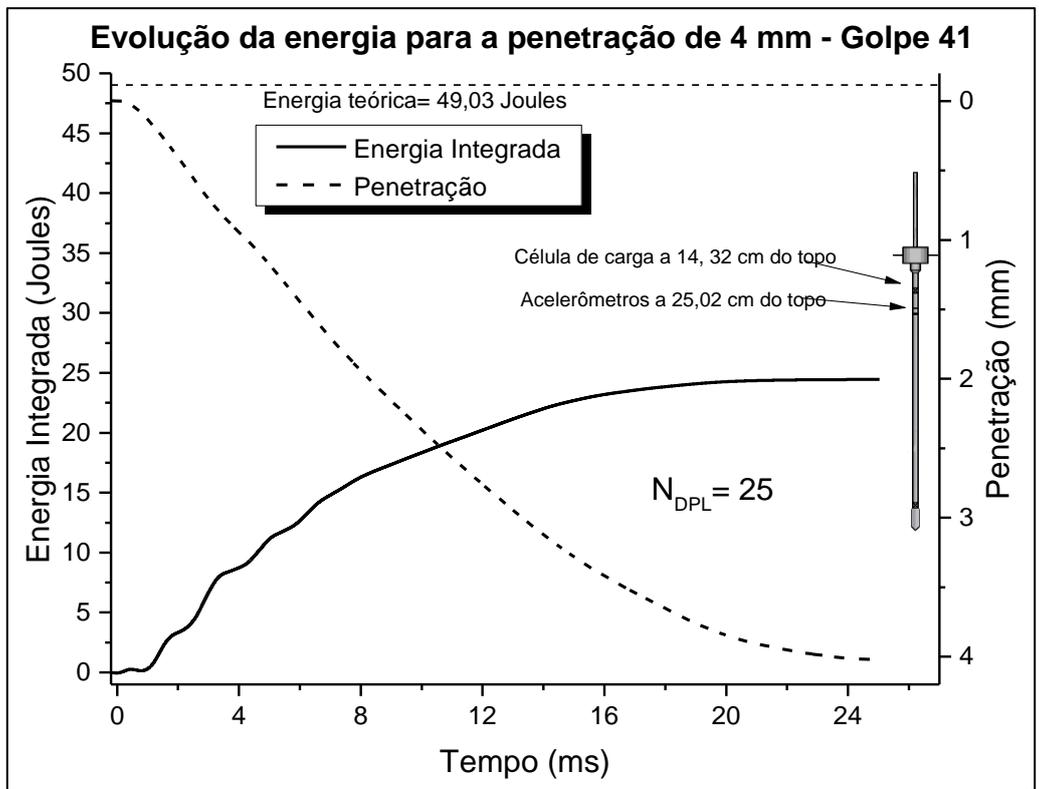


Figura 4.27 – Evolução da energia para a penetração permanente - Golpe 41

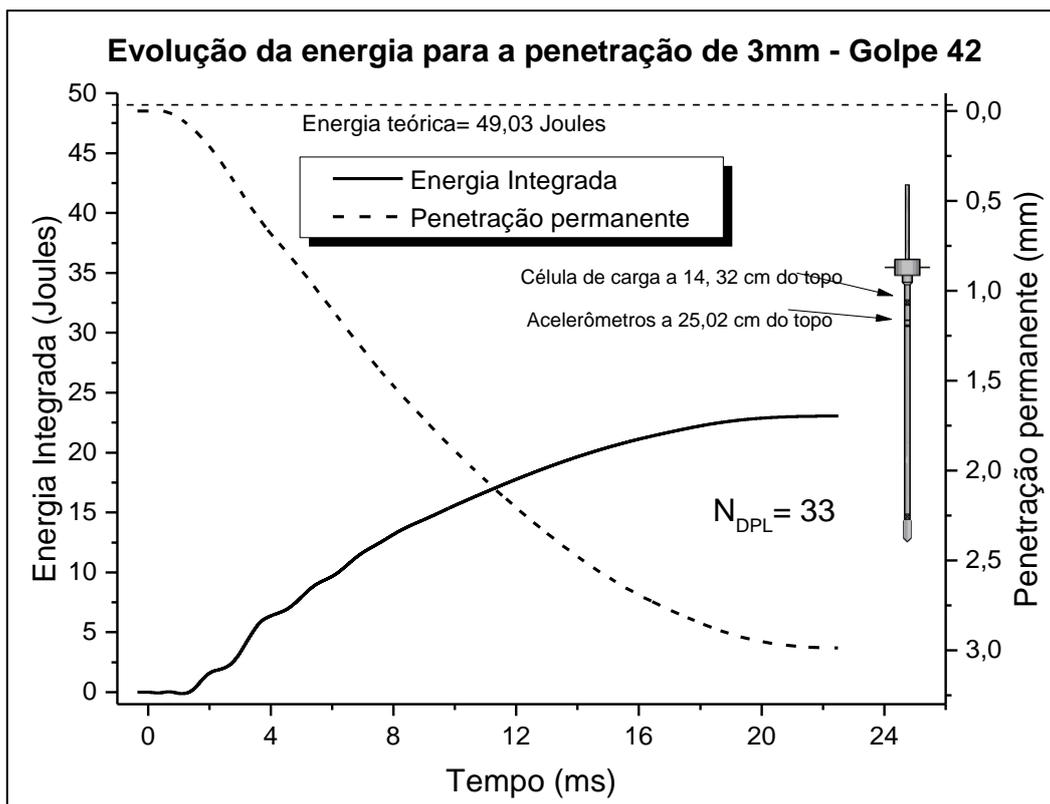


Figura 4.28 – Evolução da energia para a penetração permanente - Golpe 42

4.2.4 ESCOLHA DO FATOR DE EFICIÊNCIA PARA O MARTELO

Odebrecht (2003) descreve que estabeleceu o fator de eficiência do SPT em 0,764, com desvio padrão de 0,036 e que Cavalcante (2002) fixou em 0,761 respectivamente, com desvio padrão de 0,051. Como mostrado na Tab. 4.9, nesta tese, a média para a eficiência do martelo é de 0,635, contudo a variabilidade é muito elevada. O desvio padrão é de 0,127 e o coeficiente de variação de 21%. Isso remete à hipótese que, para o caso do DPL, o fator não seja constante, mas uma variável dependente da penetração permanente do cone do DPL.

A análise que se segue, nesta seção, é saber se a fixação de um fator de eficiência para o DPL é adequada. Para tanto, o fator fixo foi comparado a uma variável em função da penetração permanente ($\Delta\rho$).

4.2.4.1 VARIACÃO DA ENERGIA DO SISTEMA COM O FATOR DE EFICIÊNCIA PARA O MARTELO (η_{DPL}) CONSTANTE

A Fig. 4.28, baseada nos dados apresentados na Tabela E.1, mostra a correlação dos dados das energias do sistema (E.S.), do martelo (E_M) e a energia medida pelo método EFV em relação à penetração permanente ($\Delta\rho$). Além disso, a Figura 4.28 apresenta a variação da energia do

sistema (VES) com a aplicação da Equação 3.7, deduzida no Capítulo 3, e aqui replicada ($VES=[(\eta_{1DPL}(0,50+\Delta\rho)\times M_m\times g)+\eta_2(M_H+M_{cb}+M_{cone})\times g\times\Delta\rho]\times\eta_3$), para a qual o η_{1DPL} aplicado foi de 0,635, conforme Tabela 4.9.

Reitera-se que a energia do sistema (E.S.) é a soma das energias potenciais do martelo e da composição do DPL, para cada golpe; a energia do (E.M) é a energia potencial do golpe do martelo do DPL, também para cada golpe e a energia medida pelo método EFV é o resultado da energia dinâmica apurada, também, para cada golpe. Feita as correlações determinou-se as equações:

$$E.S. = 49,03 + 0,16\Delta\rho \quad (4.8)$$

$$EM = 49,03 + 0,1\Delta\rho \quad (4.9)$$

$$EFV = 20,39 + 1,23\Delta\rho \quad (4.10)$$

$$VES = 31,13 + 0,13\Delta\rho \rightarrow \text{com } \eta_{1DPL} \text{ constante} \quad (4.11)$$

A energia do martelo (E_M), tem o mesmo intercepto que a energia do sistema, a saber que para uma penetração permanente igual a zero somente a altura de queda do martelo seria computada e igualda à energia teórica, i.e, 49,03 Joules. O coeficiente angular, contudo, é diferente entre as energias do martelo e a do sistema por conta do acréscimo das energias potenciais da haste, cabeça de bater e cone. Os dados da variação da energia com o fator de eficiência fixo (η_{1DPL} constante) em 0,635 são mostrados na Tab. A.3.

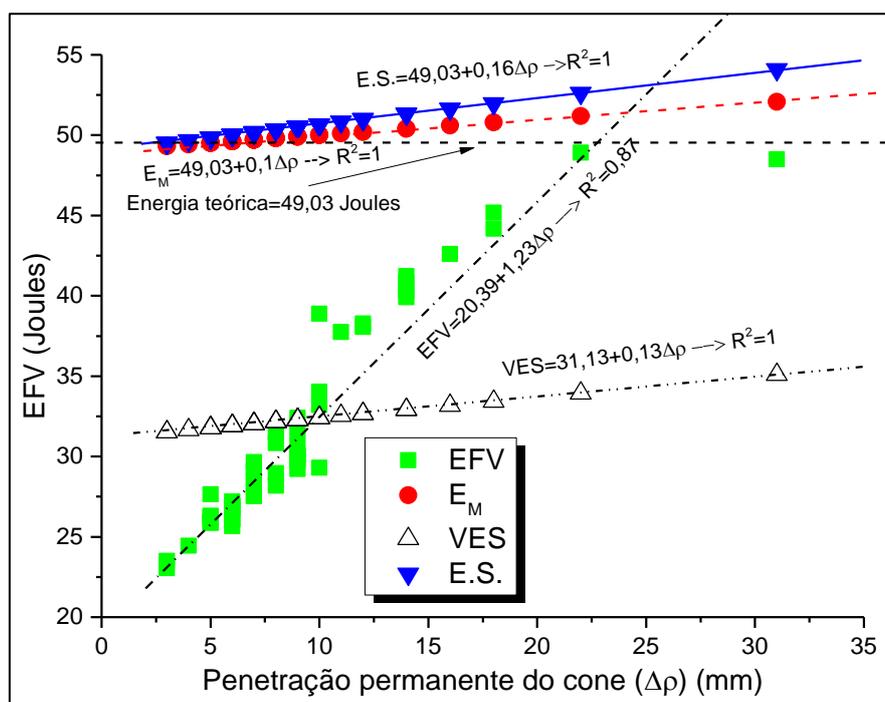


Figura 4.29 – Energia versus penetração permanente com η_{1DPL} constante

É visível a distância entre a variação da energia do sistema (VES) e a energia medida pelos sensores (EFV). Essa distância inicial se situa em mais de 10 joules (diferença dos interceptos) e aumenta para solos de menor resistência, constatado pelo coeficiente angular mais elevado de EFV. Pode-se arguir, a partir do exame das retas de ajustes de EFV e VES, que há um distanciamento progressivo entre a energia medida pelo método EFV e a variação de energia do sistema (VES) quando se considera η_{1DPL} constante.

A energia do martelo (E_M) mantém-se pouco acima da energia teórica pois se trata da energia potencial do martelo para qual a altura fixa de 0,50 metros é adicionada a profundidade de penetração permanente do cone. Os coeficientes angulares da variação de energia do sistema (VES) e da energia do martelo (E_M) são quase paralelos um do outro, o que demonstra o efeito do fator constante da eficiência do martelo (η_{1DPL}). A expectativa é sempre a variação da energia do sistema (VES) ser próxima à medida da energia do golpe do martelo, no caso medida pelo método EFV. Não é o que demonstra a Figura 4.28, pelo contrário os dados medidos para EFV começam com valor menor que a variação de energia do sistema (VES) e tende a ser muito maior à medida que se aumenta a penetração permanente do cone.

4.2.4.2 VARIACÃO DA ENERGIA DO SISTEMA COM O FATOR DE EFICIÊNCIA PARA O MARTELO (η_{1DPL}) VARIÁVEL

A Fig. 4.29, tal qual a Figura 4.28, mostra a energia do sistema (E.S.), a energia do martelo (E_M), a energia medida pelo método EFV e a variação da energia do sistema (VES) com (η_{1DPL}) variável. A energia do sistema (E.S.) e a energia do martelo (E_M), mantêm o mesmo comportamento, pois estão sujeitas apenas ao deslocamento do martelo e penetração do cone. O mesmo se dá com relação à energia medida pelo método EFV que correlaciona os dados de energia medida pelo método EFV com a penetração permanente. A alteração ocorre com a variação da energia do sistema (VES), que passa a ter o fator de eficiência do martelo (η_{1DPL}) constante. A Eq. 4.12 apresenta a nova formulação:

$$VES = 20,39 + 1,29\Delta\rho \rightarrow \text{com } \eta_{1DPL} \text{ variável} \quad (4.12)$$

Constata-se que é pequena a diferença entre os interceptos das retas ajustadas da variação da energia do sistema (VES) e da medida pelo método EFV. Também é pequena a diferença entre os coeficientes angulares dessas retas, que demonstra uma correspondência próxima da igualdade entre a energia medida e variação da energia do sistema (VES).

Embora os ajustes tenham sido lineares, são similares a dependência, tanto da energia medida pelo método EFV quanto a variação da energia do sistema (VES) em relação à penetração permanente; a energia do martelo (E_M), também, correlaciona com a penetração permanente, embora o coeficiente angular seja mais de dez vezes menor quando comparada com os ajustes de EFV e VES.

Assim como foi identificado em relação aos dados de EFV, a reta do ajuste linear cresce muito com a penetração permanente, o que reforça a necessidade de se aplicar para o DPL o ajuste quadrático (grau 2) para um modelo de eficiência mais próximo dos resultados do ensaio de medida de energia pelo método EFV. Embora isso, mantém-se o ajuste linear como aceitável

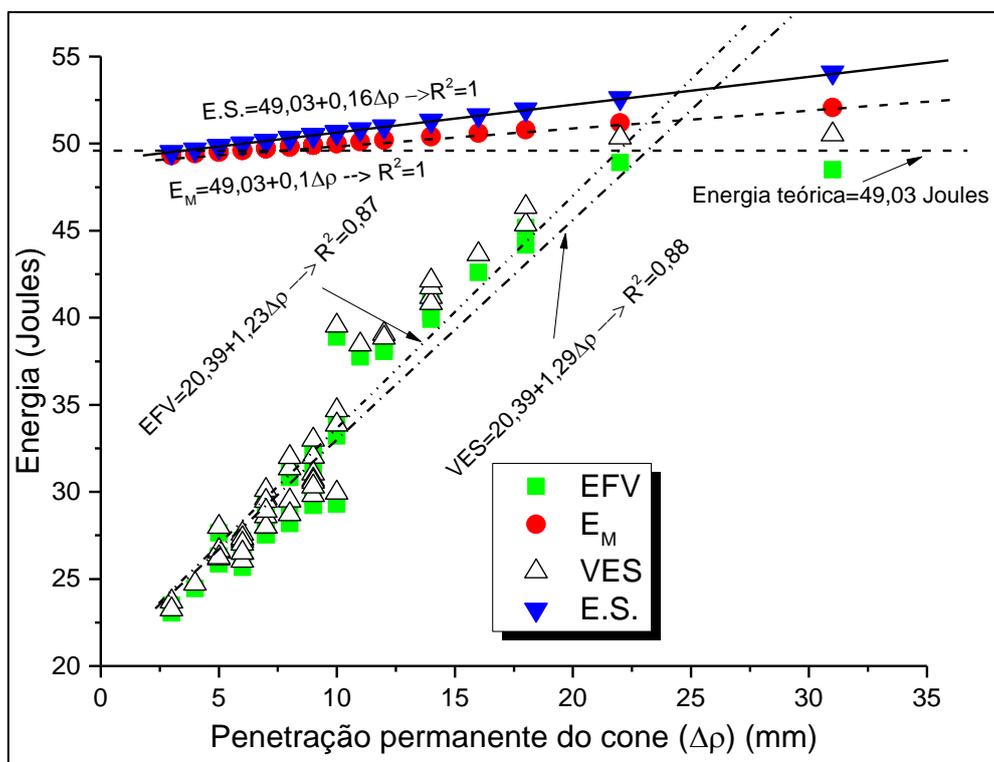


Figura 4.30 – Energias *versus* penetração permanente com a eficiência do martelo (η_i) variável

A Tabela 4.9 mostra o sumário da estatística descritiva para as energias *versus* penetração permanente com o fator de eficiência do martelo do DPL (η_{IDPL}) constante e variável. A variação da energia do sistema (VES) representa a soma das energias potenciais oriundas da haste, cabeça de bater e cone do DPL somadas à energia potencial do martelo, corrigida pela eficiência. Contudo, a eficiência do martelo (η_{IDPL}), é uma relação da energia potencial do martelo pela energia medida EFV.

Tabela 4.9 – Sumário da estatística descritiva para energias versus penetração permanente

	Número de dados	Média	D.P.	Variância	CV	Mínimo	Mediana	Máximo
EFV	50	31,77	6,701	44,91	0,211	23,05	29,26	48,89
E.S.	50	50,54	0,83	0,69	0,016	49,52	50,34	54,09
E_M	50	49,94	0,499	0,249	0,01	49,32	49,81	52,07
VES com η_1 constante	50	32,32	0,649	0,421	0,02	31,52	32,15	35,09
VES com η_1 variável	50	32,37	7,01	49,18	0,216	23,25	29,88	50,53
η_{IDPL}	50	0,635	0,127	0,016	0,20	0,47	0,59	0,96
Comparação entre as médias das energias para η_{IDPL} constante (ANOVA)								
E_M -EFV	E_M -VES	VES-EFV	E.S.- E_M	E.S.-VES	E.S.-EFV			
18,17	17,62	0,54	0,60	18,22	18,23			
Comparação entre as médias das energias para η_{IDPL} variável (ANOVA)								
E_M -EFV	E_M -VES	VES-EFV	E.S.- E_M	E.S.-VES	E.S.-EFV			
18,17	17,56	0,60	0,60	18,16	18,77			

Com foco no fator constante da eficiência, a diferença entre as médias da energia potencial do martelo (E_M) e a energia medida pelo método EFV é alta e significativa pois representa 37% da energia teórica; assim também se dá entre as médias da energia do martelo (E_M) e a variação da energia do sistema (VES), cerca de 36% da energia teórica, e do mesmo modo para a diferença entre as médias da energia do sistema (E.S.) e a variação da energia do sistema (VES), aproximadamente 37%. As diferenças entre as médias de VES e EFV e de E.S. e E_M foram, respectivamente, 1,1% e 1,2%. Com pequenas diferenças quantitativas o mesmo fenômeno ocorre para quando a eficiência é variável com a penetração permanente.

Os dados foram, então, submetidos para análise de variância (ANOVA) e tanto para a computação da variação da energia do sistema (VES) com η_{IDPL} variável ou constante não há diferença significativa das médias entre EFV e VES, conforme se depreende da leitura da Tabela 4.9. Portanto, não é possível afirmar que o ajuste da variação de energia do sistema é melhor representado quando a energia do martelo é multiplicada pela média da eficiência (fator constante) ou pela eficiência para cada penetração (variável). Foi feita, contudo, a análise de Levene que examina a homogeneidade das variâncias para as duas variações de energia (VES) examinadas, comparadas com a medida de energia pelo método EFV. A variação de energia do sistema (VES) quando tem a energia do martelo multiplicada pela eficiência para cada penetração permanente não é significativa enquanto para a variação de energia do sistema (VES) quando tem a energia do martelo multiplicada por um fator constante da (média da eficiência) é significativa. A variância, embora alta, conduz o cálculo da variação da energia do sistema (VES) para uma harmonia com os dados medidos pelo método EFV.

As figuras 4.28 e 4.29 apresentaram os dados calculados com η_{IDPL} variável e constante em relação à variação da energia do sistema (VES). Pode-se concluir que:

- a) É visível que a variação de energia do sistema (VES), calculada com a eficiência do martelo constante, mantém-se quase paralela à energia potencial do martelo (E_M), mas defasada em relação aos coeficientes angulares de quase dez vezes da medida de energia medida pelo método EFV;
- b) A mesma variação da energia do sistema (VES) quando calculada com a variação da eficiência do martelo, em função da penetração permanente, se afasta da energia potencial do martelo, mas se aproxima da energia medida pelo método EFV;
- c) Desse modo, nesta tese, optou-se por adotar a eficiência do martelo como variável dependente da penetração permanente do cone do DPL.

4.2.4.3 FORMULAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO MARTELO DO DPL (η_{IDPL})

Na seção anterior foram ajustados os dados da energia medida pelo método EFV, explícita na Equação 4.10, bem como das energias potenciais do martelo, Equação 4.9. Desse modo é possível calcular eficiência do martelo do DPL (η_{IDPL}) a partir das retas ajustadas, sabendo que a eficiência do martelo do DPL é a razão da energia medida pelo método EFV pela energia potencial do martelo, como mostrado na Equação 3.6, tem-se a seguinte formulação para a eficiência do martelo do DPL (η_{IDPL}) para a penetração permanente ($\Delta\rho$) em mm:

$$\eta_{IDPL} = 1,12 - \left(\frac{31,30}{44,57 + \Delta\rho} \right) \quad (4.13)$$

A Equação 4.13 apresenta para a penetração permanente igual a zero uma eficiência de 42%, o que é aceitável, porém deve ser vista como tendência. Ressalta-se que a penetração permanente, oriunda de um impacto dinâmico, representa o deslocamento final da composição do DPL de um estado cinético para o de repouso relativo.

A penetração permanente em mm tem equivalência ao N_{10} que equivale ao número de golpes do DPL para penetrar, 100 mm, conforme a recomendação do *Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils TC-16 with Reference Test Procedures* (ISSMFE, 1989). Dessa maneira a equivalência da penetração em mm em número de golpes é expressada pela Eq. 4.14:

$$N_{10} = 100(\Delta\rho)^{-1} \quad (4.14)$$

A Equação 4.13 mostra que para a penetração permanente de 2mm, equivalente a $N_{10}=50$ a eficiência do martelo é de 43,31%, enquanto que para uma penetração permanente da totalidade do cone ou $N_{10}=1$ a eficiência do martelo é 90,35%. A representação da eficiência do martelo do DPL (η_{1DPL}) é mostrada na Fig. 4.30.

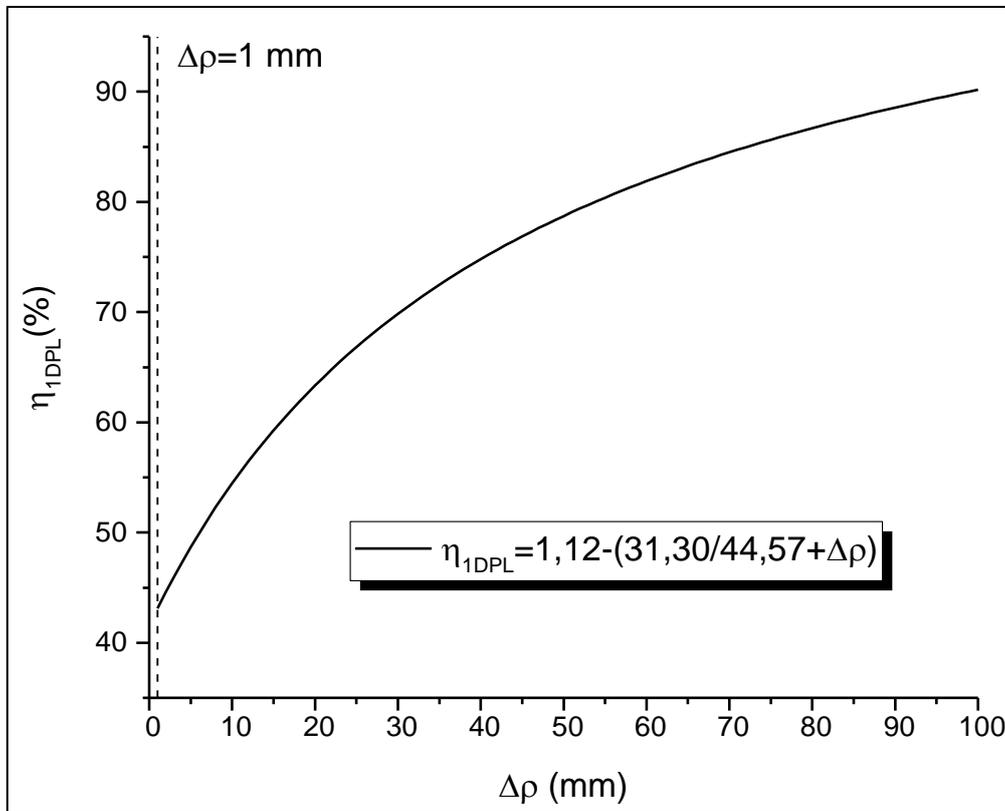


Figura 4.31 – Eficiência do martelo do DPL (η_{1DPL}) em função da penetração permanente ($\Delta\rho$)

4.2.4.4 DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO DPL (η_{DPL})

Para a medida da eficiência do sistema DPL, que vai além de 1 metro de profundidade da composição, Odebrecht (2003) introduziu um fator para computar a perda da energia devido ao comprimento da haste para o SPT e Ibañez *et al.* (2012) adaptaram para o DPL, mostrada na Equação 3.8.

Foram formuladas as energias potenciais da cabeça do martelo do DPL, da haste, cabeça de bater e cone e, também de toda a composição do DPL, excetuando o martelo, respectivamente nas equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4. e 3.5. Assim, conhecendo as massas envolvidas e considerando a aceleração da gravidade em $9,806 \text{ m/s}^2$ e a energia teórica em 49,03 Joules, pode-se reescrever a Equação 3.9, como Eq. 4.15:

$$\eta_{DPL} = \frac{(\eta_{1DPL}(98,06 \times (0,50 + \Delta\rho)) + (M_{DPL} 9,806 \times \Delta\rho))\eta_3}{49,03} \quad (4.15)$$

O fator de correção para o comprimento da haste (η_3) foi alterado para o DPL. Com base nos dados da eficiência sem correção foi feito novo ajuste da formulação de η_3 , vista na Eq. 4.16:

$$\eta_3 = 0,81 - 0,02l \quad (4.16)$$

A Tab. 4.10 apresenta a eficiência do martelo do DPL (η_{1DPL}) por penetração permanente ($\Delta\rho$), a massa da composição do DPL, excetuando o martelo, e o fator de redução do comprimento da haste (η_3), proposto por Odebrecht 92002). A partir dos dados mostrados na Tabela 4.10, inseridos na Eq. 4.15, é possível determinar a eficiência do DPL para qualquer penetração e profundidade da haste do DPL.

Tabela 4.10 – Eficiência do martelo do DPL (η_{1DPL}) por penetração permanente ($\Delta\rho$) em percentual									
$\Delta\rho$ (mm)	η_{1DPL}	$\Delta\rho$ (mm)	η_{1DPL}	$\Delta\rho$ (mm)	η_{1DPL}	$\Delta\rho$ (mm)	η_{1DPL}	$\Delta\rho$ (mm)	η_{1DPL}
1	0,4331	21	0,6426	41	75,42	61	0,8235	81	0,8707
2	0,4479	22	0,6498	42	75,84	62	0,8263	82	0,8727
3	0,4620	23	0,6568	43	76,26	63	0,8290	83	0,8746
4	0,4756	24	0,6635	44	76,66	64	0,8317	84	0,8766
5	0,4886	25	0,6701	45	77,06	65	0,8343	85	0,8784
6	0,5011	26	0,6765	46	77,44	66	0,8369	86	0,8803
7	0,5131	27	0,6827	47	77,82	67	0,8395	87	0,8821
8	0,5246	28	0,6887	48	78,19	68	0,8420	88	0,8839
9	0,5357	29	0,6946	49	78,55	69	0,8444	89	0,8857
10	0,5464	30	0,7003	50	78,90	70	0,8468	90	0,8874
11	0,5567	31	0,7058	51	79,25	71	0,8492	91	0,8891
12	0,5667	32	0,7112	52	79,59	72	0,8515	92	0,8908
13	0,5763	33	0,7165	53	79,92	73	0,8538	93	0,8925
14	0,5856	34	0,7216	54	80,25	74	0,8560	94	0,8941
15	0,5946	35	0,7266	55	80,56	75	0,8582	95	0,8957
16	0,6032	36	0,7315	56	80,88	76	0,8604	96	0,8973
17	0,6116	37	0,7363	57	81,18	77	0,8625	97	0,8989
18	0,6198	38	0,7409	58	81,48	78	0,8646	98	0,9005
19	0,6276	39	0,7455	59	81,78	79	0,8667	99	0,9020
20	0,6353	40	0,7499	60	82,07	80	0,8687	100	0,9035
Massa da composição do DPL em kg									
1 metro	2 metros	3 metros	4 metros	5 metros	6 metros	7 metros	8 metros	9 metros	10 metros
6,60	9,04	11,48	13,92	16,36	18,80	21,24	23,69	26,12	28,56
Fator de correção para haste em profundidade (η_3)									
0,79	0,77	0,75	0,73	0,71	0,69	0,67	0,65	0,63	0,61

A Fig. 4.31 mostra a variação da energia do DPL ao longo para dois comprimentos de haste, 1 metro e 10 metros. Observa-se que a eficiência do DPL diminui para o solo impenetrável ao DPL (2 mm ou $N_{10}=50$) e aumenta para solos de baixa resistência à penetração do DPL. Para uma penetração de 1 mm a eficiência para a haste de 1 metro é de 35%, enquanto que a mesma penetração para haste de 10 metros, a eficiência é de 26%. Para a penetração total do cone do DPL, 100 mm ou $N_{10}=1$, a eficiência ajustada para o comprimento é aproximadamente a 100% para ambos os comprimentos.

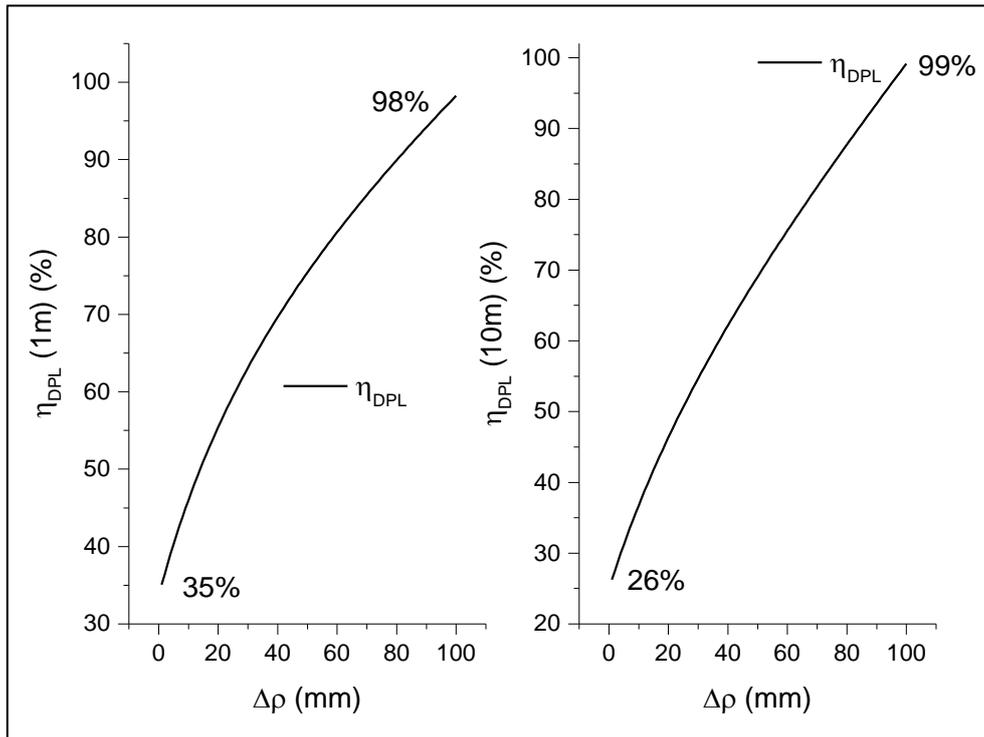


Figura 4.32 – Variação da eficiência do DPL (η_{DPL}) ao longo do comprimento da haste

4.2.4.5 DETERMINAÇÃO DA FORÇA DINÂMICA

A força dinâmica foi descrita por Odebrecht (2003), conforme a Equação E.3, no Apêndice E desta tese. Pode-se arguir que a força dinâmica é a razão da variação da energia do sistema do DPL (VES) pela penetração permanente ($\Delta\rho$), expressa pela Eq. 4.17:

$$Fd = \frac{VES}{\Delta\rho} \quad (4.17)$$

A variação da energia do sistema (VES), já foi descrita pela Equação 3.8 e assim, pode-se escrever a Equação 4.17, considerando o fator $\eta_2=1$, como Eq. 4.18:

$$Fd = \frac{\left(\left(\eta_{1DPL} (0,50 + \Delta\rho) \times 98,06 \right) + (M_{DPL} \times 9,806 \times \Delta\rho) \right) \eta_3}{\Delta\rho} \quad (4.18)$$

A força dinâmica pode ser vista na Fig. 4.32 para a haste de 1 metro e de 10 metros. Nota-se que a força dinâmica aumenta à medida que diminui a penetração, em concordância com o que já foi arguido nesta tese, ou seja, verifica-se que a reação à penetração permanente aumenta para solos resistentes e diminui para os solos de baixa resistência à penetração do DPL.

Do mesmo modo que se faz com a eficiência, a partir dos dados mostrados na Tabela 4.10, inseridos na Eq. 4.18, é possível determinar a força dinâmica do DPL para qualquer penetração e profundidade da haste do DPL.

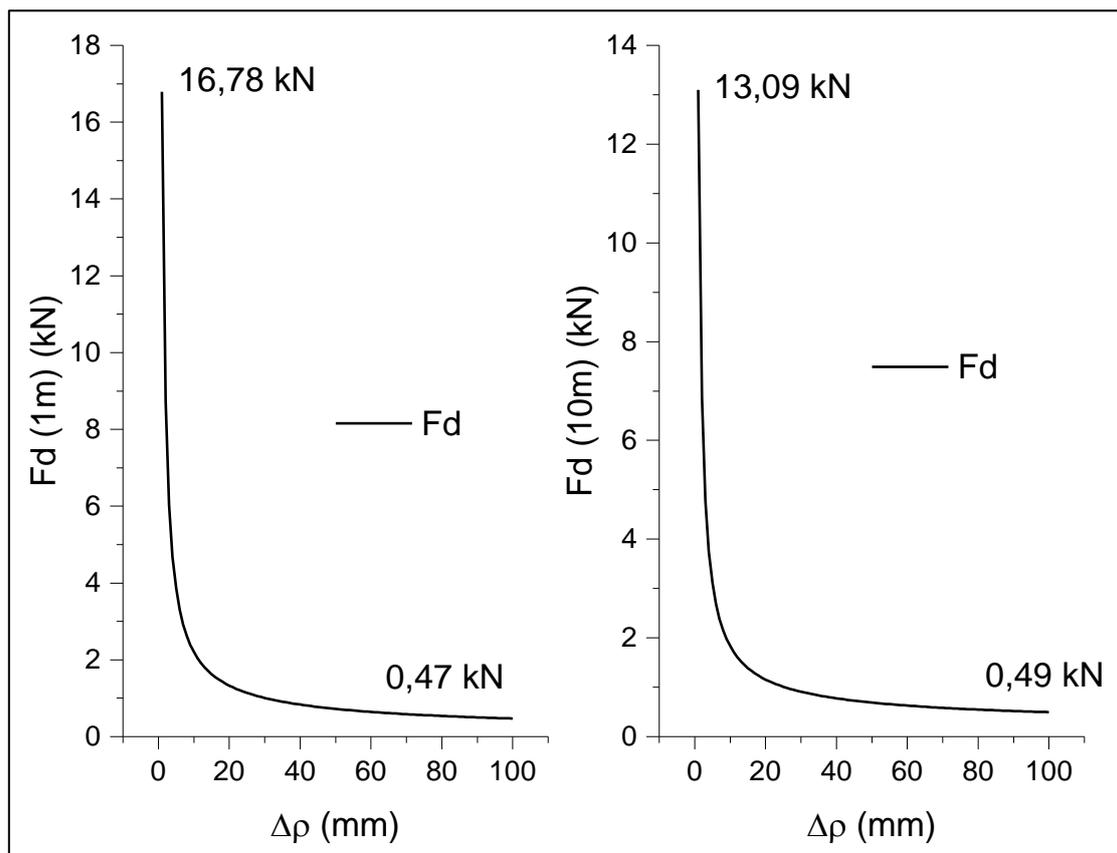


Figura 4.33 – Variação da força dinâmica do DPL ao longo do comprimento da haste

4.3 CONCLUSÕES DA ANÁLISE DA MEDIDA DE ENERGIA DO DPL

Este capítulo abordou, essencialmente, a análise dos dados para o método de medida de energia EFV, amplamente discutidos nesta tese. A seguir são apresentadas as conclusões por seção do capítulo que conforme se segue.

- a. Foi realizada a análise de avaliação dos sinais de força e aceleração e calculado o impulso de modo a verificar se o método EF2 teria aplicação para a medida de energia do DPL. Os resultados mostraram que, embora os picos de força máxima sejam

significativos para os registros do topo, os impulsos calculados para o cone e topo situam-se com valores que se aproximam da igualdade. Há pouca variabilidade do impulso em relação à penetração permanente. Essas constatações foram decisivas para considerar o método EFV como o mais adequado para a medida de energia do DPL.

- b. A análise da impedância do DPL adaptado e DPL sem adaptações demonstrou que o tráfego da força incidente da cabeça de bater até o cone não se distancia entre o DPL sem adaptações e o DPL com adaptações, mais que 5%, como se depreende da leitura da Tabela 4.2. O comportamento do tráfego da velocidade, também, mostrou que as adaptações não são significativas com uma diferença de 5% entre o DPL adaptado e o DPL sem adaptações. Essa análise foi de suma importância para diminuir a incerteza entre a medida realizada e a aplicação paramétrica dos resultados, no caso a estimativa de carga com o DPL abordada no próximo capítulo;
- c. A avaliação dos registros típicos de força e velocidade serviu para delinear o comportamento dinâmico do DPL. O DPL, dinamicamente, comporta-se, de modo similar, a uma estaca cravada. A geometria da ponta do DPL é cônica e a mobilização do conjunto se dá por compressão do solo logo abaixo da ponta do cone. Concluiu-se que é possível tipificar os comportamentos das ondas de força e velocidade transmitidas e refletidas ao solo, logo abaixo da ponta do cone, tal qual fizeram Gonçalves *et al.* (1996) para estacas cravadas. Essas tipificações levam em conta duas condições de contorno. A primeira condição assume a hipótese da ponta livre e, nesse caso, com deslocamento máximo do DPL, a velocidade tende a duplicar enquanto a força tende a zerar. Em termos dos ensaios com baixa penetração a velocidade de partícula aumenta, enquanto diminui a força de compressão. É notado, também, que aumenta o número de transição da força de compressão para força de tração. Para uma condição de contorno, para qual o deslocamento do cone do DPL tende a zero, a força ganha em magnitude, enquanto a velocidade diminui. Nota-se, também, a diminuição da transição entre as ondas de compressão e tração do sinal de força. Há sempre penetração do cone do DPL de modo que se dê a reação à mobilização dinâmica da reação do solo. Quando a resistência do solo à penetração é baixa a onda de tração é elevada e maior o número de impactos do martelo; quando a resistência do solo é elevada a onda de tração é baixa, conseqüentemente menor será o número de impactos;

- d. Os sinais apresentaram nítida correlação com a energia integrada, medida pelo método EFV, com a penetração permanente. À medida que se diminui a penetração permanente diminui-se a energia medida;
- e. A variável independente para medida pelo método EFV deve ser a penetração permanente ($\Delta\rho$). Foi feita uma formulação para a eficiência de energia do martelo do DPL (η_{1DPL}), a partir dos ajustes feitos para a medida de energia pelo método EFV e da energia potencial do martelo do DPL. Foi formulada, também, a eficiência do DPL (η_{DPL}) e considerada o efeito do comprimento das hastes. Observou-se o aumento da eficiência para solos com baixa resistência e de modo inverso a diminuição para a força dinâmica do DPL.

As conclusões elencadas conduzem para uma afirmação de que a eficiência energética do DPL foi determinada na tese para uma correlação com a penetração permanente do cone do DPL ($\Delta\rho$), assim, também a força dinâmica do DPL.

CAPÍTULO 5 – CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS VIA DPL

Este capítulo tem o objetivo de aplicar o uso da eficiência e força dinâmica do DPL, medidas nesta tese, para estimar a capacidade de carga de estacas via DPL. Para tanto, foi utilizada a formulação de Lobo (2005), a Equação E.7, apresentada no Apêndice E desta tese. Os parâmetros para o comprimento de estaca obedece aos comprimentos da haste nos ensaios de DPL.

5.1 CAPACIDADE DE CARGA PARA ESTACAS A PARTIR DA DEFINIÇÃO DA FORÇA DINÂMICA DO DPL

Conforme foi explanado no Capítulo 3, Lobo (2005) apresentou um método de previsão de capacidade de carga de estacas a partir da aplicação dos conceitos de energia do ensaio de SPT. Para a construção da formulação da capacidade de carga para estaca via DPL foram construídas formulações para extrair a força dinâmica, mostrada no Capítulo 4, equação e 4.19. Além disso, as formulações extraídas das equações 4.15 e 4.17 permitem a conversibilidade da penetração medida no sistema métrico ou equivalente em número de golpes do DPL para penetrar 10 cm (N_{10}).

5.1.1 FORMULAÇÃO PARA A ESTIMATIVA DE CARGA VIA DPL

Toada a formulação para a capacidade de carga das estacas via DPL exemplificadas tem por base o trabalho de Lobo (2005), resumido no Apêndice E desta tes, que leva em conta conceitos físicos de conservação de energia e na qual é calculada a força dinâmica de reação do solo à cravação do amostrador. Destaca-se, esse método, por considerar todas as variáveis envolvidas no processo de transferência de energia que ocorre ao evento de um penetrômetro dinâmico (SPT, DPL). Além disso, não há ajuste para o tipo de solo, pois essa variável é absorvida pela formulação (Lobo *et al.* 2014). Pode-se expressar a força dinâmica (F_d) como a razão da variação da energia do sistema (VES) pela penetração ($\Delta\rho$) como fora expressada na Equação 4.19.

A Fig. 5.1 mostra o detalhe do cone do DPL com cotas em milímetros. A área considerada para o cálculo do atrito lateral foram as geometrias da ponta do cone e o corpo do cone que resultou em uma área de 122,14 cm², e para a ponta a área considerada foi a de 10,75 m².

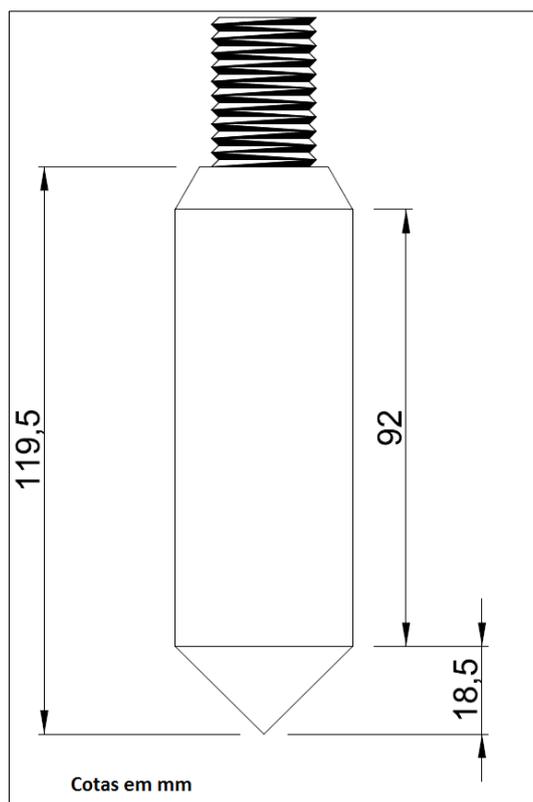


Figura 5.1 – Detalhe geométrico da ponta do DPL

Apenas para facilitar a leitura repete-se, aqui, a formulação de Lobo (2005) como Eq. 5.1:

$$Q_U = Q_L + Q_P = \alpha \left(\frac{0,2U}{al} \sum F_d \Delta L \right) + \beta \left(0,7F_d \frac{A_p}{a_p} \right) \quad (5.1)$$

Onde:

Q_U = Capacidade de carga total da estaca;

Q_L = Capacidade de carga do fuste da estaca;

U = Perímetro da estaca;

al = Área lateral do cone do DPL $\rightarrow 1,22 \times 10^{-2} \text{ m}^2$;

A_p = Área da ponta da estaca;

a_p = área da ponta do cone do DPL $\rightarrow 1,08 \times 10^{-3} \text{ m}^2$;

α = Coeficiente para o tipo de estaca aplicado à resistência lateral; e

β = Coeficiente para o tipo de estaca aplicado à resistência de ponta.

5.2 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE CARGA PARA ESTACAS VIA DPL

Esta seção apresenta um exemplo de aplicação com base na força dinâmica apresentada no Capítulo 4 para capacidade de carga de estacas escavadas via DPL.

5.2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ESTACAS ENSAIADAS

Todas as estacas escavadas foram ensaiadas a prova de carga `compressão estática e estimadas suas capacidades de carga pelos métodos semiempíricos de Aoki-Veloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978), além do método proposto, nesta tese, para o DPL. Para todas as estacas foram feitos ensaios SPT e DPL. Além disso, todas as estacas foram estimadas a extrapolação da curva de ruptura pelos métodos de Van der Veen (1953), Chin (1970) e Décourt (1999).

As cinco estacas escavadas têm diâmetro de 0,30 m e foram executadas no campo experimental da universidade Brasília e os resultados paramétricos dos ensaios dessas estacas encontram-se na tese de doutorado de Mota (2003). O perfil do solo foi descrito em quatro camadas, a saber:

- Camada I - 1 a 3 m – areia argilosa com silte, vermelha;
- Camada II – 3,1 a 8 m – argila arenosa com silte, vermelha;
- Camada III - 8,1 a 12 m – silte argiloso variegado a roxo; e
- Camada IV – 12,1 a 15 m – silte.

5.2.1.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

As cinco estacas deste exemplo foram executadas no Campo Experimental de Fundações e Ensaios de Campo do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília, situa-se no Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte – Brasília – DF.

A região possui relevo com planaltos de topografias suaves e vegetação de cerrado, conforme características do planalto central do Brasil. Na área referente ao campo experimental tem-se um perfil típico da camada de solo laterítico vermelho argiloso, denominado de “argila porosa”, que apresenta baixa resistência à penetração (SPT variando de 1 a 6 golpes), baixa resistência de ponta (CPT variando de 0,6 a 2,3 MPa), baixa capacidade de suporte, baixo Nível de saturação e alta permeabilidade (10^{-3} a 10^{-4} m/s). Devido a sua alta porosidade e tipo de ligações cimentíceas, apresenta uma estrutura altamente instável quando submetida a aumento de umidade e/ou a alteração do estado de tensões, apresentando quase sempre uma brusca variação de volume, denominado colapso.

5.2.2 RESULTADOS DA ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE CARGA PARA ESTACAS VIA DPL

Nesta seção são apresentados os resultados da estimativa de capacidade via DPL. Optou-se, então, por adotar:

- a) No trecho de segmento inteiro de haste, a média dos golpes do N_{10} para o comprimento de 1 metro;
- b) A interpolação entre os dois inteiros para o trecho final, se a estaca for menor em profundidade que o inteiro de segmento de haste, isto é, se a estaca tem um comprimento de 4,7 metros, interpola-se os números de golpes do DPL para quatro metros e cinco metros;
- c) Anota-se que essa adaptação atende, também à prática usual da administração dos dados de planilha que ficariam extensos se calculados para todo o comprimento da estaca a cada 10 cm;
- d) Para cada estimativa de capacidade de carga é apresentada a planilha com a cota de profundidade do ensaio (Z) ou comprimento da haste, a média do número de golpes do DPL por metro, N_{10} , a eficiência do martelo do DPL (η_{1DPL}), a eficiência do DPL em relação ao comprimento da haste (η_3), a massa do DPL, excetuando o martelo (M_{DPL}) em kg, a força dinâmica (F_d) em kN, a somatória da força dinâmica, em kN, a capacidade de carga da ponta (R_P), em kN; a capacidade de carga lateral (R_L), em kN e a capacidade de carga total da estaca (R), em kN.

As estacas escavadas de Brasília foram ensaiadas no campo experimental da universidade Brasília e os resultados encontram-se na tese de doutorado de Mota (2003). Foram estimadas as cargas com base nos três ensaios de DPL e feita a média das estimativas. As capacidades de carga para as estacas estão apresentadas na Tab. 5.1.

São apresentadas nas Tab. 5.1, 5.2 e 5.3 os resultados da estimativa para os ensaios de três DPL's realizados nas proximidades das estacas examinadas neste exemplo. As estacas, em número de cinco, têm diâmetros de 30 centímetros e comprimentos variados como mostrados na Tab.5.4, na faixa compreendida entre 7 e 8 metros. Os valores de alfa e beta foram respectivamente 0,7 e 0,5, conforme estipulados por (Lobo 2005) e mostrados na Tab. E.1.

A Tab. 5.4 apresenta as estimativas de carga, feitas pelo método apresentado nes tese, para as estacas escavadas de Brasília, considerando os três ensios de DPL, executados no Campo experimental da UnB. Observa-se que foi feita uma estimativa média dos resultados obtidos para os três ensaios, vistos na Figura 5.2. nota-se, também, a a conversão para mm do número de golpes N_{10} para milímetros.

Tabela 5.1 – Estimativa de carga com os resultados do DPL1 para as estacas escavadas de Brasília

Z (m)	N10 (Média)	$\Delta\rho$ (mm)	η_{1DPL}	η_3	M_{DPL} (kg)	Fd (kN)	ΣFd (kN)	R_L (kN)	R_P (kN)	R (kN)
1	12	8,33	0,53	0,79	6,60	2,55	2,55	27,56	58,37	85,92
2	5	20,00	0,64	0,77	9,04	1,32	3,86	41,78	30,13	71,91
3	4	25,00	0,67	0,75	11,48	1,12	4,98	53,89	25,64	79,53
4	4	25,00	0,67	0,73	13,92	1,11	6,09	65,86	25,36	91,22
5	7	14,29	0,59	0,71	16,36	1,59	7,68	83,04	36,38	119,42
6	5	20,00	0,64	0,69	18,80	1,24	8,92	96,50	28,51	125,01
7	13	7,69	0,52	0,67	21,24	2,40	11,32	122,45	54,96	177,40
8	14	7,14	0,51	0,65	23,69	2,48	13,80	149,27	56,82	206,09
9	25	4,00	0,48	0,63	26,12	3,86	17,67	191,05	88,50	279,55

Tabela 5.2 – Estimativa de carga com os resultados do DPL2 para as estacas escavadas de Brasília

Z (m)	N10 (Média)	$\Delta\rho$ (mm)	η_{1DPL}	η_3	M_{DPL} (kg)	Fd (kN)	ΣFd (kN)	R_L (kN)	R_P (kN)	R (kN)
1	18	5,56	0,50	0,79	6,60	3,54	3,54	38,34	81,20	119,54
2	5	20,00	0,64	0,77	9,04	1,32	4,86	52,56	30,13	82,69
3	5	20,00	0,64	0,75	11,48	1,30	6,16	66,61	29,76	96,37
4	4	25,00	0,67	0,73	13,92	1,11	7,27	78,59	25,36	103,94
5	3	33,33	0,72	0,71	16,36	0,91	8,18	88,47	20,94	109,41
6	4	25,00	0,67	0,69	18,80	1,08	9,26	100,14	24,72	124,87
7	8	12,50	0,57	0,67	21,24	1,68	10,94	118,30	38,46	156,77
8	8	12,50	0,57	0,65	23,69	1,64	12,58	136,09	37,67	173,77
9	17	5,88	0,50	0,63	26,12	2,82	15,40	166,54	64,50	231,05

Tabela 5.3 – Estimativa de carga com os resultados do DPL3 para as estacas escavadas de Brasília

Z (m)	N10 (Média)	$\Delta\rho$ (mm)	η_{1DPL}	η_3	M_{DPL} (kg)	Fd (kN)	ΣFd (kN)	R_L (kN)	R_P (kN)	R (kN)
1	10	10,00	0,55	0,79	6,60	2,21	2,21	23,90	50,62	74,53
2	7	14,29	0,59	0,77	9,04	1,67	3,88	41,93	38,19	80,12
3	5	20,00	0,64	0,75	11,48	1,30	5,18	55,98	29,76	85,74
4	6	16,67	0,61	0,73	13,92	1,45	6,63	71,67	33,23	104,91
5	6	16,67	0,61	0,71	16,36	1,43	8,06	87,12	32,71	119,83
6	7	14,29	0,59	0,69	18,80	1,56	9,61	103,99	35,73	139,72
7	13	7,69	0,52	0,67	21,24	2,40	12,01	129,94	54,96	184,89
8	13	7,69	0,52	0,65	23,69	2,34	14,36	155,28	53,68	208,95
9	17	5,88	0,50	0,63	26,12	2,82	17,17	185,73	64,50	250,23

Tabela 5.4– Estimativa de carga com os resultados dos DPL's para as estacas escavadas de Brasília

Estaca	L (m)	Estimativa (kN)			Estimativa (kN)			Estimativa (kN)		
		DPL1			DPL2			DPL3		
		R _L	R _P	R	R _L	R _P	R	R _L	R _P	R
E1	7,65	139,88	56,17	196,05	129,86	37,92	167,78	146,41	54,12	200,53
E2	7,25	129,16	55,43	184,59	122,75	38,25	161,00	136,27	54,64	190,91
E3	7,80	143,91	56,13	200,04	132,53	37,79	170,32	150,21	53,93	204,14
E4	7,30	130,55	55,52	186,07	123,63	38,21	161,94	137,54	54,57	192,11
E5	7,85	145,25	56,54	201,79	133,42	37,75	170,87	151,47	53,83	205,30

Todas as estacas têm diâmetro de 30 cm

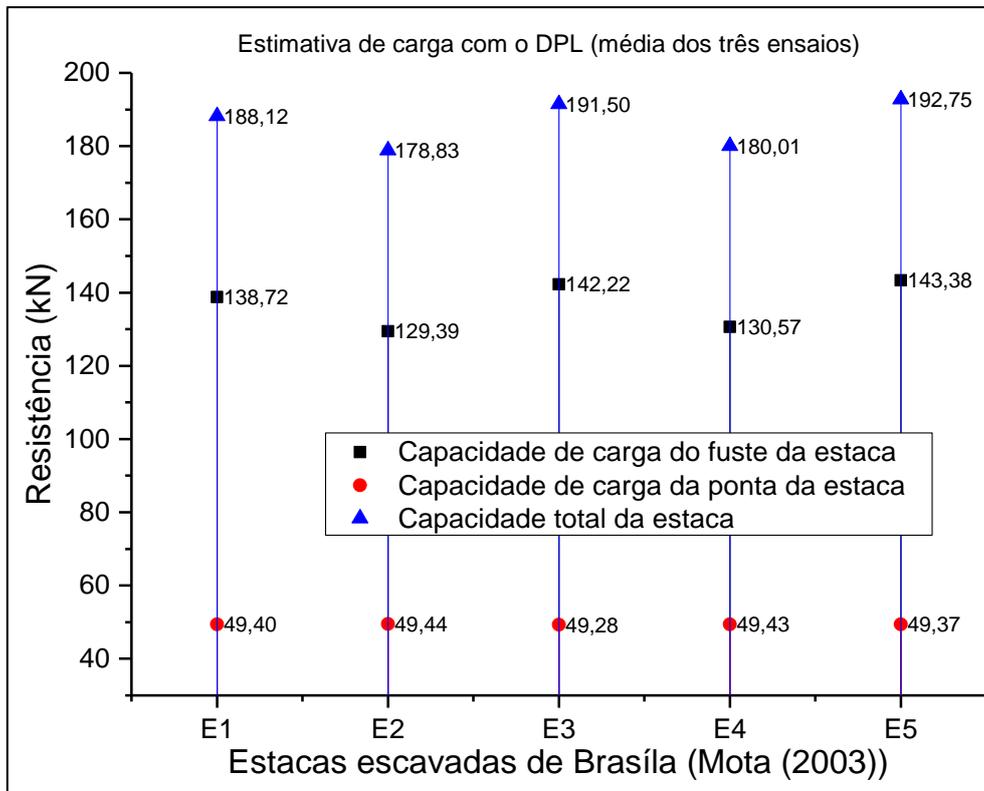


Figura 5.2 – Estimativa de carga com o DPL para as estacas escavadas de Brasília

5.2.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE CARGA PARA ESTACAS VIA DPL

Esta seção analisa os resultados obtidos com a estimativa de capacidade de carga para estacas via DPL frente aos métodos semiempíricos de Aoki-Veloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978) e às estimativas de carga de ruptura para os métodos de extrapolação de carga de ruptura de Van der Veen (1953), Chin (1970) e Décourt (1979).

A Tab. 5.5 apresenta, da esquerda para a direita, estaca e tipo, o diâmetro do fuste da estaca em metros, o comprimento considerado em metros, a carga máxima aplicada à compressão, em kN; a carga de ruptura adotada para os três tipos de métodos verificados na tese, em kN e a carga estimada para as estacas pelos três métodos verificados na tese, em kN.

Tabela 5.5 – Resumo dos parâmetros das estacas estimadas com o DPL

Estaca (Tipo)	φE (m)	L (m)	P (kN0)	ρ _{máx} /φE (%)	Carga de ruptura (kN)			Estimativa de carga (kN)		
					A	B	C	D	E	F
Brasília E1	0,30	7,65	270	5,37	270	294	300	323	293	188,12
Brasília E2	0,30	7,25	300	1,27	360	500	520	215,82	206,67	178,83
Brasília E3	0,30	7,8	270	1,62	270	322	321	433	372	191,50
Brasília E4	0,30	7,30	210	1,91	260	370	370	319,03	274,62	180,01
Brasília E5	0,30	7,85	270	2,97	310	416	398	256,85	238,65	192,75

Legenda:

φE = diâmetro do fuste do elemento de fundação, em metros;

L = comprimento do elemento de fundação, em metros;

P = carga máxima aplicada na prova de carga, em kN;

ρ = recalque máximo obtido na prova de carga, em milímetros;

A = método de Van der Veen (1953);

B = método de Chin (1970);

C = método de Décourt (1999);

D = método de estimativa de carga Aoki -Veloso (1975);

E = método de estimativa de carga Décourt-Quaresma (1978);

F = método de estimativa de carga para o DPL, adotado nesta tese;

A análise feita é em função dos erros em relação aos métodos semiempíricos de Aoki-Veloso (1975), Décourt-Quaresma e o proposto, nesta tese para o DPL, comparando os métodos entre si e cada um em relação aos métodos de extrapolação da curva de carga-deslocamento de Van der Veen (1953), Chin (1970) e Décourt (1999) para as estacas escavadas. Os erros percentuais entre a previsão e a extrapolação de carga de ruptura estimada obedecem à regra, conforme a Eq. 5.2:

$$Erro(\%) = \frac{Estimado - Extrapolação\ estimada}{Medido} \times 100 \quad (5.2)$$

A seguir a análise segue por agrupamento do tipo de estaca e extrapolação de carga de ruptura.

5.2.3.1 ESTACAS ESCAVADAS (VAN DER VEEN (1953))

A Tab. 5.6 apresenta o resumo dos erros de estimativa de capacidade de carga das estacas escavadas, face aos resultados extraídos das extrapolações de carga de ruptura pelo método de Van der Veen (1953). A média dos erros do DPL mostra que face aos métodos semiempíricos comparados é mais conservador, pois fica abaixo da medida de extrapolação de carga de ruptura pelo método de Van der Veen (1953), contudo isso o desvio padrão, a variância e o coeficiente de variação, contextualmente, demonstram um grau de confiabilidade maior que os outros dois métodos de estimativa de capacidade de carga.

É necessário observar que os dados analisados são medidas do afastamento da meta ou referência nos sentidos positivo e negativo da ruptura de carga medida.

Tabela 5.6 – Resumo estatístico das estimativas de capacidade de carga das estacas escavadas versus a extrapolação de carga de ruptura de Van der Veen (1953)

	Média	D.P.	Variância	C.V.	Mínimo	Mediana	Máximo
DPL	-31,39	9,45	89,32	-0,30	-46	-26,11	-24,39
Décourt-Quaresma (1978)	-2,73	30,97	959,42	-11,31	-42,59	5,63	37,78
Aoki-Veloso (1975)	9,10	38,82	1507,28	4,26	-40,05	2	60,37

A Fig. 5.3 apresenta: além da medianas representadas pelas linhas horizontais em cada caixa; os pequenos quadrados que representam a média; os asteriscos que representam os máximos e mínimos dos erros calculados e caixas maiores que são as discrepâncias dos erros, na faixa de 25% a 75%, em relação aos referenciais, que são as estimativas de carga das estacas realizadas pelos métodos de Aoki-Veloso (1975), Décourt-quaresma (1978) e Lobo (2005) via DPL versus as extrapolações da carga de ruptura pelo método de Van der Veen (1953).

Fica nítida que a estimativa de capacidade de carga para estaca, pelo método proposto nesta tese, têm os erros menos aproximados dos referenciais estabelecidos pelo método de Van der Veen (1953). Reitera-se que a mediana demonstra que a estimativa de capacidade de carga via DPL é mais conservadora, enquanto que o método de Décourt-Quaresma (1978) demonstra uma maior proximidade com o referencial, definido pelo método de Van der Veen (1953). Em relação ao coeficiente de variação o coeficiente, este é elevado para os três métodos comparados. Contudo, o método via DPL apresenta menor variabilidade quando comparado aos outros métodos. O estreitamento da caixa mostra que entre 25% e 75% os erros tendem para estimativa de capacidade carga via DPL têm menor dispersão que os outros métodos, quando comparados com a extrapolação de Van der Veen (1953).

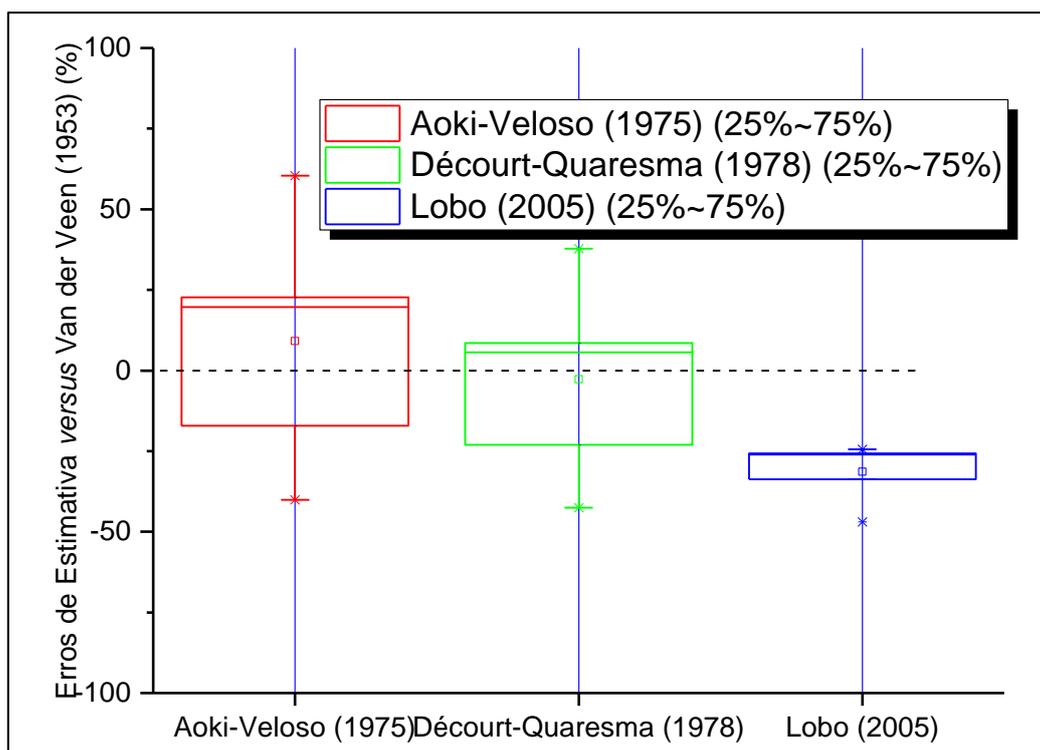


Figura 5.3 – Erros de estimativa de capacidade de carga de estacas escavadas *versus* Van der Veen (1953)

5.2.3.2 ESTACAS ESCAVADAS ((CHIN (1970))

A Tab. 5.7 apresenta o resumo dos erros de estimativa de capacidade de carga das estacas escavadas, face aos resultados extraídos das extrapolações de carga de ruptura pelo método de Chin (1970). A média dos erros do DPL, para esse método apresenta a menor proximidade com o referencial que os outros métodos de estimativa de capacidade de carga. O desvio padrão em relação à média é o menor entre os três métodos. O coeficiente de variação é mais favorável, também, para o método via DPL. Contextualmente, se analisado com a média, o método proposto é que tem menor dispersão.

Tabela 5.7 – Resumo estatístico das estimativas de capacidade de carga das estacas escavadas *versus* a extrapolação de carga de ruptura de Chin (1970)

	Média	D.P.	Variância	C.V.	Mínimo	Mediana	Máximo
DPL	-45,78	11,89	141,52	-0,25	-61,81	-48,08	-31,79
Décourt-Quaresma (1978)	-22,38	30,25	915,29	-1,135	-58,67	-25,77	15,53
Aoki-Veloso (1975)	-12,91	36,53	1334,11	-2,82	-36,03	-12,98	13,92

A Fig. 5.4, do mesmo que a Figura 5.3 modo, representa a mediana, a média, máximos e mínimos e as discrepâncias dos erros para uma faixa de 25% a 75% em relação aos referenciais de carga de ruptura estabelecidos pelo método de Chin (1970). A estimativa de capacidade de carga para estaca, pelo método proposto nesta tese, têm os erros mais aproximados dos

referenciais de carga de ruptura. As medianas mostram que todos os métodos estão aquém dos referenciais calculados pelo método de Chin (1970). De todo modo, as discrepâncias das extremidades e da faixa de 25% a 75%, mostram que a estimativa de capacidade de carga para estacas escavadas via DPL é bem mais conservadora que os outros métodos analisados, quando comparados com a extrapolação de Chin (1970).

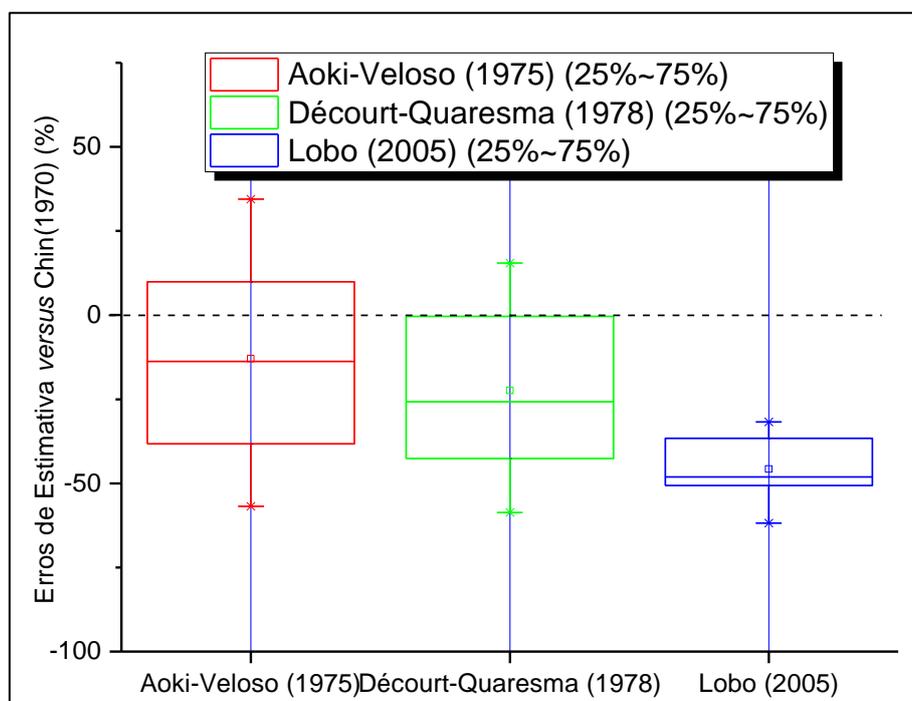


Figura 5.4 – Erros de estimativa de capacidade de carga de estacas escavadas em relação ao método de Chin (1970)

5.2.3.3 ESTACAS ESCAVADAS ((DÉCOURT (1999))

A Tab. 5.8 apresenta o resumo dos erros de estimativa de capacidade de carga das estacas escavadas, face aos resultados extraídos das extrapolações de carga de ruptura pelo método de Décourt (1999). A média dos erros do DP, para esse método apresenta a menor proximidade com o referencial que os outros métodos de estimativa de capacidade de carga, embora o desvio o desvio padrão em relação à média tenha menor dispersão que os outros métodos. O coeficiente de variação é mais favorável para o método de via DPL. Contextualmente, se analisado com a média, o método via DPL é o tem menor discrepância entre os três métodos analisados.

Tabela 5.8 – Resumo estatístico das estimativas de capacidade de carga das estacas escavadas *versus* a extrapolação de carga de ruptura de Décourt (1999)

	Média	D.P.	Variância	C.V.	Mínimo	Mediana	Máximo
DPL	-45,87	11,89	141,47	-0,26	-63,28	-13,77	34,89
Décourt-Quaresma (1978)	-22,50	30,10	906,03	-1,33	-60,26	-27,77	15,89
Aoki-Veloso (1975)	-13,04	36,39	1323,95	-2,79	-58,50	-13,77	34,89

A Fig. 5.5, do mesmo modo que as anteriores, Figura 5.4 e 5.3, representa a mediana, a média, máximos e mínimos e as discrepâncias dos erros para uma faixa de 25% a 75% em relação aos referenciais de carga de ruptura estabelecidos pelo método de Décourt (1999). A mediana e média do DPL mostram que o métodos para o DPL é conservador entre os três métodos. De todo modo as discrepâncias das extremidades e da faixa de 25% a 75%, favorecem o método proposto para o DPL quando comparado com os outros dois métodos semiempíricos.

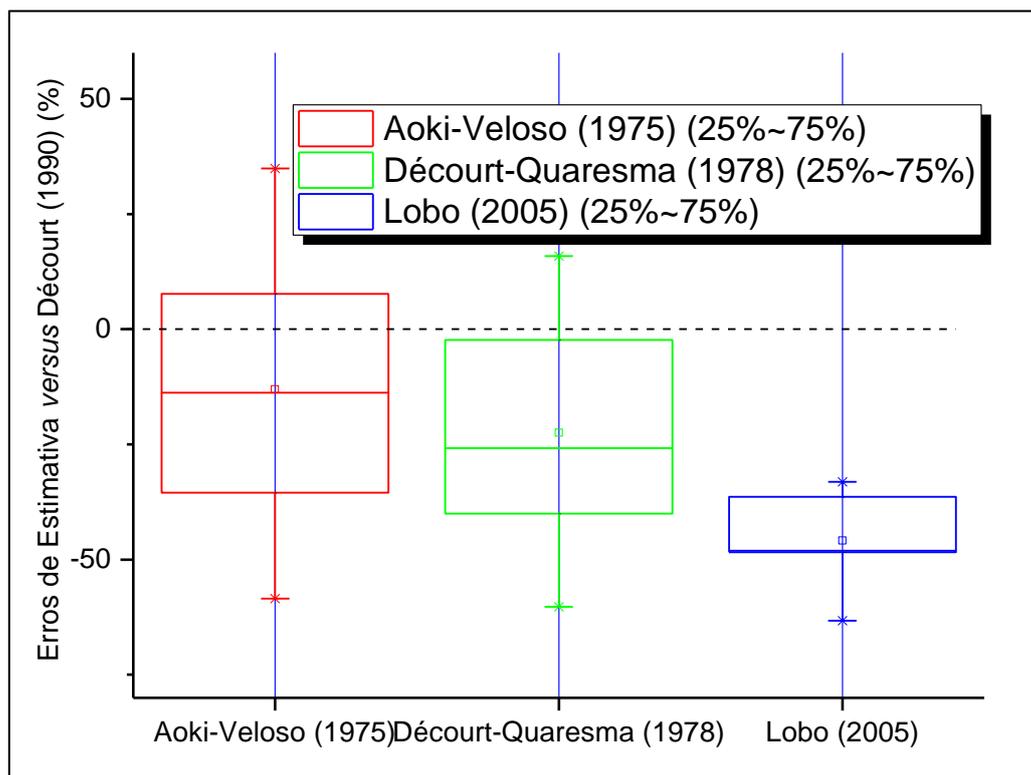


Figura 5.5 – Erros de estimativa de capacidade de carga de estacas escavadas em relação ao método de Décourt (1990)

5.4 CONCLUSÕES DA PROPOSTA DE ESTIMATIVA DE CAPACIDADE DE CARGA VIA DPL

Antes de iniciar esta sessão, cabe ressaltar que o objetivo principal da tese, sem dúvida, não é a formulação de uma estimativa de capacidade de carga para estaca via DPL. Mas, a proposta insere-se entre os objetivos subsidiários da tese.

O método proposto nesta tese foi aplicado a cinco estacas escavadas do campo experimental da UnB, em Brasília. Os dados analisados para estimativa de capacidade carga de estacas mostraram-se promissores pois foram comparados com os dois principais métodos

semiempíricos adotados massivamente pela engenharia brasileira que são os métodos de Aoki-Veloso (1975) e Décourt-Quaresma (1978).

A proposta da estimativa de capacidade carga para estacas via DPL abre a possibilidade para estimativas de capacidade carga para estacas escavadas para até 10 metros de fuste. Isso atende a uma grande parte das pequenas construções civis nas regiões onde o solo apresenta baixa resistência à penetração do SPT.

O método foi facilitado para a utilização prática pelo engenheiro que deseja estimar a capacidade carga de estaca via DPL.

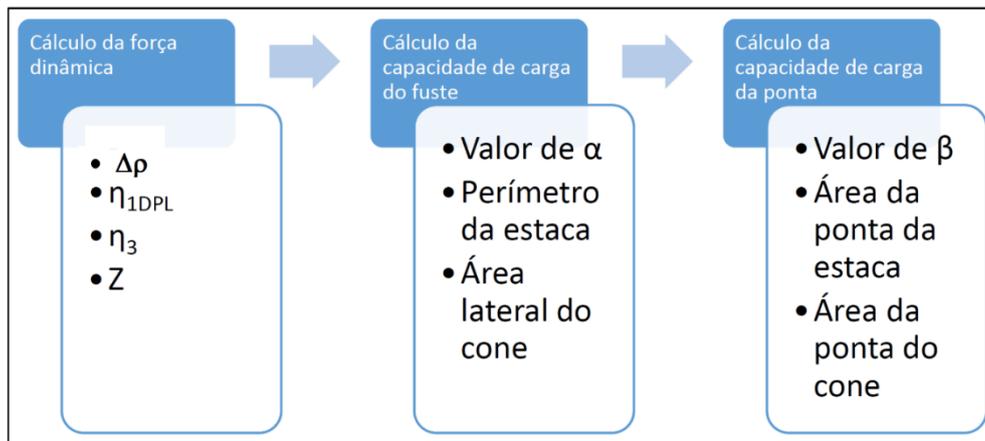


Figura 5.5 – Fluxograma para cálculos das estimativas de capacidade de cargas de estacas via DPL

Assim, a proposta de formulação para estimativa de capacidade de carga de estaca via DPL pode substituir as correlações do DPL com o SPT, muito comum quando se utiliza o DPL. Além disso, o método carrega a confiabilidade de ter a sua gênese na medida da força dinâmica do DPL. Embora, como ficou evidenciado, os fatores que governam o tipo de estaca, no caso escavada, necessitam de calibração.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo apresenta as conclusões da tese sobre os métodos empregados para a medida de energia no DPL, recomendações para o ensaio de campo do DPL e as proposições para continuação dos trabalhos sobre medida de energia do DPL.

6.1 MEDIDA DE ENERGIA DO DPL

A inovação da tecnologia dos sistemas micro eletromecânicos permitiu a mensuração da energia do DPL em laboratório, nesta tese, sem muitas alterações em relação ao que se pratica nesse

ensaio. Pode-se esperar que os avanços micro eletromecânicos favorecem a melhoria das próximas pesquisas sobre a eficiência da energia do DPL.

A análise dos sinais de força em relação a penetração permanente afastou os método EF2 como medida de energia para o DPL.

Os dados de energia medida pelo método EFV foram correlacionados, de modo linear, com a penetração permanente e que resultou em formulações para eficiência do martelo do DPL, eficiência do DPL e força dinâmica do DPL.

A determinação da eficiência do DPL foi feita para o comprimento da haste penetrada e para a penetração permanente do DPL

O método EFV é adequado para a medida de energia do DPL e a tendência é a melhoria da acurácia do método com a crescente inovação na construção dos sensores de aceleração e de captura de sinais.

Foi feita uma aplicação da formulação para a força dinâmica do DPL e aplicada para estimativa de capacidade carga de estacas via DPL

A estimativa de capacidade carga para estaca ainda necessita de maior ajuste entre as partes relativas às resistências de ponta e a que têm origem no atrito lateral, contudo em relação à carga última a formulação mostrou-se aplicável, quando comparada aos métodos semiempíricos com base no SPT, mais propriamente aos métodos de Aoki-Veloso (1975) e Décourt- Quaresma (1978).

Para as estimativas de carga para estacas escavadas o autor opina que há bom acordo entre as estimativas de ruptura e o método apresentado, nesta tese, com base no DPL; no caso de estacas raiz e hélice contínua há necessidade de mais dados correlacionados à prova de carga para estabelecer parâmetros ajustados a esses tipos de elementos de fundação.

Conclui-se que já é possível negligenciar as correlações do DPL com o SPT, assumindo a força dinâmica por número de golpes para penetrar 10 cm ou N_{10} do DPL como governante para a estimativa de capacidade carga para estacas via DPL.

6.2 RECOMENDAÇÕES DO ENSAIO DO DPL

Em relação ao ensaio do DPL a prática do ensaio para medida mostrou que a soltura do martelo merece uma atenção maior do que tem sido dada. A verticalidade da haste guia dever ser

mantida e recomenda-se o uso de grafite para diminuir ao máximo o atrito entre a haste guia e o martelo. Além disso, os diversos ensaios realizados com o DPL, nesta tese, remetem às seguintes considerações de procedimento face ao que recomenda o *Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils TC-16 with Reference Test Procedures* (ISSMFE, 1989), TC – 16 (ISSMFE, 1989), e as que o autor depreendeu da experiência do autor com o DPL:

- i. As recomendações do relatório referenciado acima, TC-16 (ISSMFE, 1989), sobre verticalidade, verificação do aperto das conexões e registros de anormalidades do ensaio são pertinentes;
- ii. Foi possível verificar o ensaio DPL a grandes profundidades (+ de 10 m) de modo que se assume como pertinente a recomendação do TC-16 (ISSMFE,1989) para aliviar o atrito lateral de rotacionar a haste a cada 0,2 metros para profundidades maiores que 10 metros, desse modo evita-se afrouxamento das conexões da composição.
- iii. É válida a recomendação do TC-16 (ISSMFE, 1989) de rotacionar as hastes a cada metro, pois essa ação evita o afrouxamento das conexões e diminui o efeito do atrito lateral;
- iv. Não há razão objetiva para aumentar a taxa de golpes de 15 por minuto para 60 por minuto para o caso de solos granulares como recomenda o TC-16 Apêndice (ISSMFE, 1989). Ao contrário deve-se manter a taxa de 15 golpes por minuto dado que a composição, em função da vibração da haste, afrouxa as conexões com o aumento da taxa de golpes;
- v. O autor recomenda a observação da verticalidade na soltura do martelo, de modo a não diminuir a velocidade de queda pelo atrito lateral entre a haste guia e o martelo;
- vi. Recomenda-se a verificação, após cada ensaio, das condições do martelo e cabeça de bater em relação às deformações permanente do material; e
- vii. Recomenda-se a verificação do comprimento das roscas fêmeas da composição em relação ao comprimento das roscas machos da composição. A rosca fêmea tem que acoplar todos os fios de rosca da rosca macho, de modo a garantir acoplagem e evitar rebarbas do aço que causam afrouxamento da composição.

6.3 SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA DO DPL

Sugere-se que, seja continuada a pesquisa de medida de energia DPL para hastes longas e a adoção de células de carga de grelhas radiais, capazes de medirem a evolução do torque no

domínio do tempo, de modo a obter o atrito lateral com mais acurácia do que até então se faz como sugestão do TC-16 da ISSMFE (1989). Ainda nesse escopo sugere-se, para as regiões de solos de baixa resistência em Mato Grosso e outras regiões do Planalto Central Brasileiro, e em casos de cargas compatíveis para pequenas construções como galpões de oficinas, residências multifamiliares de até 4 pavimentos, a adoção da estimativa de capacidade carga para estaca, conforme a proposta da tese, para estimativa de capacidade de carga para estaca via DPL. Sempre que possível, isso deve ser referenciado pela prova de carga estática com interpretação dos métodos de extrapolação de carga de ruptura, à guisa de sugestão os métodos de Van der Veen (1953), Chin (1970) e Décourt (1999), de modo a estabelecer uma base de dados significativa para esse ensaio.

Sugere-se, de modo geral, a adoção de formulações com base na força dinâmica para a estimativa de capacidade de carga, mais próxima do fenômeno físico que ocorre para a penetração de uma haste no solo. E por fim, sugere-se a adoção de notificações dos resultados de provas de carga estática a compressão ou à tração, da parte dos profissionais da engenharia, em organizações como a Associação Brasileira de Mecânica de Solos e Engenharia de Geotécnica (ABMS), de modo a formar um banco de dados nacional de provas de carga.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Abou-Matar, H. & Goble, G.G. (1997), "SPT Dynamic Analysis and Measurements", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering –ASCE* - vol. 123, n. 10, pp. 921-928
- Abutakka, A. (2011). Mato Grosso em números. Cuiabá: Central de Textos.
- AENOR-CEN (European Committee for Standardization). 2005. International EM ISSO 22476-2:2005. Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 2: Dynamic probing (ISO 22476-2:2005). Madrid: AENOR.
- Alves, A. M. D. L., Lopes, F. D. R., & Danziger, B. R. (2004). Métodos dinâmicos para previsão e controle do comportamento de estacas cravadas. *Teoria e prática de engenharia civil*, n 4, p 12-21.
- Alves Filho, C. E. (2010). Correlações para obtenção de parâmetros geotécnicos de argilas compressíveis com utilização do penetrômetro dinâmico leve. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto - MG.
- Aoki, N. & Velloso, D. A. (1975). An approximate method to estimate bearing capacity of piles. V Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Buenos Aires, ISSMGE, 1: 367-376.
- Aoki, N.; Cintra, J.C.A. (2000). The application of energy conservation Hamilton's principle to the determination of energy efficiency in SPT tests. In: PROCEEDINGS OF THE SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF STRESS-WAVE THEORY TO PILES, São Paulo. Anais...p.457-460.
- Aoki, N.; Cintra, J.C.A. (2004). Prova de carga estática no amostrador SPT para a obtenção da eficiência e da resistência estática em solo arenoso. *Solos e Rochas*, São Paulo: ABMS/ABGE, volume 27, n° 2, p.147-160, maio/agos.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6484 (2001). Solo -Sondagens de simples reconhecimentos com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12004 (1990). Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos - Método de ensaio. Rio de Janeiro - Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12051 (1991). Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos - Método de ensaio. Rio de Janeiro - Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- ASTM D6951-03: (2009). Standard test method for use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications. West Conshohocken, PA, USA, 7p
- Ávila, S. P., & ConcianI, W. (2006). Previsão de capacidade de carga de solos através de correlação de dados obtidos com o Cone Dinâmico (DPL). XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. CD. Curitiba: COBRAMSEG.
- Ávila, S. P.; ConcianI, W.; Cunha, R.P. (2006). Breve comparativo entre dois equipamentos utilizados para o ensaio de campo de cone dinâmico (DPL). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS, II. 2006, Nova Friburgo, Anais eletrônicos CD ROM, Nova Friburgo: ABMS, 2006, 6p.

- Ávila, S. & Concian, W. (2005). Primeiras experiências com cone dinâmico em Mato Grosso. I Seminário Mato-grossense de habitação de interesse social. CD. Cuiabá: CEFETMT-UFMT.
- Belincanta, A. (1998). Avaliação de Fatores Intervenientes no Índice de Resistência à Penetração do SPT, tese de D. Sc., EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil.
- Belincanta, A. Ferraz, R. L. (2000). Fundamentos e métodos de medidas de energia dinâmica no SPT. *Acta Scientiarum (UEM)*, Maringá Pr, v. 22, n.5, p. 1473-1482.
- Borges, F. F. (2011). Fusão de sensores de baixo custo aplicada á seleção e classificação automatizada de mangas para exportação. tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande - Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande.
- Burland, J. B., and Burbidge, M.C. (1985). Settlement of foundations on sand and gravel. *In Proceedings of the Institution of Civil Engineering, Part I, Vol. 78(6)*. pp. 1325-1381.
- Cavalcante, E. (2002). Investigação Teórico-experimental sobre o SPT. tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Eurocódigo 7 "Projecto geotecnico. Parte 3. Projectos assistido por ensaios de campo". ENV 1997-3. Pré-Norma Portuguesa, CEN 1999.
- Cintra, J. C., & Belincanta, A. (1998). Fatores intervenientes em variantes do Método ABNT para a execução do SPT. *Solos e Rochas*, 21 (3), 119-133.
- Clough, R.W. and Penzien, J. (1975).. *Dynamics of structures* (No. Monograph).
- Clayton, C.R.I. (1990). SPT Energy Transmission: Theory Measurement and Significance, *Ground Engineering*, vol. 23, n10, pp. 35-43.
- Cunha, R.P. & Camapum De Carvalho, J. (1997). Analysis of the behavior of a drilled pier foundation in a weathered, foliated and folded slate. XIV International Congress of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburgo, Alemanha, pp. 785-786.
- Danziger, B.R. (1991). Análise Dinâmica da Cravação de Estacas. tese de DSc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Décourt, L. & Quaresma, A.R. (1978). Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. VI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, ABMS, Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- Décourt, L. (1989). Ultima bearing capacity of large bored piles in a hard São Paulo Clay. De Mello Volume, Ed. Edgard Blucher Ltda, São Paulo, SP, pp. 89-120.
- Demir, O. K. (2007). Assessment of Hand-Type Hammer Drill Bits Under Percussive Loading Middle East Technical University. Department of Mechanical Engineering.
- DIN 4094-1. (2002). Subsoil - Field investigations - Part 1: Cone penetration tests. STANDARD by Deutsches Institut Fur Normung E.V. (German National Standard).
- El-Gizawy, M. L. (2009). Continuous Measurement - While - Drilling -. Thesis of Doctorate, University of Calgary, Department of Geomatic Engineering, Calgary.
- EMBRAPA (2006). Embrapa, arroz e feijão. Acesso em 16 de Outubro de 2010, disponível em EMBRAPA - Sistemas de Produção: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozTerrasAltasMatoGrosso/solos.htm#nv>

- Fairhurst, 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. 27, n. 7, July, pp. 327-328.
- Figueiredo, D. G. (1977). Análise de Fourier e Equações Diferenciais Ordinárias. *IMP*A.
- Figueiredo, L. C.; Cunha, R. P.; Conciani, W. (2011). Algumas experiências com o DPL em Mato Grosso. V Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste e II Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região do Centro-Oeste (pp. 37-42). Brasília: Ipanema Ltda.
- Figueiredo, L. C.; Cunha R.P.; Conciani, W. (2013). Medida de energia do DPL com acelerômetros. III Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região do Centro-Oeste e VI e Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste, 167-171.
- Freitas Júnior, J. L. (2005). Desenvolvimento de um monitor de vibrações utilizando sensores de tecnologia micro-eletromecânica - MEMS. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá.
- Gonçalves, C.; Andreo, S.C.; Bernardes, G. P. (1996). Prova de Carga Dinâmica. São Paulo, SP. Copyright 1º Edição.
- Google, G.G. (1986), Notas de Aulas do Curso de Estacas Cravadas – *Aplicação da Equação da Onda*, PUC/RJ (citado por DANZIGER, 1991).
- Hanskat, C.S. (1978), *Wave Equation Simulation of the Standard Penetration Test*, Master thesis, University of Florida, Gainesville, Florida.
- Hasmat, A. (2000). Correlation of StaticCone Penetration Test Results and Dynamic Probing Test Results. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Kanaalwelg: ITC.
- Hussein, M. H.; Goble, G. G. (2004). A brief history of the application of stress-wave theory to piles. *Current Practices and Future Trends in Deep Foundations*, 125, 186-201.
- Ibañez, S. J.; Sagasetta, C.; Lopez, V. (2012). Measuring energy in dynamic probing. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4*, 399.
- Isaacs, D.V. (1931). "Reinforced Concrete Pile Formulae", *Journal of the Institution of Engineers Australia*, Vol. 3, Nº 9, September, pp. 305-323.
- ISSMFE (1989) International Reference Test procedure for dynamic probing (DP). *Report of the ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils – TC 16 with Reference Test Procedures*.
- Kayalar, A. S. (1988). Statistical evaluation of dynamic cone penetration test data for design of shallow foundations in cohesionless soils. *Penetration Testing ISOPT-1. 1.2.*, pp. 429-434. Orlando: Balkema: Rotterdam.
- Kleyn, E. G.; Van Zyl, G. D. (1988). Application of the dynamic cone penetrometer (DCP) to light pavement design. *Penetraion Test 1988, ISOPT-1. 1.2*, pp. 435-444. Orlando: Balkema.
- Lobo, B. O. (2005). Método de Previsão de Capacidade de Carga de estacas: Aplicação dos Conceitos de Energia do Ensaio SPT. Dissertação de Mestrado. UFRS. Porto Alegre, RS.
- Lobo, B. O.; Odebrecht, E.; Schnaid, F. (2014). *Pratica de Uso do SPT na Previsão de Capacidade de Carga de Estacas através dos Conceitos de Energia*, COBRAMSEG 2014.

- Love, A.E.H., (1906). *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity*. Ed. Cambridge University Warehouse, London, second edition.
- Martins, J. B; Miranda, T.F.S. (2003). *Ensaio de penetração nos solos graníticos da região norte de Portugal: algumas correlações*.
- Morais, T. S; Esquível, E.R; Lukiantchuki, J.A. (2014). *Avaliação da eficiência do ensaio SPT com base em instrumentação dinâmica*. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Goiânia: COBRAMSEG.
- Morgano, C. M.; Liang, R. (1992). *Energy Transfer in SPT – Rod Length Effect*, In: *Proceedings of the fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, vol. 1, pp. 121-127, Netherlands
- Mota, N. M. B. (2003). *Ensaio Avançados de Campo na Argila Porosa Não Saturada de Brasília: Interpretação e Aplicação em Projetos de Fundação*. tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, Brasil.
- Nakao, R. (1981). *Aplicação da Equação da onda na análise do comportamento de estacas cravadas*. tese de M.Sc., COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- Nilsson, T. U. (2003). *O penetrômetro portátil DPL Nilsson*. In *I Simposio do Centro-Oeste*.
- Nilsson, T. U.; Cunha, R. P. (2004). *Advantages and equations for pile design in Brazil via DPL tests*. GEOTECHNICAL AND GEOPHYSICAL SITES CHARACTERIZATION, II., Vol 2, pp. 1519-1523. Porto.
- Nilsson, T.U. (2004). *Comparações entre DPL Nilsson e SPT*. Geosul 2004 - IV Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul.
- Odebrecht, E. (2003). *Medidas de energia no ensaio do SPT*. tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul., Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre.
- Odebrecht, E.; Schnaid, F., Rocha, M. M.; Bernardes, G. P. (2005). *Energy efficiency for Standard Penetration Tests*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental* , 131 (10), 1252-1263.
- Palacios, A. (1977), *Theory and Measurements of Energy Transfer During Standard Penetration Test Sampling*, Ph.D. Thesis, University of Florida, Gainesville, USA.
- Portela, A., Arlindo, A. (1996). *Mecânica dos Materiais*. Lisboa: Plátano.
- Ribeiro Junior, I.; Sarto, M. B.; Conciani, W. (2007). *Estudo comparativo entre as previsões de capacidade de carga para estacas curtas feitas a partir de dados de SPT e DPL*. III Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos. CD. Cuiabá: CEFETMT.
- Ribas, R.P. (2000). "Microsistemas Integrados (MEMS)." *Universidade Estadual de Campinas*
- Robertson, P. K.; Campanella, R. G.; Wightman, A. (1983). *SPT-CPT correlations*. *Journal of Geotechnical engineering* , 109 (11), 1449-1459.
- Röhm, S. A.; Nogueira, J. B. (1993). *Determinação de Mini-CBR com o Penetrômetro Dinâmico Leve-PDL*. *Solos e Rochas* , XVI, 199-206.
- Samson, C. H.; Hirsch, T. J.; Lowery, L. L. (1963). *Computer study of dynamic behavior of piling*. *Journal of the Structural Division, ASCE*, 89, 413-449.

- Schnaid, F. (2000). *Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Schmertmann JH. (1970). Static cone to compute static settlement over sand. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division of the American Society of Civil Engineer*, 96(SM3): 1011 - 1043.
- Schmertmann JH, Hartman JP and Brown P. (1978). "Improved strain influence factor diagrams," *J. of Geotech. Eng. Division, ASCE*, 104 (8), 1131–1135.
- Schmertmann, J.H.; Palacios, A. (1979). "Energy Dynamics of SPT", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division - ASCE - vol.105, n. GT8*, pp. 909-926.
- SEMA (2010). *Mapa dos Biomas Mato-Grossenses*. Acesso em 14 de Novembro de 2011, disponível em Secretaria de Estado do Meio ambiente: http://www.sema.mt.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=170&Itemid=107.
- Silva, D. F.; Miguel, M.; Belincanta, A. (2006). *Estudo Preliminar de Estimativa de Capacidade de Carga de Estacas Através de Ensaio DPL e DPSH em Londrina/Pr. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG) (pp. 1370-74)*. Curitiba: Cobramseg.
- Silva, J. P. (2007). *Estudos Preliminares para a Implantação de Trincheiras de Infiltração*. UNB, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília: GDM.
- Silva, I. A. (2014). *Desenvolvimento de sistema eletrônico para instrumentar um DPL em ensaio dinâmico de resistência do solo. tese de Doutorado - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação. 119 p.*
- Skempton, A. W. (1986). Standard penetration procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation. *Geotechnique*, volume 36 n° 3, p. 876-882.
- Smith, E.A.L. (1960). Pile driving analysis by the wave equation. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Proc. of American Society Civil Engineering (ASCE)*, agosto, pp. 35-61.
- Sousa, J. F.; Fonseca, A. V. (2006). *Previsão de Assentamentos de Fundações Directas, com Base nas Correlações entre Ensaio de Carga em Placa e Ensaio de Penetração (Estática e Dinâmica)*. COBRAMSEG, XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, CD. Curitiba.
- Souza, D.; Santos, A. C.; Conciani, W. (2008). *Estudo Comparativo entre Resultados de Ensaio DPL com Hastes Construídas com Tubo Mecânico com Diferentes Espessuras de Paredes*. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Búzios: Cobramseg, 1 CD.
- Sy, A.; & Campanella, R. G. (1991). An alternate method of measurement SPT energy. *Proceedings of the 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, (pp. 499-505). Saint Louis, Missouri, USA.
- Sy, A.; & Campanella, RG (1994). Becker and standard penetration tests (BPT-SPT) correlations with consideration of casing friction. *Canadian Geotechnical Journal*, 31 (3), 343-356.
- Tavenas, F. A.; Audibert, J. M. E. (1977). Application of the wave equation analysis to friction piles in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 14(1), 34-51.

- Timoshenko, S.; Goodier, J. N. (1951). *Theory of Elasticity*. New York: McGraw-Hill Book Inc.
- Tokimatsu, K. (1990). Penetration tests for dynamic problems: Proc 1st International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando, 20–24 March 1988 V1, P117–136.
- Trichês, G., e Dal Pai, C. M. (2006). Estudo da Repetibilidade do Penetrômetro Dinâmico de Cone na Avaliação da Resistência de Solos Compactados. *COBRAMSEG' 2006*. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia Geotécnica., CD-ROM. Curitiba.
- Velloso, D. A.; Lopes, F.R. (2004). *Fundações*. São Paulo: Oficina de Textos.
- YokeL, F.Y. (1982), “Energy Transfer in Standard Penetration Test”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE – vol. 108, n. GT9*, pp. 1107 -1202.

APÊNDICE A – DADOS DE ENERGIA MEDIDA PELO MÉTODO EFV

Tabela A.1 – Resumo de medidas de energia pelo método EFV do DPL

Arquivo	Haste (mm)	Δp (mm)	EFV (Joules) $EFV = \int_0^{t_{max}} Fv dt$ Equação 3.24	E_M (1) (Joules) $M_m=10,0 \text{ kg}$ Equação 3.18	E_H (2) (Joules) $M_H= (*)$ Equação 3.19	E_{cb} (3) (Joules) $M_{cb}=0,595 \text{ kg}$ Equação 3.20	$E_{cone}^{(4)}$ (Joules) $M_{cone}=0,925 \text{ kg}$ Equação 3.21	Energia do Sistema (5) Equação 3.7	η_{IDPL} (6) $\frac{\int_0^{t_{max}} FV dt}{[(0,75 + \Delta p)M_m g]}$ Equação 3.22
jul/02	177	23	48,89	51,18732	1,10904	0,12836	0,19955	52,61892	0,95531
jul/03	208	31	48,5	52,06986	1,56273	0,18087	0,28119	54,08916	0,93144
jul/04	226	18	44,17	50,79508	0,90739	0,10502	0,16327	51,96548	0,86957
jul/05	244	18	45,18	50,79508	0,90739	0,10502	0,16327	51,96548	0,88946
jul/06	258	14	40,27	50,40284	0,70575	0,08168	0,12699	51,31204	0,79896
jul/07	258	14	39,91	50,40284	0,70575	0,08168	0,12699	51,31204	0,79182
jul/08	272	14	40,82	50,40284	0,70575	0,08168	0,12699	51,31204	0,80987
jul/09	288	16	42,6	50,59896	0,80657	0,09335	0,14513	51,63876	0,84191
jul/10	308	10	38,89	50,0106	0,50411	0,05835	0,09071	50,6586	0,77764
jul/11	319	11	37,74	50,10866	0,55452	0,06418	0,09978	50,82196	0,75316
jul/12	325	6	26,09	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	50,00516	0,52581

jul/13	339	14	41,22	50,40284	0,70575	0,08168	0,12699	51,31204	0,81781
jul/14	351	12	38,28	50,20672	0,60493	0,07001	0,10885	50,98532	0,76245
jul/15	359	8	28,97	49,81448	0,40329	0,04668	0,07256	50,33188	0,58156
jul/16	371	12	38,06	50,20672	0,60493	0,07001	0,10885	50,98532	0,75807
jul/17	379	8	28,18	49,81448	0,40329	0,04668	0,07256	50,33188	0,5657
jul/18	388	9	31,41	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	50,49524	0,6293
jul/19	398	10	34,03	50,0106	0,50411	0,05835	0,09071	50,6586	0,68046
jul/20	407	9	30,45	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	50,49524	0,61007
jul/21	414	7	27,53	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	50,16852	0,55374
jul/22	422	8	30,82	49,81448	0,40329	0,04668	0,07256	50,33188	0,6187
jul/23	432	10	33,2	50,0106	0,50411	0,05835	0,09071	50,6586	0,66386
jul/24	439	7	29,18	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	50,16852	0,58693
jul/25	448	9	30,11	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	50,49524	0,60326
jul/26	453	5	25,85	49,5203	0,25205	0,02917	0,04535	49,8418	0,52201
jul/27	462	9	29,22	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	50,49524	0,58542
jul/28	469	7	29,64	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	50,16852	0,59618
jul/29	490	6	26,91	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	50,00516	0,54234
jul/30	499	9	29,99	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	50,49524	0,60085

jul/31	506	7	28,13	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	50,16852	0,56581
jul/32	512	6	27,2	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	50,00516	0,54818
jul/33	517	5	27,65	49,5203	0,25205	0,02917	0,04535	49,8418	0,55836
jul/34	526	9	32,41	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	50,49524	0,64934
jul/35	533	7	27,55	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	50,16852	0,55414
jul/36	543	10	29,3	50,0106	0,50411	0,05835	0,09071	50,6586	0,58588
jul/37	546	3	23,5	49,32418	0,15123	0,0175	0,02721	49,51508	0,47644
jul/38	552	6	25,65	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	50,00516	0,51695
jul/39	560	8	31,47	49,81448	0,40329	0,04668	0,07256	50,33188	0,63174
jul/40	565	5	26,23	49,5203	0,25205	0,02917	0,04535	49,8418	0,52968
jul/41	569	4	24,45	49,42224	0,20164	0,02334	0,03628	49,67844	0,49472
jul/42	572	3	23,05	49,32418	0,15123	0,0175	0,02721	49,51508	0,46732
jul/43	581	9	29,7	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	50,49524	0,59504
jul/44	588	7	29,02	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	50,16852	0,58371
jul/45	594	6	26,78	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	50,00516	0,53972
jul/46	600	6	26,93	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	50,00516	0,54274
jul/47	606	6	26,62	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	50,00516	0,53649
jul/48	612	6	26,12	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	50,00516	0,52642

jul/49	617	5	26,31	49,5203	0,25205	0,02917	0,04535	49,8418	0,5313
jul/50	624	7	28,45	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	50,16852	0,57225
jul/51	629	5	25,91	49,5203	0,25205	0,02917	0,04535	49,8418	0,52322

(1) Equação 3.24 $E_M = (0,50 + \Delta\rho)M_m g$; (2) Equação 3.25 $E_H = \Delta\rho M_h g$; (3) Equação 3.26 $E_{cb} = \Delta\rho M_{cb} g$; (4) Equação 3.27 $E_{cone} = \Delta\rho M_{cone} g$

(5) Equação 3.7 $E.S. = M_m g(0,50 + \Delta\rho) + \Delta\rho g(M_H + M_{cb} + M_{cone})$ e (6) Equação 3.28 $\eta_{IDPL} = \text{eficiência do martelo do DPL} = \frac{\int_0^{t_{max}} FV dt}{[(0,75 + \Delta\rho)M_m g]}$ (método EFV)

E_H (*) – Foram consideradas para a massa da haste, os niples de adaptação, as luvas alongadas e a haste guia a saber:

- Haste guia + haste = 2,12 kg/m * 1,85 m = 3,922 kg;
- Luvas alongadas (3 * 0,08 * 2,12 kg/m) = 0,5088 kg;
- Niple da célula superior = 0,28 kg; niple da célula inferior = 0,23 kg e niple simples = 0,20 kg; total de niples = 0,71 kg
- Massa do cone = 0,925 kg

Tabela A.2 – Resumo estatístico de medidas de energia pelo método EFV do DPL

	N total	Média (μ)	Desvio Padrão (σ)	Soma	Mínimo	Mediana	Máximo	Variância	CV (σ/μ)
Haste	50,000	447,100	127,297	22355,000	177,000	457,500	629,000	16204,418	28%
$\Delta\rho$	50,000	9,260	5,086	463,000	3,000	8,000	31,000	25,870	55%
EFV	50,000	31,771	6,702	1588,550	23,050	29,260	48,900	44,916	21%
E_M	50,000	49,938	0,499	2496,902	49,324	49,814	52,070	0,249	1%
E_H	50,000	0,460	0,253	23,001	0,149	0,397	1,540	0,064	55%
E_{cb}	50,000	0,054	0,030	2,701	0,018	0,047	0,181	0,001	55%
E_{cone}	50,000	0,113	0,062	5,630	0,036	0,097	0,377	0,004	55%
E_S	50,000	50,506	0,811	2525,306	49,508	50,305	53,972	0,657	2%
η_{IDPL}	50,000	0,635	0,126	31,75	0,467	0,586	0,955	0,015	20%

Tabela A.3 – Resumo da variação da energia do sistema (VES) com η_{IDPL} fixo em 0,635

Arquivo	$\Delta\rho$ (mm)	EFV (Joules) $EFV = \int_0^{t_{max}} Fv dt$ Equação 3.24	E_M (1) (Joules) $M_m=10,0$ kg Equação 3.18	E_H (2) (Joules) $M_H= (*)$ Equação 3.19	E_{cb} (3) (Joules) $M_{cb}=0,595$ kg Equação 3.20	$E_{cone}^{(4)}$ (Joules) $M_{cone}=0,925$ kg Equação 3.21	Varição da Energia do Sistema (5) Equação 3.7	η_{IDPL} (6) $\frac{\int_0^{t_{max}} FV dt}{[(0,75 + \Delta\rho)M_m g]}$ Equação 3.22
jul/02	23		51,18732	1,10904	0,12836	0,19955	33,940898	0,95531
jul/03	31	48,5	52,06986	1,56273	0,18087	0,28119	35,089151	0,93144
jul/04	18	44,17	50,79508	0,90739	0,10502	0,16327	33,430556	0,86957
jul/05	18	45,18	50,79508	0,90739	0,10502	0,16327	33,430556	0,88946
jul/06	14	40,27	50,40284	0,70575	0,08168	0,12699	32,920223	0,79896
jul/07	14	39,91	50,40284	0,70575	0,08168	0,12699	32,920223	0,79182
jul/08	14	40,82	50,40284	0,70575	0,08168	0,12699	32,920223	0,80987
jul/09	16	42,6	50,59896	0,80657	0,09335	0,14513	33,17539	0,84191
jul/10	10	38,89	50,0106	0,50411	0,05835	0,09071	32,409901	0,77764
jul/11	11	37,74	50,10866	0,55452	0,06418	0,09978	32,537479	0,75316
jul/12	6	26,09	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	31,899549	0,52581
jul/13	14	41,22	50,40284	0,70575	0,08168	0,12699	32,920223	0,81781

jul/14	12	38,28	50,20672	0,60493	0,07001	0,10885	32,665057	0,76245
jul/15	8	28,97	49,81448	0,40329	0,04668	0,07256	32,154725	0,58156
jul/16	12	38,06	50,20672	0,60493	0,07001	0,10885	32,665057	0,75807
jul/17	8	28,18	49,81448	0,40329	0,04668	0,07256	32,154725	0,5657
jul/18	9	31,41	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	32,282303	0,6293
jul/19	10	34,03	50,0106	0,50411	0,05835	0,09071	32,409901	0,68046
jul/20	9	30,45	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	32,282303	0,61007
jul/21	7	27,53	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	32,027127	0,55374
jul/22	8	30,82	49,81448	0,40329	0,04668	0,07256	32,154725	0,6187
jul/23	10	33,2	50,0106	0,50411	0,05835	0,09071	32,409901	0,66386
jul/24	7	29,18	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	32,027127	0,58693
jul/25	9	30,11	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	32,282303	0,60326
jul/26	5	25,85	49,5203	0,25205	0,02917	0,04535	31,771961	0,52201
jul/27	9	29,22	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	32,282303	0,58542
jul/28	7	29,64	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	32,027127	0,59618
jul/29	6	26,91	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	31,899549	0,54234
jul/30	9	29,99	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	32,282303	0,60085
jul/31	7	28,13	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	32,027127	0,56581

jul/32	6	27,2	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	31,899549	0,54818
jul/33	5	27,65	49,5203	0,25205	0,02917	0,04535	31,771961	0,55836
jul/34	9	32,41	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	32,282303	0,64934
jul/35	7	27,55	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	32,027127	0,55414
jul/36	10	29,3	50,0106	0,50411	0,05835	0,09071	32,409901	0,58588
jul/37	3	23,5	49,32418	0,15123	0,0175	0,02721	31,516794	0,47644
jul/38	6	25,65	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	31,899549	0,51695
jul/39	8	31,47	49,81448	0,40329	0,04668	0,07256	32,154725	0,63174
jul/40	5	26,23	49,5203	0,25205	0,02917	0,04535	31,771961	0,52968
jul/41	4	24,45	49,42224	0,20164	0,02334	0,03628	31,644382	0,49472
jul/42	3	23,05	49,32418	0,15123	0,0175	0,02721	31,516794	0,46732
jul/43	9	29,7	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	32,282303	0,59504
jul/44	7	29,02	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	32,027127	0,58371
jul/45	6	26,78	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	31,899549	0,53972
jul/46	6	26,93	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	31,899549	0,54274
jul/47	6	26,62	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	31,899549	0,53649
jul/48	6	26,12	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	31,899549	0,52642
jul/49	5	26,31	49,5203	0,25205	0,02917	0,04535	31,771961	0,5313

jul/50	7	28,45	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	32,027127	0,57225
jul/51	5	25,91	49,5203	0,25205	0,02917	0,04535	31,771961	0,52322

Tabela A.4 – Resumo da variação da energia do sistema (VES) com η_{IDPL} variável

Arquivo	Δp (mm)	EFV (Joules) $EFV = \int_0^{t_{max}} Fv dt$ Equação 3.24	E_M (1) (Joules) $M_m=10,0$ kg Equação 3.18	E_H (2) (Joules) $M_H= (*)$ Equação 3.19	E_{cb} (3) (Joules) $M_{cb}=0,595$ kg Equação 3.20	$E_{ccone}^{(4)}$ (Joules) $M_{ccone}=0,925$ kg Equação 3.21	Varição da Energia do Sistema (5) Equação 3.7	η_{IDPL} (6) $\frac{\int_0^{t_{max}} FV dt}{[(0,75 + \Delta p)M_m g]}$ Equação 3.22
jul/02	23	48,89	51,18732	1,10904	0,12836	0,19955	50,336709	0,95531
jul/03	31	48,5	52,06986	1,56273	0,18087	0,28119	50,52474	0,93144
jul/04	18	44,17	50,79508	0,90739	0,10502	0,16327	45,345558	0,86957
jul/05	18	45,18	50,79508	0,90739	0,10502	0,16327	46,355872	0,88946
jul/06	14	40,27	50,40284	0,70575	0,08168	0,12699	41,184273	0,79896
jul/07	14	39,91	50,40284	0,70575	0,08168	0,12699	40,824397	0,79182
jul/08	14	40,82	50,40284	0,70575	0,08168	0,12699	41,734168	0,80987
jul/09	16	42,6	50,59896	0,80657	0,09335	0,14513	43,64482	0,84191
jul/10	10	38,89	50,0106	0,50411	0,05835	0,09071	39,543413	0,77764
jul/11	11	37,74	50,10866	0,55452	0,06418	0,09978	38,458318	0,75316
jul/12	6	26,09	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	26,48172	0,52581

jul/13	14	41,22	50,40284	0,70575	0,08168	0,12699	42,134367	0,81781
jul/14	12	38,28	50,20672	0,60493	0,07001	0,10885	39,063904	0,76245
jul/15	8	28,97	49,81448	0,40329	0,04668	0,07256	29,492639	0,58156
jul/16	12	38,06	50,20672	0,60493	0,07001	0,10885	38,843998	0,75807
jul/17	8	28,18	49,81448	0,40329	0,04668	0,07256	28,702581	0,5657
jul/18	9	31,41	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	31,997801	0,6293
jul/19	10	34,03	50,0106	0,50411	0,05835	0,09071	34,683383	0,68046
jul/20	9	30,45	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	31,037983	0,61007
jul/21	7	27,53	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	27,98717	0,55374
jul/22	8	30,82	49,81448	0,40329	0,04668	0,07256	31,342749	0,6187
jul/23	10	33,2	50,0106	0,50411	0,05835	0,09071	33,853207	0,66386
jul/24	7	29,18	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	29,637258	0,58693
jul/25	9	30,11	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	30,698079	0,60326
jul/26	5	25,85	49,5203	0,25205	0,02917	0,04535	26,176662	0,52201
jul/27	9	29,22	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	29,807639	0,58542
jul/28	7	29,64	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	30,097135	0,59618
jul/29	6	26,91	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	27,301911	0,54234
jul/30	9	29,99	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	30,57779	0,60085

jul/31	7	28,13	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	28,587248	0,56581
jul/32	6	27,2	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	27,591683	0,54818
jul/33	5	27,65	49,5203	0,25205	0,02917	0,04535	27,976725	0,55836
jul/34	9	32,41	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	32,998049	0,64934
jul/35	7	27,55	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	28,007057	0,55414
jul/36	10	29,3	50,0106	0,50411	0,05835	0,09071	29,95338	0,58588
jul/37	3	23,5	49,32418	0,15123	0,0175	0,02721	23,695952	0,47644
jul/38	6	25,65	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	26,042101	0,51695
jul/39	8	31,47	49,81448	0,40329	0,04668	0,07256	31,99233	0,63174
jul/40	5	26,23	49,5203	0,25205	0,02917	0,04535	26,556483	0,52968
jul/41	4	24,45	49,42224	0,20164	0,02334	0,03628	24,711431	0,49472
jul/42	3	23,05	49,32418	0,15123	0,0175	0,02721	23,246116	0,46732
jul/43	9	29,7	49,91254	0,4537	0,05251	0,08163	30,287798	0,59504
jul/44	7	29,02	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	29,477172	0,58371
jul/45	6	26,78	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	27,171911	0,53972
jul/46	6	26,93	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	27,321759	0,54274
jul/47	6	26,62	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	27,011644	0,53649
jul/48	6	26,12	49,61836	0,30246	0,03501	0,05442	26,511987	0,52642

jul/49	5	26,31	49,5203	0,25205	0,02917	0,04535	26,636705	0,5313
jul/50	7	28,45	49,71642	0,35287	0,04084	0,06349	28,907421	0,57225
jul/51	5	25,91	49,5203	0,25205	0,02917	0,04535	26,236581	0,52322

APÊNDICE B – DEDUÇÃO DA VELOCIDADE DE QUEDA DO MARTELO DO DPL

A queda do martelo do DPL de fato não é uma queda livre, pois no deslocamento do martelo, desde a soltura até a sua colisão com a cabeça de bater, há a mobilização da resistência do atrito do martelo do DPL com a haste guia. Essa resistência pode ser modelada como se fora a resistência do ar, para as quedas no qual concorre o atrito do ar, que no caso do DPL é negligenciada.

Da cinemática pode-se arguir que a queda livre, na prática, e em específico no caso do DPL, se dá com reação do atrito ao movimento de queda provocado pela aceleração da gravidade. A Fig. B.1 mostra o esquema do martelo do DPL que se desloca em 500 mm e tem velocidade final de 3,13 m/s se negligenciada a reação do atrito. A orientação do eixo dos “y” no sentido positivo faz com que a força peso seja representada pela Eq. B.1 e a respectiva reação pela Eq. B.2:

$$P = -mg \quad (B.1)$$

$$R_a = -bv \quad (B.2)$$

onde:

R_a = força de reação;

v =velocidade de queda;

m =massa do martelo do DPL;

b =coeficiente de atrito; e

g =aceleração da gravidade.

A Fig. B.1 apresenta um esquema do martelo do DPL. A força peso ($P=mg$) tem a força de reação representada pelo atrito ($R_a=-bv$). Ora, o coeficiente b com sinal negativo serve para modelar a reação com o sentido contrário ao sentido vetorial da velocidade, se a velocidade tem sentido negativo em relação ao eixo “y”, o sinal de b é negativo para garantir o sentido positivo da reação de atrito (R_a). Nota-se que a proporcionalidade do coeficiente “b” pode conduzir a uma discussão do problema, pois em termos práticos a velocidade não anula a força P (peso), mas a tende a manter a queda do martelo com uma velocidade constante. Do pressuposto desse equilíbrio fazendo a igualdade entre as equações B.1 e B.2, tem-se:

$$v = \frac{mg}{b} \quad (B.3)$$

Estabelecendo v como a velocidade terminal (v_t) ou constante pode-se escrever a Equação B.3 como:

$$vt = \frac{mg}{b} \quad (\text{B.4})$$

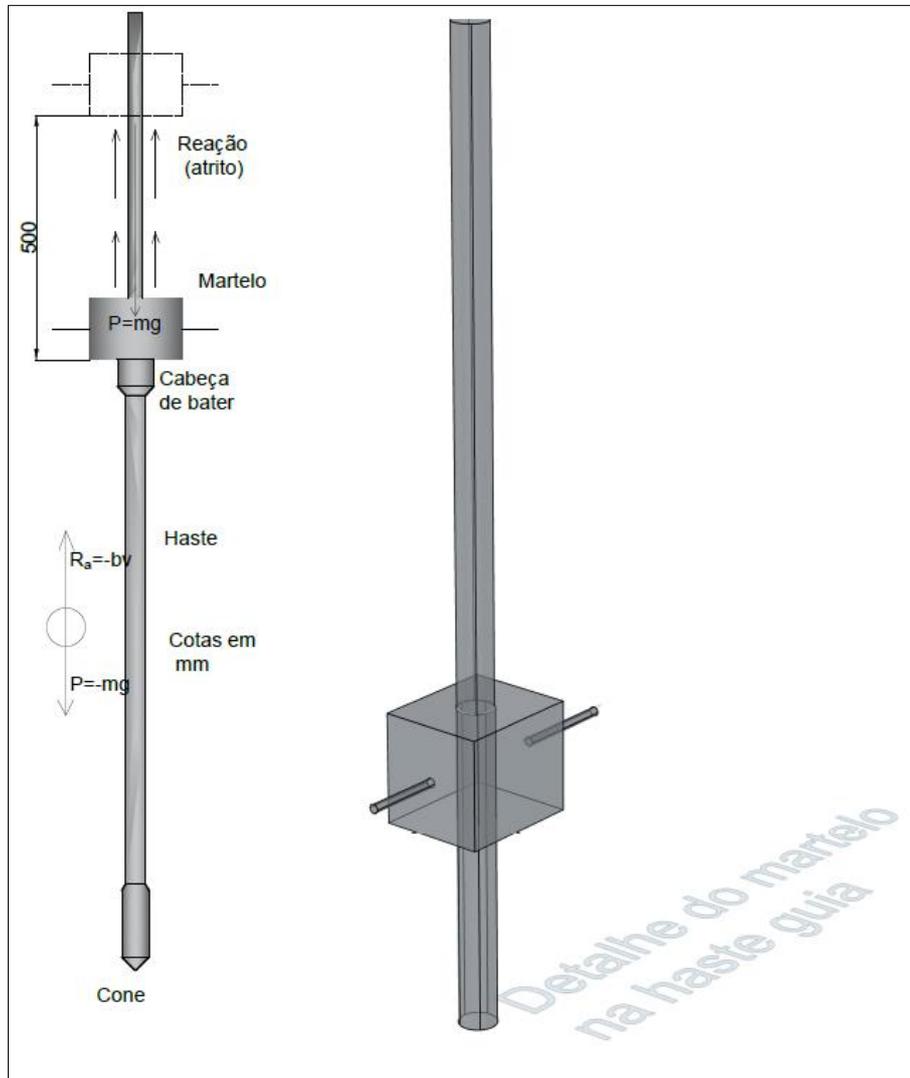


Figura B.1 –Esquema da queda do martelo do DPL

Aplicando a segunda Lei de Newton, com base no que apresenta o esquema na Figura B.1 tem-se a soma vetorial:

$$-(mg - bv) = m \frac{dv}{dt} \quad (\text{B.5})$$

Dividindo a equação I.5 por $-m$, tem-se:

$$g + \frac{bv}{m} = -\frac{dv}{dt} \quad (\text{B.6})$$

Integrando e reordenando a equação I.5, tem-se:

$$\int_0^t dt = \int_0^v \frac{v}{g + \frac{b}{m}v}; \left| \begin{array}{l} u = g + \frac{b}{m}v \\ du = \frac{b}{m}dv \end{array} \right|, \text{ isso implica na mudança dos limites da integração para}$$

quando $v=0$, o limite inferior é igual a g ; e quando $v=v$ o limite superior é $bv/m + g$, assim:

$$-t = \int_g^{g+\frac{bv}{m}} \frac{mdu}{bu} = \frac{m}{b} \ln u; \quad -\frac{bt}{m} = \ln \left(\frac{g + \frac{b}{m}v}{g} \right); \quad e^{-bt/m} = \frac{g + \frac{b}{m}v}{g}$$

$$ge^{-bt/m} = g + \frac{bv}{m}; \quad -\frac{bv}{m} = g - ge^{-bt/m} \Rightarrow -\frac{bv}{m} = g \left(1 - e^{-bt/m} \right)$$

Pode-se deduzir, então a velocidade em função do tempo:

$$v(t) = \frac{-mg}{b} \left(1 - e^{-bt/m} \right) \tag{B.7}$$

Substituindo I.4 em I.7 tem-se:

$$v(t) = -vt \left(1 - e^{-bt/m} \right) \tag{B.8}$$

A Equação B.8, mostra que a velocidade cresce até o limite de t tendendo ao infinito. A Fig. B.2 apresenta a velocidade de queda até o limite da velocidade terminal (vt).

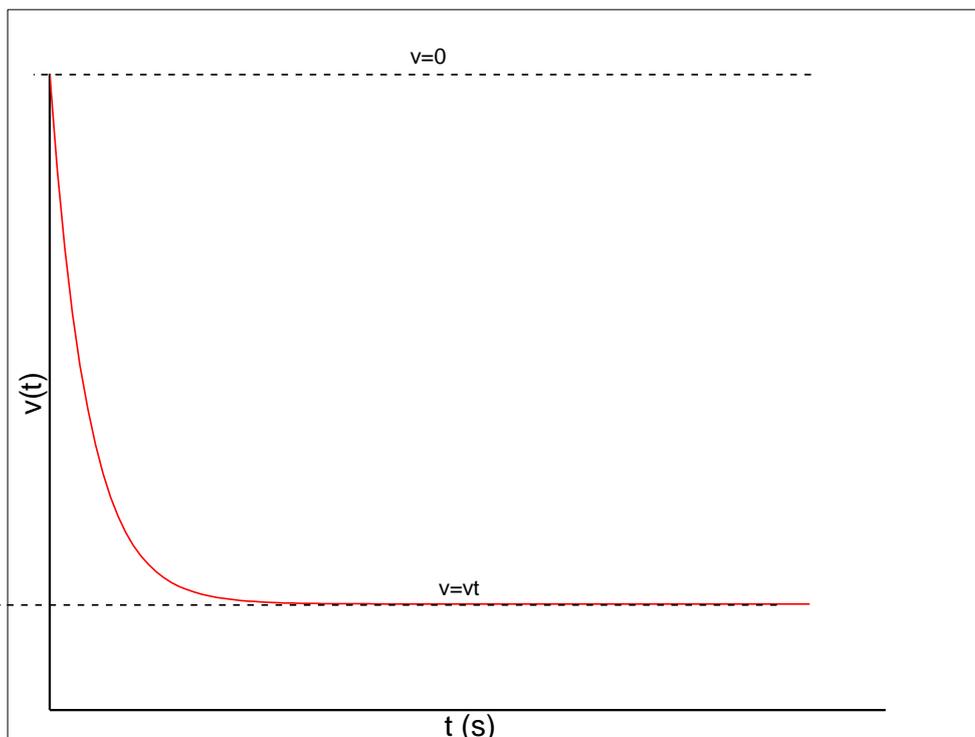


Figura B.2 – Velocidade de queda com reação até o limite da velocidade terminal

A aceleração na queda livre com reação do atrito pode ser deduzida como se segue.

Reescrevendo a equação B.8 tem-se:

$$v(t) = -vt + vt \times e^{-bt/m} \quad (\text{B.9})$$

Sabendo que a aceleração é $a = \frac{dv}{dt}$ pode-se derivar a Equação B.9:

$$\frac{dv}{dt} = vt \left(e^{-bt/m} \right) \left(\frac{-b}{m} \right) \quad (\text{B.10})$$

Simplificando B.10, tem-se:

$$a = -\frac{b}{m} vt \left(e^{-bt/m} \right) \quad (\text{B.11})$$

Substituindo I.4 em I.11, tem-se:

$$a = -\frac{b}{m} \left(\frac{mg}{b} \right) \left(e^{-bt/m} \right)$$

$$a = -g \left(e^{-bt/m} \right) \quad (\text{B.12})$$

A Fig. B.3 apresenta a aceleração que varia até o ponto em que passa a ser constantes.

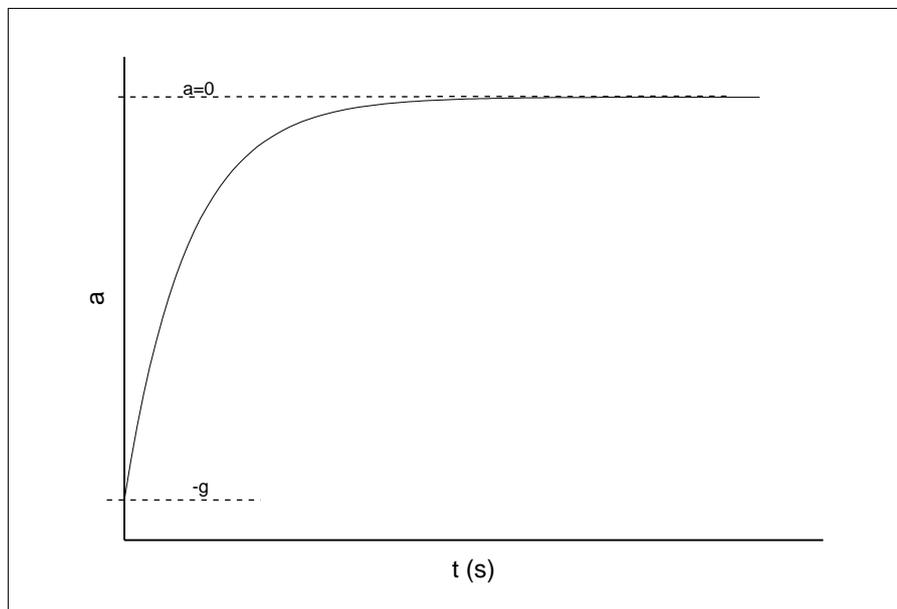


Figura B.3 –Variação da aceleração na queda livre com reação

A velocidade é a variação da altura de queda em função do tempo, desse modo e, considerando a altura (h) como o eixo y tem-se:

$$v = \frac{dh}{dt} \Rightarrow \int_0^h dh = \int_0^t v dt \quad (\text{B.13})$$

Simplificando e substituindo B.8 em B.13, tem-se

$$\Delta h = \int_0^t -vt \left(1 - e^{-bt/m}\right) dt \quad (\text{B.14})$$

Simplificando B.14:

$$\begin{aligned} \Delta h &= \int_0^t -vt \left(1 - e^{-bt/m}\right) dt \\ \Delta h &= -vt \int_0^t 1 - e^{-bt/m} dt \\ \Delta h &= -vt \left[\int_0^t dt - \int_0^t e^{-bt/m} dt \right] \\ \Delta h &= -\Delta h = -vt \left[t \int_0^t e^{-bt/m} dt \right] \quad \left\{ \begin{array}{l} u = \frac{-bt}{m} \\ du = \frac{-b}{m} dt \end{array} \right. \end{aligned} \quad (\text{B.15})$$

Trocando os limites da integral:

$$\begin{aligned} \Delta h &= -vt \left[t \int_0^{-bt/m} e^u \left(-\frac{mdu}{b} \right) \right] \Rightarrow \Delta h = -vt \left[t + \frac{m}{b} e^u \right]_0^{-bt/m} \\ \Delta h &= -vt \left[t + \frac{m}{b} e^u \right]_0^{-bt/m} \end{aligned} \quad (\text{B.16})$$

Assim a formulação da variação da altura em função do tempo é dada pela Eq. I.17:

$$\Delta h = -vt \left[t + \frac{m}{b} \left(e^{-bt/m} - 1 \right) \right] \quad (\text{B.17})$$

A Fig. I.4 apresenta um esquema que esclarece o efeito do atrito da haste guia com o martelo do DPL. Nota-se que a variação de tempo é maior que a expectativa para o fenômeno de queda livre.

Embora exaustiva, a demonstração feita para a queda livre com reação do atrito serve para demonstrar que as equações do movimento de queda livre, se consideradas as forças de reação (atrito), servem para determinar a velocidade de impacto do martelo do DPL com a cabeça de bater. De fato, as equações 3.40, 3.43, 3.45 não solucionam a determinação do fator de atrito b , mas esclarecem que para uma altura determinada e invariável (assim se supõe que seja o caso da queda do martelo do DPL) pode ser determinada a velocidade do martelo até instantes antes

de colidir com a cabeça de bater. Ressalta-se que a velocidade de queda é uma linearidade em relação ao tempo ($v=gt$).

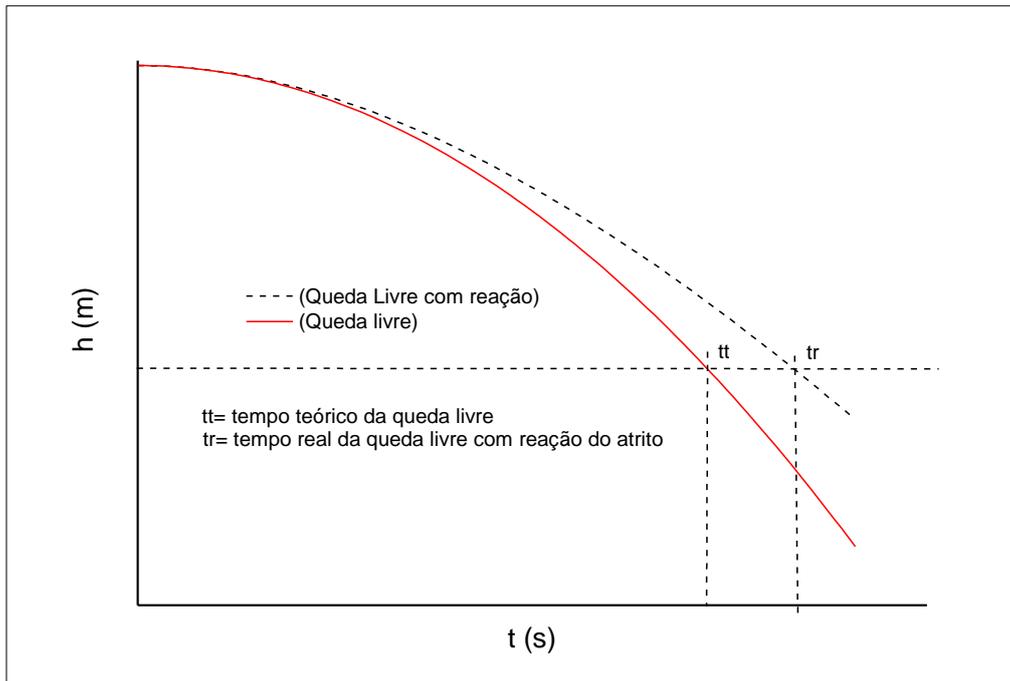


Figura B.4 –Esquema do acréscimo de tempo causado pelo atrito do martelo com a haste guia do DPL

Do mesmo modo também se explica o tempo maior que o tempo teórico da formulação clássica da cinemática para a determinação da altura de queda ($h=1/2 gt^2$). Desse modo, pode-se construir uma função para determinar a aceleração já atenuada pelo fator de atrito, de modo discreto para cada tempo medido da queda do martelo (t_m), estabelecendo como altura de queda nominal do martelo (h) igual a 0,5 metros como fator constante. Assim, também para a velocidade de impacto após o cálculo da aceleração atenuada pelo atrito. As equações que se seguem mostram a aceleração atenuada pelo atrito (gr) e a velocidade real (vr), a partir do tempo de queda medido (t_m):

$$gr = \frac{2h}{t_m^2} \text{ como } h=0,5 \Rightarrow gr = \frac{1}{t_m^2} \quad (\text{B.18})$$

$$vr = gr \times t_m \quad (\text{B.19})$$

A partir dessa concepção teórica fez-se a medida do tempo real ou tempo medido da queda do martelo do DPL. Foram realizadas 107 solturas ou quedas do martelo do DPL filmadas em velocidade de 60 quadros por segundo com dois operadores que se alternaram na soltura do martelo. A Fig. B.5 mostra o histograma e a distribuição normal do tempo medido (t_m). O coeficiente de variação de 2,2% mostra que o tempo medido teve baixa variabilidade. A velocidade de impacto do martelo (vr), calculada a partir da média do tempo medido e com o

emprego das Equações B.18 e B.19 foi definida em 2,97 m/s. A Tabela B.1 apresenta o resultado dos ensaios para a medida da velocidade de impacto do martelo do DPL.

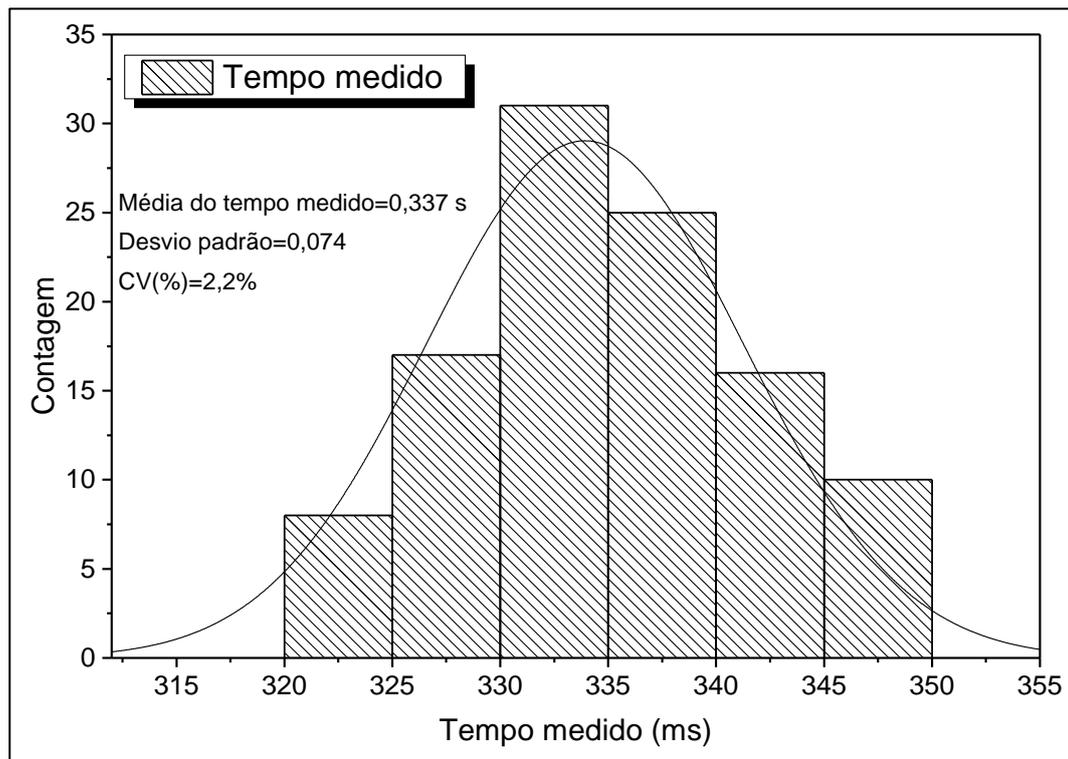


Figura B.5 – Histograma e distribuição normal do tempo medido na queda do martelo do DPL

Tabela B.1 – Resultados dos ensaios para determinação da velocidade inicial de impacto do martelo DPL

Ensaio	Tempo inicial (s)	Tempo Final (s)	Tempo medido (s)	Equação 3.46 (gr) (m/s ²)	Equação 3.47 (v) (m/s)
1	0,07	0,415	0,345	8,401596303	2,898550725
2	0,0925	0,415	0,3225	9,614806802	3,100775194
3	0,165	0,51	0,345	8,401596303	2,898550725
4	0,1	0,43	0,33	9,182736455	3,03030303
5	0,185	0,515	0,33	9,182736455	3,03030303
6	0,15875	0,485	0,32625	9,395047049	3,0651341
7	0,13	0,465	0,335	8,910670528	2,985074627
8	0,085	0,415	0,33	9,182736455	3,03030303
9	0,065	0,4	0,335	8,910670528	2,985074627
10	0,0875	0,42125	0,33375	8,977542117	2,996254682
11	0,05875	0,39625	0,3375	8,77914952	2,962962963
12	0,07	0,4	0,33	9,182736455	3,03030303
13	0,035	0,365	0,33	9,182736455	3,03030303
14	0,065	0,4	0,335	8,910670528	2,985074627
15	0,035	0,3675	0,3325	9,045169314	3,007518797
16	0,065	0,414375	0,349375	8,192498104	2,862254025
17	0,0575	0,4	0,3425	8,524694976	2,919708029
18	0,035	0,365	0,33	9,182736455	3,03030303
19	0,13	0,45	0,32	9,765625	3,125
20	0,045	0,385	0,34	8,650519031	2,941176471

21	0,1	0,425	0,325	9,467455621	3,076923077
22	0,2725	0,615	0,3425	8,524694976	2,919708029
23	0,085	0,4325	0,3475	8,281144868	2,877697842
24	0,15	0,475	0,325	9,467455621	3,076923077
25	0,1125	0,435	0,3225	9,614806802	3,100775194
26	0,09	0,415	0,325	9,467455621	3,076923077
27	0,065	0,41375	0,34875	8,221888208	2,867383513
28	0,05	0,3875	0,3375	8,77914952	2,962962963
29	0,1	0,44375	0,34375	8,462809917	2,909090909
30	0,085	0,43375	0,34875	8,221888208	2,867383513
31	0,085	0,43125	0,34625	8,341044455	2,888086643
32	0,15	0,4875	0,3375	8,77914952	2,962962963
33	0,10625	0,45	0,34375	8,462809917	2,909090909
34	0,035	0,365	0,33	9,182736455	3,03030303
35	0,085	0,415	0,33	9,182736455	3,03030303
36	0,05	0,385	0,335	8,910670528	2,985074627
37	0,115	0,45	0,335	8,910670528	2,985074627
38	0,05	0,3875	0,3375	8,77914952	2,962962963
39	0,0675	0,4	0,3325	9,045169314	3,007518797
40	0,1	0,425	0,325	9,467455621	3,076923077
41	0,0575	0,4	0,3425	8,524694976	2,919708029
42	0,05	0,375	0,325	9,467455621	3,076923077
43	0,035	0,365	0,33	9,182736455	3,03030303
44	0,02875	0,36625	0,3375	8,77914952	2,962962963
45	0,02875	0,35375	0,325	9,467455621	3,076923077
46	0,02125	0,35	0,32875	9,252699909	3,041825095
47	0,01625	0,34125	0,325	9,467455621	3,076923077
48	0,02875	0,35375	0,325	9,467455621	3,076923077
49	0,03375	0,37125	0,3375	8,77914952	2,962962963
50	0,025	0,36625	0,34125	8,587261335	2,93040293
51	0,02875	0,3625	0,33375	8,977542117	2,996254682
52	0,02875	0,35	0,32125	9,689775773	3,112840467
53	0,365	0,7025	0,3375	8,77914952	2,962962963
54	0,03125	0,375	0,34375	8,462809917	2,909090909
55	0,0375	0,375	0,3375	8,77914952	2,962962963
56	0,0375	0,37125	0,33375	8,977542117	2,996254682
57	0,0875	0,4125	0,325	9,467455621	3,076923077
58	0,02875	0,36	0,33125	9,113563546	3,018867925
59	0,02875	0,35875	0,33	9,182736455	3,03030303
60	0	0,335	0,335	8,910670528	2,985074627
61	0,1	0,43	0,33	9,182736455	3,03030303
62	0,085	0,415	0,33	9,182736455	3,03030303
63	0,085	0,43125	0,34625	8,341044455	2,888086643
64	0	0,34	0,34	8,650519031	2,941176471
65	0,05	0,39375	0,34375	8,462809917	2,909090909
66	0,085	0,425	0,34	8,650519031	2,941176471
67	0,23	0,575	0,345	8,401596303	2,898550725

68	0,14125	0,475	0,33375	8,977542117	2,996254682
69	0,15	0,4825	0,3325	9,045169314	3,007518797
70	0,04125	0,375	0,33375	8,977542117	2,996254682
71	0,075	0,40875	0,33375	8,977542117	2,996254682
72	0,13375	0,475	0,34125	8,587261335	2,93040293
73	0,10875	0,45	0,34125	8,587261335	2,93040293
74	0,24125	0,575	0,33375	8,977542117	2,996254682
75	0,175	0,50875	0,33375	8,977542117	2,996254682
76	0,275	0,60875	0,33375	8,977542117	2,996254682
77	0,07125	0,40875	0,3375	8,77914952	2,962962963
78	0,075	0,40375	0,32875	9,252699909	3,041825095
79	0,075	0,40875	0,33375	8,977542117	2,996254682
80	0,075	0,41875	0,34375	8,462809917	2,909090909
81	0,34125	0,6875	0,34625	8,341044455	2,888086643
82	0,24625	0,57125	0,325	9,467455621	3,076923077
83	0,265	0,585	0,32	9,765625	3,125
84	0,1	0,4375	0,3375	8,77914952	2,962962963
85	0,1625	0,4875	0,325	9,467455621	3,076923077
86	0,19625	0,51625	0,32	9,765625	3,125
87	0,26625	0,60375	0,3375	8,77914952	2,962962963
88	0,135	0,475	0,34	8,650519031	2,941176471
89	0,335	0,6625	0,3275	9,323465998	3,053435115
90	0,115	0,45	0,335	8,910670528	2,985074627
91	0,185	0,515	0,33	9,182736455	3,03030303
92	0,265	0,585	0,32	9,765625	3,125
93	0,3	0,6375	0,3375	8,77914952	2,962962963
94	0,135	0,465	0,33	9,182736455	3,03030303
95	0,235	0,57875	0,34375	8,462809917	2,909090909
96	0,3	0,625	0,325	9,467455621	3,076923077
97	0,215	0,55	0,335	8,910670528	2,985074627
98	0,13	0,465	0,335	8,910670528	2,985074627
99	0,115	0,45	0,335	8,910670528	2,985074627
100	0,25	0,575	0,325	9,467455621	3,076923077
101	0,13	0,465	0,335	8,910670528	2,985074627
102	0,4	0,735	0,335	8,910670528	2,985074627
103	0,235	0,565	0,33	9,182736455	3,03030303
104	0,15	0,485	0,335	8,910670528	2,985074627
105	0,185	0,50875	0,32375	9,540704521	3,088803089
106	0,385	0,715	0,33	9,182736455	3,03030303
107	0,135	0,465	0,33	9,182736455	3,03030303

APÊNDICE C – INTERPRETAÇÃO DA EQUAÇÃO DA ONDA EM MEIO ELÁSTICO SÓLIDO

Danziger (1991), descreve que as primeiras tentativas de solução da Equação da Onda, vista na forma da Equação 2.11 , aqui reescrita como Eq. C.1, que têm a seguinte trajetória histórica: D'Alembert (1747), Euler (1748) e Bernoulli (1753):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (\text{C.1})$$

As seções subsequentes tratam, especificamente, da interpretação da Equação H1, e sua solução, dada por D'Alembert (1747), no contexto da propagação da onda de tensão em barras.

C.1 – INTERPRETAÇÃO FÍSICA DE D'ALEMBERT

Segundo Danziger (1991), D'Alembert (1747) e Euler (1748) concluíram que a solução da Equação pode ser da forma apresentada na Eq. C.2, que passou a se denominar solução D'Alembert (Danziger, 1991):

$$u = f(x - ct) + g(x + ct) \quad (\text{C.2})$$

As funções f e g representam duas ondas de deslocamento propagando-se em sentidos contrários, com velocidade c . As análises que se seguem sobre a Equação diferencial, expressa pela Equação C.2, têm como base Timoshenko e Goodier (1951), Wylie (1951), Danziger (1991), Clough e Penzien (1975), Figueiredo (1977), Gonçalves *et al.* (1996), Cavalcante (2002), Odebrecht (2003).

Derivando a Equação C.2 tem-se a velocidade como mostra a Eq. C.3:

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = cf'(x - ct) + cg'(x + ct) \quad (\text{C.3})$$

A derivada da Equação H.3 é a aceleração como se apresenta na Eq. C.4:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 f''(x - ct) + c^2 g''(x + ct) \quad (\text{C.4})$$

A deformação é a derivada da Equação C.2 em relação ao espaço, visto na Eq. C.5:

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} = f'(x - ct) + g'(x + ct) \quad (\text{C.5})$$

Assim, por semelhança deriva-se Equação C.5 e tem-se a Eq. C.6:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = f''(x-ct) + g''(x+ct) \quad (\text{C.6})$$

Observa-se, como fez Cavalcante (2002), que colocando c^2 em evidência na Equação C.4 e comparando com a Equação C.6 fica claro que a solução dada na Equação C.2 satisfaz a Equação C1. Timoshenko e Goodier (1951) explicam que para qualquer função do tipo seno (w), $\cos(w)$, e_w , w_n , sendo w igual a $(x-ct)$ ou $(x+ct)$ é solução da equação de movimento.

Para Timoshenko e Goodier (1951) e Clough e Penzien (1975) a solução da Equação C.2 tem uma interpretação física muito simples que pode ser explicada da seguinte maneira: a Equação C.2 representa um par de ondas que se deslocam nos sentidos positivo e negativo ao longo de uma barra. Várias abstrações sobre a solução da Equação C.2 estão disponíveis em várias obras que tratam sobre a propagação de onda de tensão em meio elástico sólido. Por entender que se trata de um trabalho da Engenharia Geotécnica, adotou-se, aqui, a racionalização apresentada em Cavalcante (2002).

Ao igualar um dos termos da Equação C.2 a zero, por exemplo a função $g(x+ct)$, tem-se que:

$$u = f(x-ct) \quad (\text{C.7})$$

Dessa forma, se $u = s$ quando $t = t_1$ e $x = x_1$ e, $u = s$ quando $t = t_2$ e $x = x_2$, conforme Fig. C.1(a), tem-se:

$$s = f(x_1 - ct_1) = f(x_2 - ct_2) \quad (\text{C.8})$$

Simplificando a Equação C.9:

$$x_1 - ct_1 = x_2 - ct_2 \quad (\text{C.9})$$

Isolando c , tem -se:

$$c = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (\text{C.10})$$

A Equação H.10 mostra que c é um valor constante e positivo com $t_2 > t_1$. Isso demonstra que a Equação H.7 representa uma onda longitudinal de tensão, propagando-se no sentido crescente de x . Contudo, se na Equação H.2 a função $f(x-ct)$ for igualada a zero, tem-se que,

$$u = g(x+ct) \quad (\text{C.11})$$

De acordo com a Figura C.1(b), tem-se:

$$s = g(x_1 + ct_1) = g(x_2 + ct_2) \quad (\text{C.12})$$

$$x_1 + ct_1 = x_2 + ct_2 \quad (\text{C.13})$$

Portanto,

$$c = \frac{x_2 - x_1}{t_1 - t_2} \quad (\text{C.14})$$

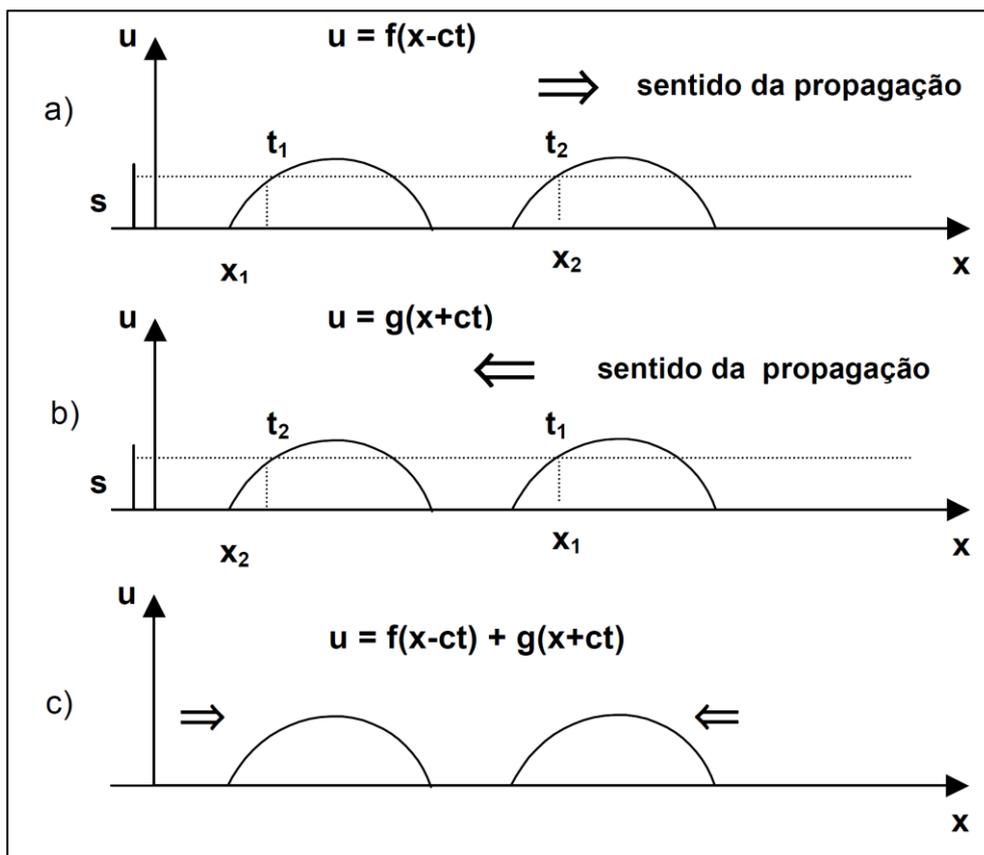


Figura C.1 – Ilustração esquemática dos sentidos de ondas longitudinais (Cavalcante, 2002)

Observa-se na Eq. C.14 que c é um valor constante e positivo e $t_2 > t_1$, x_2 será menor que x_1 . Conclui-se que a Eq. C.11 representa uma onda longitudinal de tensão propagando-se no sentido descendente do eixo x . As formulações C.7 e C.11 são soluções independentes da equação diferencial linear H.1e quando combinadas a solução geral. A Figura C1 mostra que numa dada seção da haste, num certo tempo t , os efeitos de cada solução, C.1(a) e C.1(b), podem ser adicionados para dar uma solução final (superposição dos efeitos) C.1 (c).

C.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS CONDIÇÕES DE CONTORNO DA PROPAGAÇÃO DE ONDA DE TENSÃO EM UMA BARRA UNIFORME

Para Clough e Penzien (1975), a propagação de uma onda de tensão através de uma barra uniforme é controlada pelas condições impostas nas extremidades da barra, isto é, a forma de onda no interior da barra é gerada pelas exigências de equilíbrio de compatibilidade e às condições de contorno.

Assim como para abstração da interpretação física da equação da onda há vários autores, as condições de contorno da propagação de onda de tensão em uma barra de tensão, também estão na literatura com vários autores, entre outros Clough e Penzien (1975); Gonçalves et. al, 1996; Cavalcante (2002) e Odebrecht (2003). A dedução, aqui, foi feita segundo Cavalcante 2002).

Nakao (1981), Danziger (1991), Gonçalves et. al (1996), Cavalcante (2002), Odebrecht (2003) Velloso e Lopes (2004), adotaram para representar a propagação de duas ondas em sentidos contrários uma notação que consiste de flechas indicativas do sentido da propagação. Segundo Danziger (1991), essa notação é de Janz *et al.* (1976) e é conhecida como solução de impedância. As setas acompanham as ondas descendentes e ascendentes que caminham ao longo da estaca, modificando-as em função das condições de contorno que incluem as resistências do solo e as mudanças na seção transversal da estaca. Dessa maneira pode-se escrever:

$$\downarrow v = \frac{\sigma \times c}{E} = \frac{\downarrow F}{Z} \text{ onda longitudinal de tensão descendente} \quad (\text{C.15})$$

$$\uparrow v = \frac{\sigma \times c}{E} = -\frac{\uparrow F}{Z} \text{ onda longitudinal de tensão descendente} \quad (\text{C.16})$$

$$u = \downarrow f(x - ct) + \uparrow g(x + ct) = \downarrow u + \uparrow u \quad (\text{H.17})$$

Nota-se, da leitura das Equações C.15, C.16, que as forças e as tensões, quando de compressão, são positivas; a velocidade de deformação e os deslocamentos quando têm o sentido descendente, também, são positivas. A seguir são discutidas as condições de contorno para haste com extremidade livre, haste com extremidade fixa, composição de hastes com atrito lateral e impedância ou mudança de área das hastes.

C.2.1 EXTREMIDADE LIVRE

A Fig. H.2 (a) mostra a haste com reação na extremidade igual a zero ($R=0$). Nesse caso, a extremidade da estaca encontra-se livre e a ponta da estaca se desloca. A onda de compressão ao atingir a extremidade inferior da haste reflete-se como onda de tração. O equilíbrio será mantido por uma retomada de aceleração da haste com a consequente velocidade refletida com o mesmo sinal e com o valor dobrado. A dedução dessa condição de contorno segue nas Eq. C.18, C.19, C.20, C.21, C.22:

$$R = F \downarrow + F \uparrow = 0 \quad (\text{C.18})$$

$$F \downarrow = -F \downarrow$$

$$e \quad (\text{C.19})$$

$$V = V \downarrow + V \downarrow \quad (\text{C.20})$$

$$V = \frac{F \downarrow}{Z} - \frac{F \downarrow}{Z} \quad (\text{C.21})$$

$$V = \frac{F \downarrow}{Z} - \left(\frac{F \downarrow}{Z} \right) = 2 \frac{F \downarrow}{Z} = 2V \quad (\text{C.22})$$

C.2.2 EXTREMIDADE FIXA

A Fig. H.2 (b) mostra a haste com reação infinita na extremidade ($R=\infty$). Nesse caso, a velocidade é igual a zero e haste é indeslocável. A onda de compressão ao atingir a extremidade inferior da haste reflete-se como onda, também de compressão e a velocidade é refletida com sinal oposto com a duplicação da força na extremidade da haste. A dedução dessa condição de contorno segue nas Eq. C.23, C.24, C.25, C.26 e C.27:

$$V = V \downarrow + V \downarrow = 0 \quad (\text{C.23})$$

$$V \downarrow = -V \downarrow \quad (\text{C.24})$$

$$F = F \downarrow + F \uparrow \quad (\text{C.25})$$

$$F = ZV \downarrow - ZV \uparrow \quad (\text{C.26})$$

$$F = ZV \downarrow - (-ZV \uparrow) = 2ZV \downarrow = 2F \downarrow \quad (\text{C.27})$$

C.2.3 EXTREMIDADE COM RESISTÊNCIA FINITA

A Fig. H.2 (c) mostra a haste com reação finita na extremidade (R). Nesse caso, o esforço final na extremidade inferior da haste é igual à resistência equivalente oferecida pelo solo. Há três conclusões para essa condição de contorno: se R for igual a $F \downarrow$, não haverá reflexão de onda na extremidade; se R for menor que $F \downarrow$, a onda refletida será de tração; e se R for maior que $F \downarrow$, a onda refletida será de compressão. A dedução dessa condição de contorno segue nas Eq. C.28, C.29 e C.30:

$$R = F \downarrow + F \uparrow \Rightarrow F \downarrow = R - F \uparrow \quad (C.28)$$

e

$$V \downarrow = -\frac{F \downarrow}{Z} = -\frac{1}{Z}(R - F \uparrow) \quad (C.29)$$

$$V = V \downarrow + V \uparrow = \frac{F \downarrow}{Z} - \frac{1}{Z}(R - F \uparrow) = \frac{(2F \downarrow - R)}{Z} \quad (C.30)$$

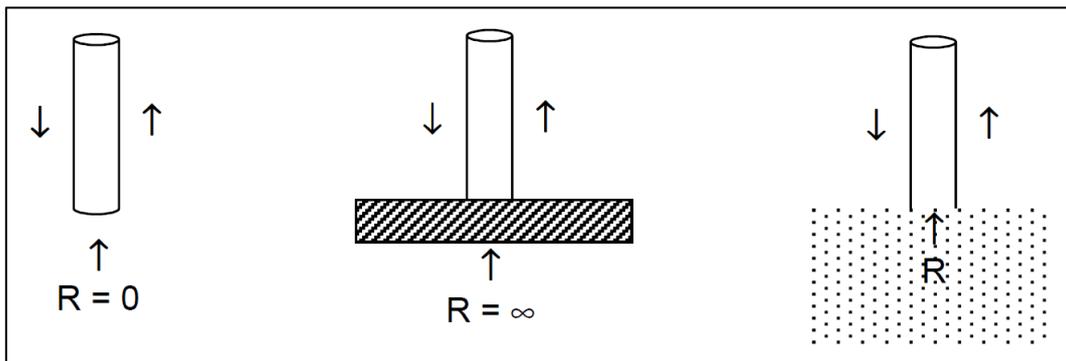


Figura C.2 – Condições de contorno para a solução geral da equação diferencial linear de propagação de ondas longitudinais de tensão (Cavalcante, 2002)

C.2.4 COMPOSIÇÃO DE HASTES COM ATRITO LATERAL

A Fig. C.3 (a) mostra a mobilização do atrito lateral na haste. A dedução dessa condição de contorno segue nas Eq. C.31, C.32, C.33, C.34, C.35, C.36, C.37, C.38, C.39 e C.40:

$$F_1 \downarrow + F_1 \downarrow = F_2 \downarrow + F_2 + A_L \quad (C.31)$$

$$V_1 \downarrow + V_1 \downarrow = V_2 \downarrow + V_2 \uparrow \quad (C.32)$$

$$\frac{F_1 \downarrow}{Z_1} + \left(-\frac{F_1 \uparrow}{Z_1} \right) = \frac{F_2 \downarrow}{Z_2} + \left(-\frac{F_2 \uparrow}{Z_2} \right) \quad (\text{C.33})$$

Como $Z_1=Z_2$, logo:

$$F_1 \downarrow - F_1 \uparrow = F_2 \downarrow - F_2 \uparrow \quad (\text{C.34})$$

Assim,

$$F_1 \downarrow - F_1 \uparrow = F_2 \downarrow - F_2 \uparrow \quad (\text{C.35})$$

A Eq. H.31 pode ser escrita assim:

$$F_1 \downarrow - F_2 \downarrow = -F_1 \uparrow + F_2 \uparrow + A_L \quad (\text{C.36})$$

Fazendo a igualde H.35 com H.36, tem-se:

$$F_1 \uparrow - F_2 \uparrow = -F_1 \uparrow + F_2 \uparrow + A_L \quad (\text{C.37})$$

$$2F_1 \uparrow = 2F_2 \uparrow + A_L \quad (\text{C.38})$$

Desse modo tem-se duas soluções:

$$F_1 \uparrow = F_2 \uparrow + \frac{A_L}{2} \quad (\text{C.39})$$

$$F_2 \downarrow = F_1 \downarrow - \frac{A_L}{2} \quad (\text{C.40})$$

Conclui-se que a amplitude da força descendente é reduzida pela metade do valor do atrito lateral. Por outro lado, a força refletida é aumentada do mesmo valor.

C.2.5 IMPEDÂNCIA OU MUDANÇA DE ÁREA DAS HASTES

Com foco na Figura C3(b) tem-se:

$$Z_1 = \frac{E_1 \times a_1}{c_1} \quad (\text{C.41})$$

$$Z_2 = \frac{E_2 \times a_2}{c_{21}} \quad (\text{C.42})$$

E, a e c, são, respectivamente, o módulo de elasticidade, a área e a velocidade de propagação da onda longitudinal. Sabe-se que $F_{1\downarrow}$ e $F_{2\uparrow}$ são as forças oriundas das ondas longitudinais de tensão ascendente e descendente que alcançaram a descontinuidade (encontro das seções) de cada haste; $F_{1\uparrow}$ e $F_{2\downarrow}$ são as forças longitudinais de tensões refletidas, ascendentes e descendentes em cada haste. As seções na Figura C.3(b) estão em equilíbrio, então tem-se:

$$F_{1\downarrow} + F_{1\uparrow} = F_{2\downarrow} + F_{2\uparrow} \quad (C.43)$$

Como $V_1 = V_2$ tem-se:

$$\frac{F_{1\downarrow}}{Z_1} + \left(-\frac{F_{1\uparrow}}{Z_1}\right) = \frac{F_{2\downarrow}}{Z_2} + \left(-\frac{F_{2\uparrow}}{Z_2}\right) \quad (C.44)$$

Da combinação das duas equações acima, tem-se:

$$F_{1\uparrow} = \frac{-Z_1 + Z_2}{Z_1 + Z_2} F_{1\downarrow} + \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} F_{2\uparrow} \quad (C.45)$$

e

$$F_{2\downarrow} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} F_{2\uparrow} + \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} F_{1\downarrow} \quad (C.46)$$

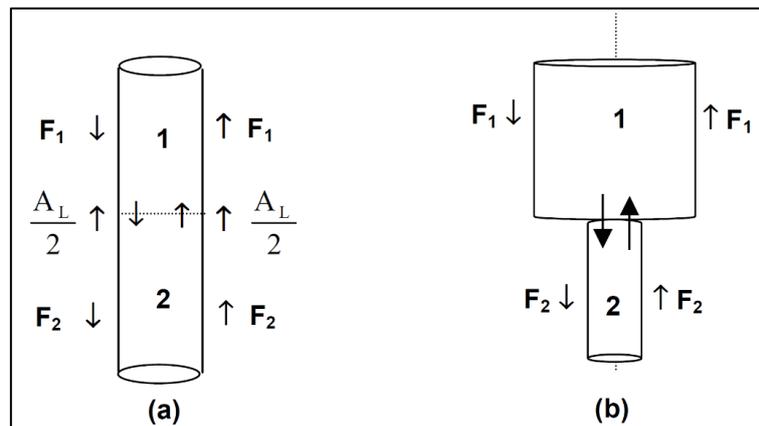


Figura C.3 – Condições de contorno para a solução geral da equação diferencial linear de propagação de ondas longitudinais de tensão – atrito lateral e impedância (Cavalcante, 2002)

As hastes sendo do mesmo material, as equações C.45 e C.46 podem ser expressas como se segue:

$$F_{1\uparrow} = \frac{-a_1 + a_2}{a_1 + a_2} F_{1\downarrow} + \frac{2a_1}{a_1 + a_2} F_{2\uparrow} \quad (C.47)$$

$$F_2 \downarrow = \frac{a_1 - a_2}{a_1 + a_2} F_2 \uparrow + \frac{2a_2}{a_1 + a_2} F_1 \downarrow \quad (\text{C.48})$$

Pode-se concluir, no exame da Figura C.3(b) e fazendo $F_2 \uparrow = 0$ por duas condições:

- a) Se $a_2 \ll a_1$ (a_2 muito menor que a_1) então a_2/a_1 tende a zero e descontinuidade das seções representa a condição de ponta livre;
- b) Se $a_2 \gg a_1$ (a_2 muito maior que a_1) então a_2/a_1 tende ao infinito e descontinuidade representa a condição de um engastamento.

Cavalcante (2002) lembra que Belincanta (1985) alerta que as equações C.47 e C.48 são relações aproximadas entre força e impedância. As interações nas proximidades da seção e a brusca mudança de seção tornam a transmissão de ondas de tensão bem mais complexa do que o formulado teoricamente.

C.3 CHOQUE ENTRE BARRAS

As condições de contorno para choque entre barras foram explicadas por *Augustus Edward Hough Love* no livro *A treatise on the mathematical theory of elasticity*, que teve edições em 1892 e 1893 (volumes 1 e 2), 1906, 1920 e 1927. Na edição de 1906, o autor trata do choque entre barras longitudinais de comprimentos diferentes. Nakao (1981) e Cavalcante (2002) deduzem o choque entre barras, mostrando com esquemas o estado das barras para períodos em função da razão do comprimento da barra pela velocidade de propagação de onda. A seguir são discutidas e analisadas essas condições de contorno, como explicitado, sob a teoria da propagação de ondas. Nesta seção, será examinada as condições de contorno para choques entre barras para quatro situações ou condições distintas:

- i) Choque de barras idênticas com mesma velocidade inicial (v_0);
- ii) Choque de barras idênticas, porém com velocidades iniciais diferentes, v_1 e v_2 , onde v_1 é maior v_2 ;
- iii) choque entre barras com comprimentos diferentes e velocidades iniciais também diferentes; e
- iv) Choque entre barras com impedâncias diferentes.

C.3.1 IMPACTO ENTRE BARRAS IDÊNTICAS E VELOCIDADES INICIAIS IGUAIS

A Fig. C.4 ilustra duas barras rígidas iguais, de mesmo material e imbuídas de mesma velocidade (v_0) e e no qual o plano de contato (mn) não se move durante o impacto. O impacto se dá sobre toda a superfície das extremidades das barras, no mesmo instante. Em processo contínuo, segue-se imediatamente, duas ondas de compressão que se propagam ao longo das barras, a partir do plano de contato (mn).

Logo após o impacto, as velocidades das partículas superpõem-se às velocidades iniciais das barras das zonas sob a ação das ondas ao repouso, como se observa na Fig. C.4(b); no tempo $t=l/c$, visto em C.4(c) as duas ondas alcançam as extremidades livres das barras, quando então estarão ambas as barras uniformemente comprimidas e em repouso, i.e., com a velocidade $v=0$. As ondas de compressão, refletidas a partir das extremidades livres transformam-se em onda de tração, em direção ao plano de contato (mn), no tempo maior que l/c e menor que $2l/c$ como mostra a Fig. C.4(d). Após o impacto, visto na Fig. C.4(e), as barras separam-se para um tempo maior que $2l/c$.

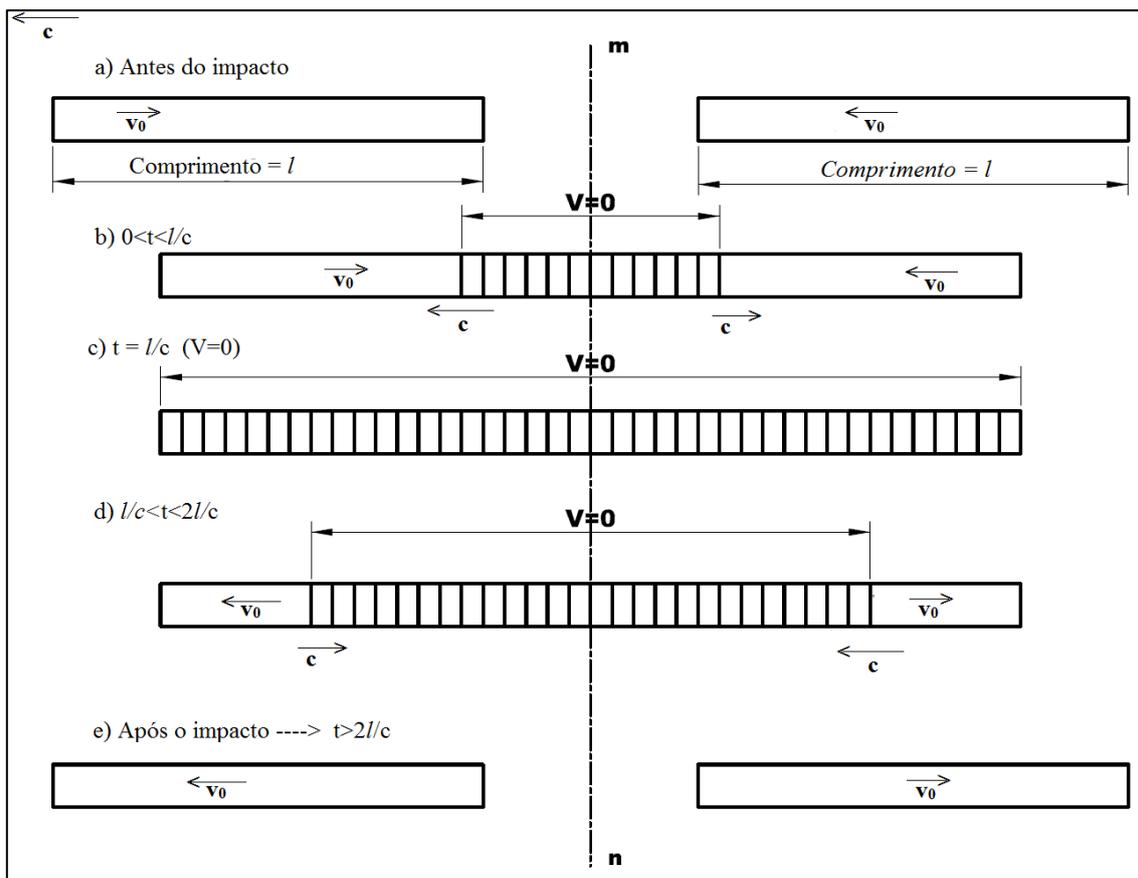


Figura C.4 – Impacto entre barras idênticas com mesma velocidade inicial (v_0)

Para compatibilidade, a tensão de compressão é:

$$\sigma = E \frac{v}{c} \quad (\text{C.49})$$

As tensões de tração refletidas nas extremidades livres das barras são:

$$\sigma = -E \frac{v}{c} \quad (\text{C.50})$$

Assim a força de impacto pode ser calculada como:

$$F = EA \frac{v}{c} \quad (\text{H.51})$$

Como $Z = \frac{EA}{c}$ (*impedância*), tem-se:

$$F = vZ \quad (\text{C.52})$$

C.3.2 IMPACTO ENTRE BARRAS IDÊNTICAS E VELOCIDADES INICIAIS DIFERENTE

A Fig. C.5, mostra esquematicamente, o impacto de duas barras idênticas, porém, submetidas a velocidades iniciais diferentes, v_1 e v_2 , com $v_1 > v_2$ e inercialmente, de modo relativo, v_2 pode ser zero e a barra 2, nesse caso, estar em repouso. No instante do impacto a partir do plano (mn) duas ondas de compressão idênticas de intensidades F , Equação C.54, propagam-se ao longo das barras. As velocidades de partícula, relativas às regiões não tensionadas são iguais, em cada barra, a partir do plano (mn) e em direção às extremidades. A intensidade dessas velocidades deve ser igual a $(v_1 - v_2)/2$ de modo que, as velocidades absolutas das duas barras na superfície de contato sejam iguais, conforme se observa na Fig. C.5(b). Decorrido o tempo l/c , Fig. C.5(c), as ondas de compressão atingem as extremidades das barras, e nesse instante o estado das barras é de compressão uniforme, e as velocidades absolutas de todas as partículas das barras $v=0$. No exame da Figura H.5(c), tem-se:

$$v = v_1 - \frac{F}{Z} = v_2 + \frac{F}{Z} \quad (\text{C.53})$$

$$F = \frac{v_1 - v_2}{2} Z \quad (\text{C.54})$$

$$v = v_1 - \frac{v_1 - v_2}{2} = v_2 + \frac{v_1 - v_2}{2} = \frac{v_1 + v_2}{2} = v \quad (\text{C.55})$$

Como se depreende da Equação C.55 a barra 1 é desacelerada enquanto se acelera a barra 2, até que ambas atingem a velocidade $v = (v_1 + v_2)/2$.

Após o tempo l/c , as ondas de compressão são refletidas (tração), a partir das extremidades livres das barras de intensidade igual à de compressão, com o sinal trocado ($-F$) e isso sucede

até o tempo $2l/c$ quando essas ondas retornam às superfícies de contato entre as duas barras.

Como mostrado na Fig. C.5(d) tem-se:

a) barra 1:

$$v_1 = v - \frac{F}{Z} \tag{C.56}$$

e

$$v_1 = \frac{v_1 + v_2}{2} - \frac{v_1 - v_2}{2} = v_2 \tag{C.57}$$

b) barra 2:

e

$$v_2 = \frac{v_1 + v_2}{2} + \frac{v_1 - v_2}{2} = v_1 \tag{C.58}$$

Conclui-se que ao separarem as barras no tempo $t > 2l/c$ as velocidades estão trocadas.

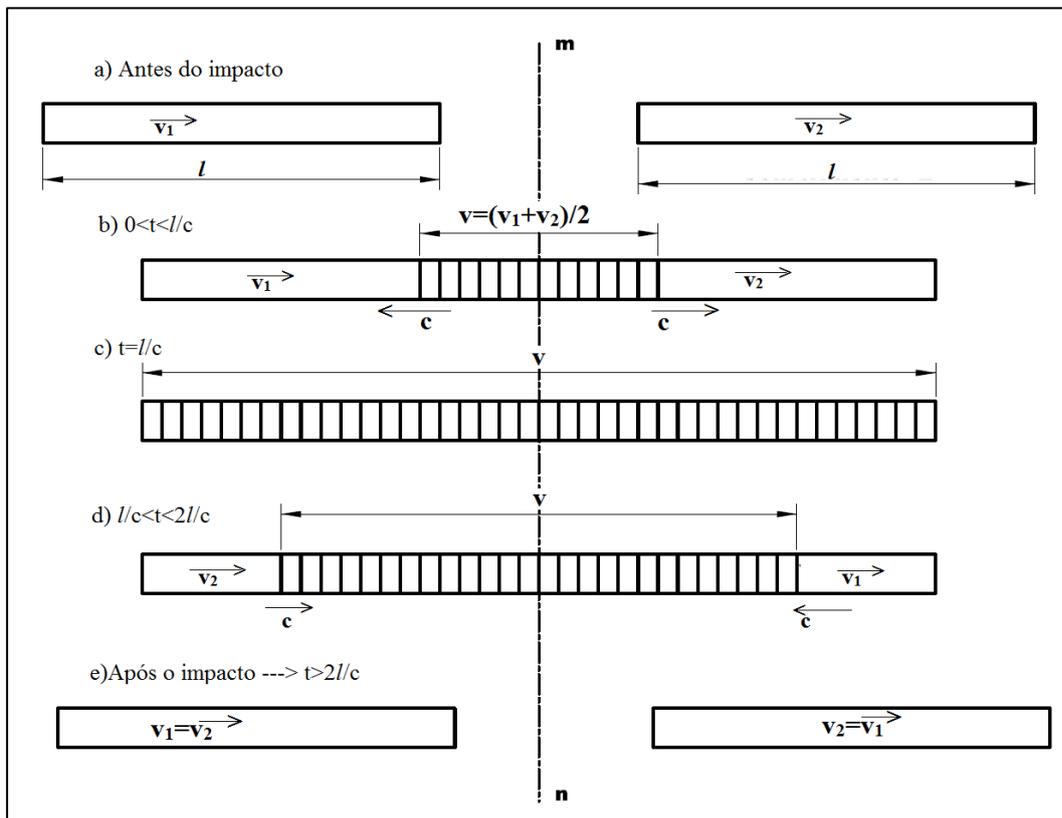


Figura C.5 – Impacto entre barras idênticas com velocidades diferentes

C.3.3 IMPACTO ENTRE BARRAS COM COMPRIMENTOS DIFERENTES

A Fig. C.6(a), mostra o esquema de duas barras com comprimentos diferentes l_1 e l_2 , onde $l_2 > l_1$ e animadas de velocidades v_1 e v_2 . Inicialmente as condições de impacto são idênticas até o tempo $t < l_1/c$, mostrada na Fig. C.5(b). Após um intervalo de tempo igual a $2l_1/c$, quando a onda refletida da barra menor (l_1) retorna à superfície de contato mn, ela se propaga ao longo da barra

menor, como mostra a Fig. C.6(c). Segundo Nakao (1981), a onda de tração da barra de comprimento menor (l_1) anula a pressão entre as barras, porém as barras permanecem em contato até que a onda de compressão da barra maior (l_2) retorne, após a reflexão na extremidade livre, à superfície de contato, no instante $t=2l_2/c$.

Nakao (1981), reforça que para o caso das barras com comprimentos iguais, cada uma das barras, após o choque, possui a mesma velocidade em todos os pontos e se move como um corpo rígido. A energia total do sistema é a do movimento de translação. No caso de barras de comprimentos diferentes, a barra maior, após o choque, continua a possuir uma onda que se propaga nela, mesmo depois da chegada da onda de tração da barra menor para superfície de contato mn . Para o cálculo da energia do sistema da barra, a energia dessa onda deve ser considerada. As barras só se separarão após o intervalo do tempo de $2l_2/c$. A barra menor (l_1) adquire, então, a velocidade v_2 da barra maior (l_2) e se separa sem sofrer deformação. A barra maior (l_2) se separa em um estado de vibração. Os centros de massa das duas barras movem-se, após o impacto, como se existisse um “coeficiente de restituição” igual à relação l_1/l_2 . Nakao (1981) recomenda a leitura de Love (1946) para maior detalhamento. Segundo Cavalcante (2002), no estudo de compatibilidade o problema das barras de comprimento diferente não difere do caso anterior para a condição de velocidade da barra 2 igual a zero ($v_2=0$).

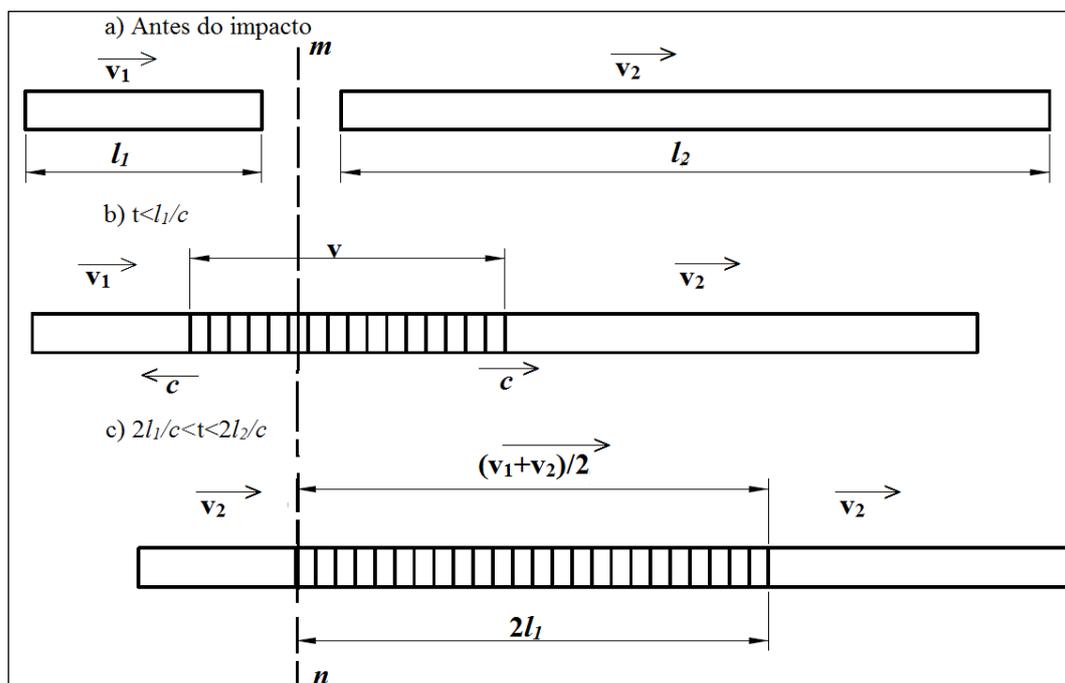


Figura C.6 – Impacto entre barras com comprimentos diferentes

C.3.4 IMPACTO ENTRE BARRAS COM IMPEDÂNCIAS DIFERENTES

A Fig. C.7, mostra o esquema para o caso do impacto de duas barras que têm impedâncias diferentes. As condições iniciais são: barras de mesmo comprimento; impedâncias Z_1 e Z_2 e velocidades iniciais v_1 e v_2 com $v_1 > v_2$. Imediatamente, após o impacto a onda da barra 1 apresenta o sentido negativo e a onda da barra 2, sentido positivo. As tensões respectivas são $\sigma_{b1} = F/A_1$ e $\sigma_{b2} = F/A_2$. Nota-se que a barra 1 é desacelerada enquanto acelera-se a barra 2, até que ambas tenham uma velocidade comum v , $v_1 > v > v_2$. A velocidade v , comum para as duas barras será dada por:

barra 1:

$$v = v_1 - \frac{F}{z_1} \quad (\text{C.59})$$

barra 2:

$$v = v_2 + \frac{F}{z_2} \quad (\text{C.60})$$

Onde: a Equação H.59, para a barra 1 e a Equação H.60, para a barra 2 com F/z_1 como desacelerador para barra 1, ou decréscimo, e F/z_2 como acelerador para a barra 2, ou acréscimo.

Pode-se escrever para representar a velocidade (v) comum, na seção de impacto das barras, tem-se:

$$v = v_1 - \frac{F}{z_1} = v_2 + \frac{F}{z_2} \quad (\text{C.61})$$

A força F será:

$$F = \frac{v_1 - v_2 (z_1 z_2)}{(z_1 + z_2)} \quad (\text{C.62})$$

E a velocidade v será:

$$v = \frac{v_1 Z_1 + v_2 Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{C.63})$$

Após o impacto, as velocidades serão:

$$v_1 = v - \frac{F}{Z_1} = v_1 \frac{(Z_1 - Z_2)}{Z_1 + Z_2} + v_2 \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{C.64})$$

$$v_2 = v + \frac{F}{Z_2} = v_1 \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} + v_2 \frac{(Z_2 - Z_1)}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{C.65})$$

No caso da barra 2 estar em repouso ($v_2=0$), tem-se:

no impacto:

$$F = v_1 \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{C.66})$$

$$v = v_1 \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{C.67})$$

ou $v = \frac{v_1}{1 + \frac{Z_2}{Z_1}}$ (C.68)

após o impacto:

$$v_1 = v_1 \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{C.69})$$

$$v_2 = v_1 \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{C.70})$$

Observa-se que se a barra 2 estiver em repouso antes do impacto esta sofrerá uma força de impacto de maior intensidade. Em relação aos penetrômetros que têm altura definida e constante é importante adicionar que, tão somente, a impedância protagoniza a intensidade de força no impacto.

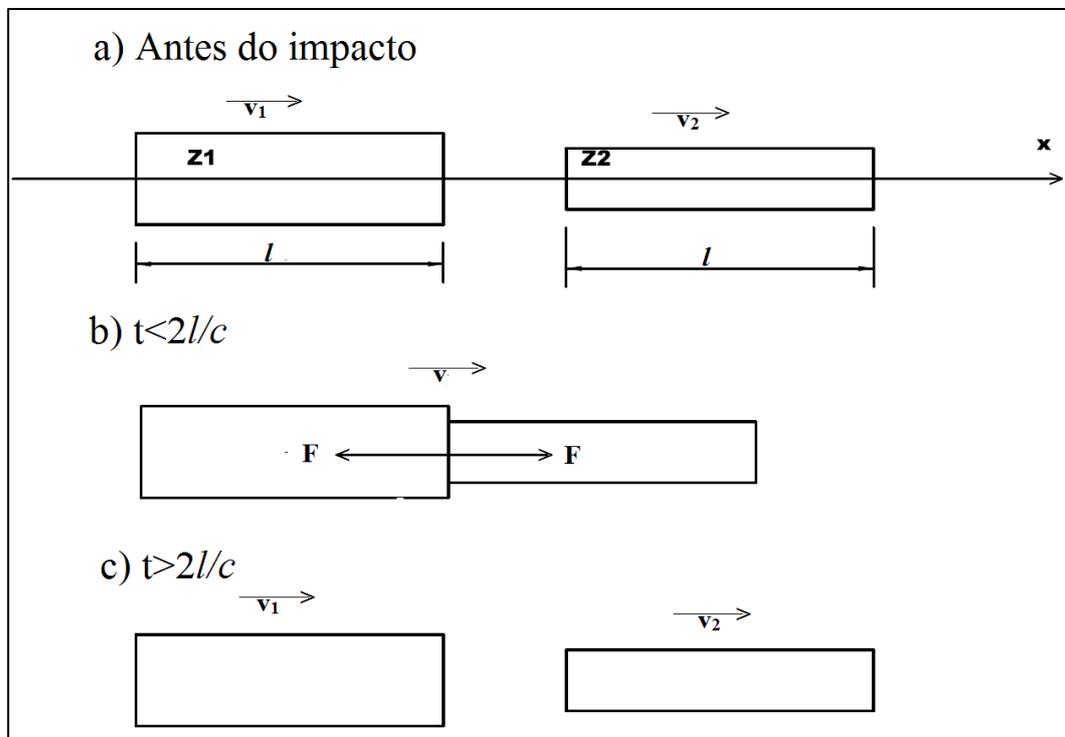


Figura C.7 – Impacto entre barras com impedâncias diferentes

APÊNDICE E - PROPOSIÇÃO DE LOBO PARA A DETERMINAÇÃO DE CAPACIDADE DE CARGA COM A UTILIZAÇÃO DA FORÇA DINÂMICA DO SPT

Em seu trabalho com foco no SPT Lobo (2005) apresentou um método de previsão de capacidade de carga de estacas a partir da aplicação dos conceitos de energia do ensaio de SPT. A autora faz referências aos trabalhos de Cavalcante (2002), Odebrecht (2003) Aoki & Cintra (2000) e Aoki & Cintra (2004) que possibilitaram estimar a força dinâmica de penetração do amostrador, obtida em função da energia despendida durante a propagação de ondas na composição de hastes e no amostrador. A autora utilizou a força dinâmica para estimar a capacidade de carga de estacas, relacionando os mecanismos de mobilização de resistência do amostrador que a autora denominou de modelo com os mecanismos da estaca que chamou de protótipo. A autora assume a mesma hipótese, comum na engenharia, para determinar o equilíbrio estático entre a carga aplicada, peso próprio do elemento estrutural e a resistência lateral oferecida pelo solo, em resumo definida na Eq. E.1:

$$Q_U + W = Q_L + Q_P \quad (E.1)$$

onde:

Q_U = capacidade de carga total de uma estaca;

W = peso próprio da estaca;

Q_P = capacidade de carga da ponta ou base da estaca; e

Q_L = capacidade de carga do fuste da estaca

Negligenciando o peso próprio da estaca, a autora formulou a Eq. E.2:

$$Q_U = A_p q_p + U \int_0^L \tau dL = A_p q_p + U \sum \tau_i \Delta L \quad (E.2)$$

onde:

A_p = área da ponta ou base da estaca;

q_p = resistência unitária de ponta; e

U = perímetro da estaca

Dada a consideração acima a autora propôs uma correlação entre os valores de resistência da estaca com os valores das resistências unitárias, lateral e de ponta mobilizadas durante o processo de cravação do amostrador do SPT. Na correlação proposta, a estaca é admitida como

protótipo e o amostrador SPT como modelo, devendo-se por isto levar em consideração possíveis efeitos de escala. O estudo concentrou-se em estacas dada a similaridade de mecanismos, i.e., em ambos, SPT e estacas, a cravação é feita sem alívios de tensões. Outros tipos de estacas também foram abordados como escavadas e hélice contínua.

Interpretando o ensaio do SPT para os valores de N_{SPT} pela penetração por golpe pode-se atribuir que a força dinâmica, reação dinâmica do solo à cravação do amostrador, é a razão da energia do sistema pela penetração como se depreende da Eq. E.3:

$$Fd = \frac{\eta_3(\eta_1(0,75 + \Delta\rho)M_M g + \eta_2(\Delta\rho M_H g))}{\Delta\rho} \quad (E.3)$$

onde: Fd = força de reação dinâmica do solo à cravação do amostrador;

M_M = massa do martelo;

M_H = massa da haste;

η_1 = Eficiência da energia de queda do martelo;

η_2 = Eficiência da energia da haste;

η_3 = Eficiência da energia do sistema;

A autora recomenda utilizar os valores de $\eta_1=0,761$; $\eta_2=1$ $\eta_3= 0,907-0,0066l$ que foram estimados por Odebrecht (2003), através da retroanálise dos dados de Cavalcante (2002). Lobo (2005) aconselha, também, a calibração de cada equipamento de sondagem localmente. Ressalta-se que valor de η_3 recomendado por Lobo (2005) seja diferente da proposição de Odebrecht (2003), mostrada na Equação 3.7.

Lobo (2005) considera duas hipóteses para o mecanismo de cravação do amostrador: a primeira argui que contribui para a mobilização da resistência do solo apenas o atrito lateral, comum em solos de baixa resistência à penetração para o qual supõe-se que o solo penetra o amostrador de modo contínuo; a segunda aponta que na mobilização de resistência do solo participam além do atrito lateral no entorno do amostrador, forças normais à ponta do amostrador embuchado, típico de solos de grande resistência corroborado, segundo Lobo(2005) pela inspeção sistemática de inúmeros ensaios SPT, nos quais observa-se um nível muito baixo de recuperação de amostras em solos resistentes. A Fig. E.1 detalha as duas hipóteses de Lobo (2005). Cabe ressaltar que a autora considera apenas 30 cm do corpo do amostrador para o cálculo do atrito lateral conforme a Eq. E.4:

$$\tau_{l,spt} = \frac{Fd}{a_l} \quad (E.4)$$

onde:

$\tau_{l,spt}$ = atrito lateral unitário no amostrador SPT; e
 a_l = área lateral total do amostrador interna e externa;

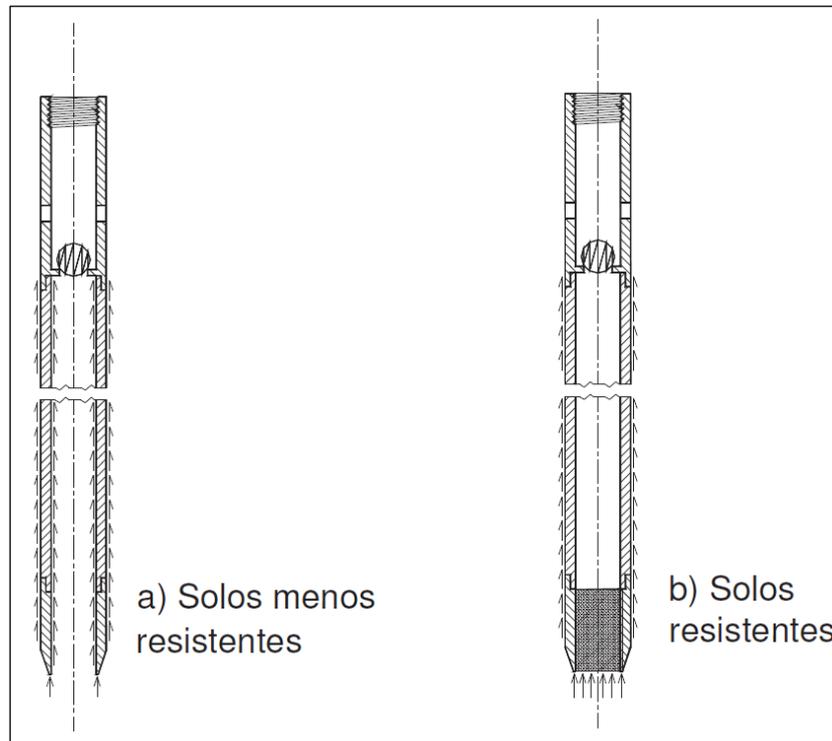


Figura E.1- Hipóteses adotadas na separação da força dinâmica mobilizada pelo amostrador (Lobo, 2005)

Nota-se que no caso de embuchamento do amostrador a Equação E.4 fornecerá valores incorretos já que Lobo (2005) considerou que no caso de mobilização tanto de atrito quanto de forças normais à base do amostrador (solos resistentes) há a necessidade de isolar estas duas parcelas. A autora, aconselha, neste caso, estimar a rigidez e o ângulo de atrito do solo e utilizar as teorias de capacidade de carga e de expansão de cavidade esférica (*e. g.* Terzaghi, 1943, Meyerhof, 1951, 1976, Berezantzev, 1961 e Vésic, 1972).

Resistência de ponta do amostrador do SPT

Segundo Lobo (2005), utilizando-se as teorias de capacidade de carga proposta por Vésic (1972) aplicada a solos granulares, variando propriedades dos solos: índice de rigidez entre 200 a 500, ângulo de atrito interno entre 30° a 40° e nível de tensões efetivas verticais entre 50 kPa a 500 kPa, faixa representativa da maior parte dos solos naturais, pode-se facilmente calcular os valores de resistência transmitidos à ponta da estaca, conforme ilustrado na Fig. E.2. Percebe-se do gráfico uma faixa bem definida entre 60 e 80% de mobilização da resistência de ponta em relação à resistência total. Deste modo, é possível sugerir, como uma primeira aproximação, que 70% da força dinâmica é proveniente da mobilização da resistência de ponta e 30% da

resistência lateral externa, quando o amostrador é cravado em solos resistentes (*i.e.* amostrador “embuchado”).

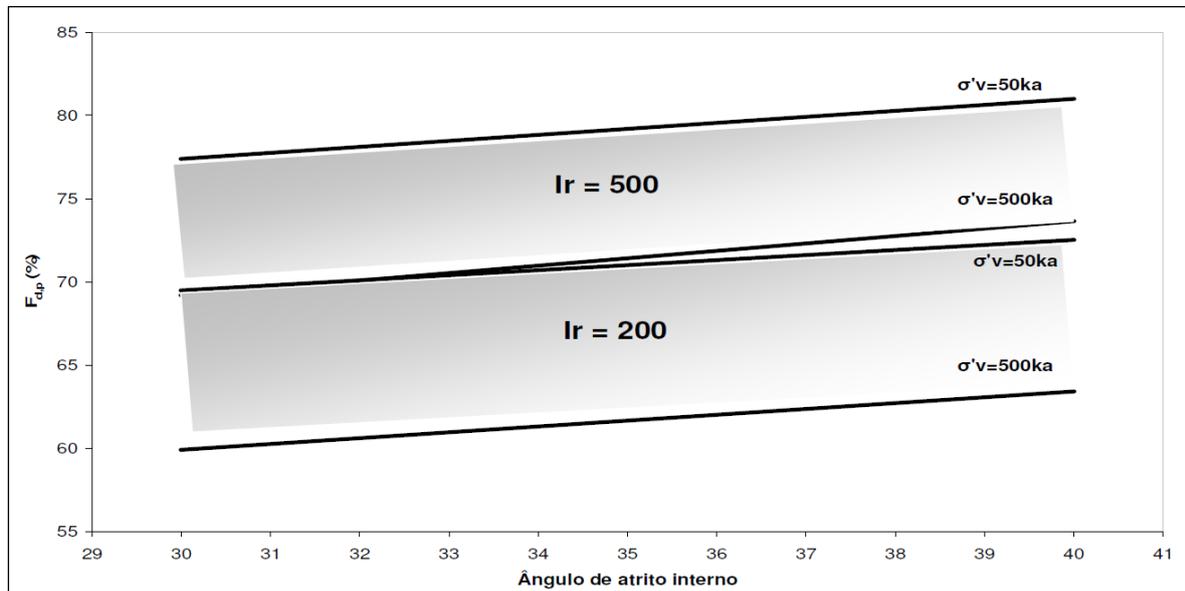


Figura E.2 - Porcentagem de resistência de ponta mobilizada pela cravação do amostrador SPT em solos arenosos (Lobo, 2005)

Desse modo pode-se expressar a resistência de ponta mobilizada pelo amostrador conforme a Eq. E.5:

$$q_{p,spt} = \frac{F_{d,p}}{a_p} = \frac{0,7F_d}{a_p} \quad (E.5)$$

Resistências de ponta e laterais mobilizadas pelo amostrador do SPT

Para aplicar os valores das resistências laterais e de ponta mobilizadas pelo amostrador SPT na previsão da capacidade de carga de estacas com o objetivo de estabelecer a relação entre as resistências laterais e de ponta a autora relacionou os mecanismos de mobilização de resistência do amostrador (modelo) com os mecanismos da estaca (protótipo) e utilizou para isso os resultados de um banco de dados de estacas questionando: há alguma relação entre as resistências do modelo e do protótipo? Essa relação é influenciada pela geometria do modelo e protótipo, *i.e.*, pela razão entre a geometria da estaca e a geometria do amostrador? Para responder a esses questionamentos a autora apropriou em três gráficos os resultados do mencionado banco de dados de estacas mostrados nas Fig. E.3, Fig. E.4 e Fig. E.5 respectivamente: razão de resistências laterais *versus* razão de diâmetros; razão de resistências laterais *versus* razão de comprimentos; e razão de resistências de ponta *versus* razão diâmetros.

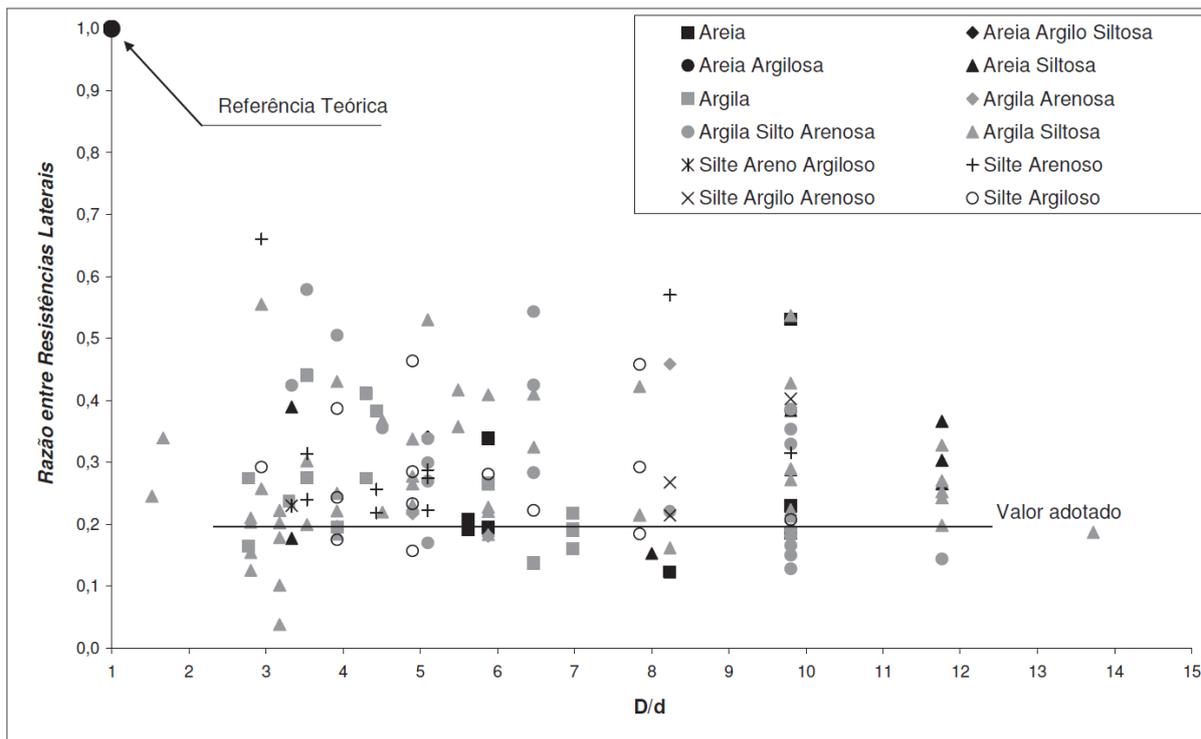


Figura E.3 - Razão de resistências laterais versus razão de diâmetros (Lobo, 2005)

Os gráficos são expressos em termos adimensionais. A dispersão dos resultados é considerável, ainda assim a autora faz algumas considerações.

Com base nas Figuras E.4 e E.5, Lobo (2005) afirma que a razão entre as resistências laterais mobilizadas na estaca e no amostrador diminuem com o aumento da relação entre seus diâmetros e comprimentos, embora para o autor desta tese isto não seja muito nítido. Observa Lobo (2005), que há um efeito de escala na transposição da resistência lateral mobilizada pelo amostrador (modelo) para a estaca (protótipo). Lobo (2005) adotou como valor representativo deste efeito uma queda de 80% da resistência mobilizada pelo amostrador com relação às mobilizadas pela estaca, ou seja, a resistência unitária lateral mobilizada pela estaca é de apenas 20% da tensão cisalhante mobilizada no amostrador SPT. Deste modo, a Eq. E.6 apresenta o valor do atrito lateral unitário da estaca.

$$\tau_{l,spt} = \frac{0,2F_d}{a_l} \quad (E.6)$$

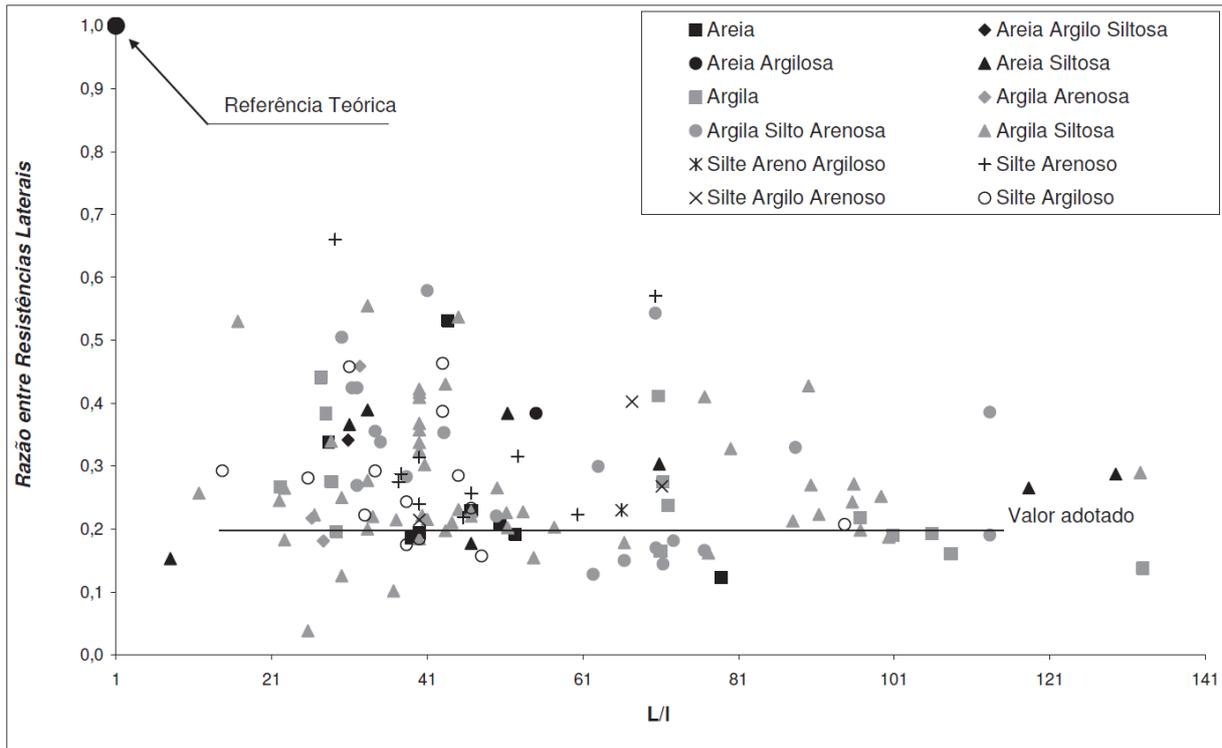


Figura E.4 - Razão de resistências laterais versus razão de comprimentos (Lobo, 2005)

Para Lobo (2005) as Figuras E.4, E.5 e a Fig. E.6 mostram que variação da razão de resistências unitárias é independente do tipo de solo, o que sugere que a abordagem sugerida de interpretação do ensaio SPT potencialmente captura o mecanismo de transferência da estaca.

Capacidade de Carga de Estacas

Segundo Lobo (2005) aplicando os valores das resistências τ_l e q_p expressos pelas Equações E.5 e E.6, na Eq. E.7, pode-se facilmente estimar a capacidade de carga de estacas através da força dinâmica calculada pelo ensaio SPT:

$$Q_U = Q_L + Q_P = \frac{0,2U}{a_l} \sum F_d \Delta L + 0,7F_d \frac{A_P}{a_p} \quad (E.7)$$

Conforme orienta a autora a Eq. E.7 deve ser ajustada para os diferentes processos executivos de estaca. Estes ajustes são representados pelos coeficientes α e β aplicados às resistências laterais e de ponta, respectivamente. Deste modo a Equação E.7 pode ser reescrita da seguinte forma, Eq. E.8:

$$Q_U = \alpha Q_L + \beta Q_P \quad (E.8)$$

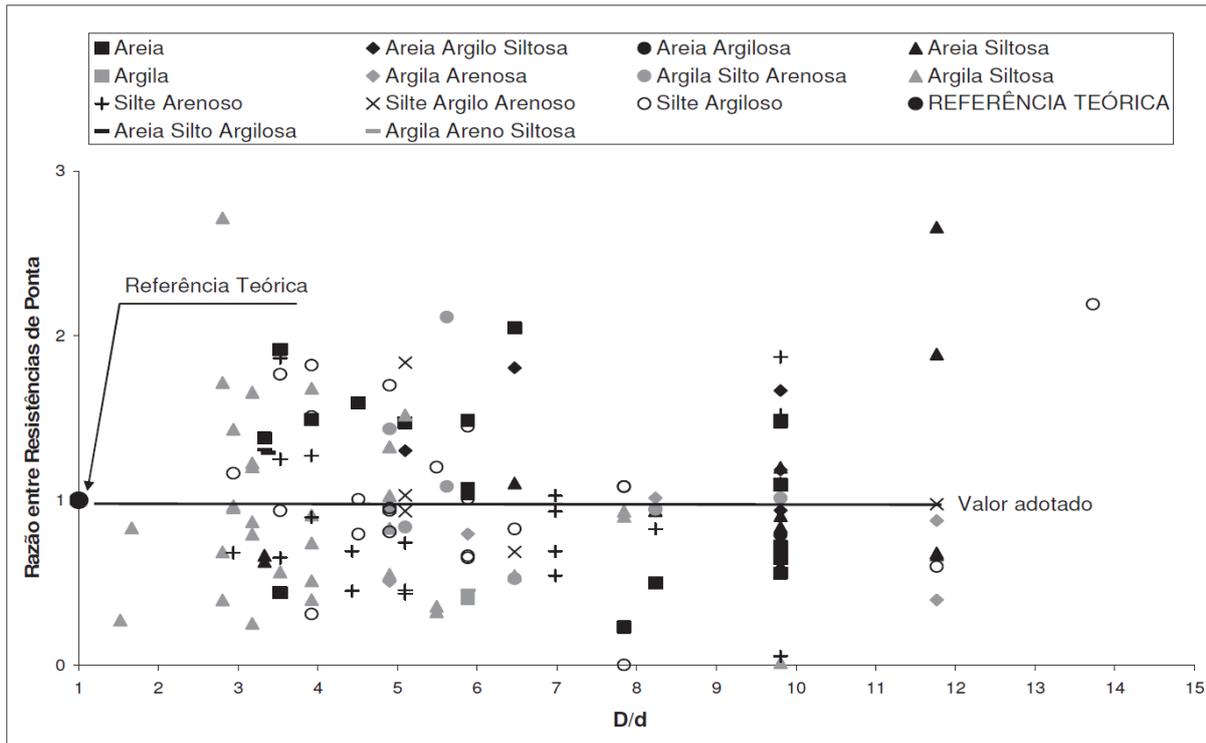


Figura E.5 - Razão de resistências de ponta versus razão de diâmetros (Lobo, 2005)

A autora aplicou as Eq. E.9 e Eq. E.10 para estimar, a carga lateral, a carga de ponta, respectivamente, e a carga total (somas da carga lateral e ponta), de cada estaca que compõe o banco de dados utilizado nesse estudo. De posse das cargas estimadas pela referida, a autora relacionou estes valores com as cargas últimas (lateral, ponta e total) obtidas pela prova de carga através de uma análise de regressão linear.

$$Q_L = \frac{U}{a_l} \sum F_d \Delta L \quad (E.9)$$

$$Q_P = F_d \frac{A_P}{a_P} \quad (E.10)$$

Para a análise de das regressões, para as cargas laterais de ponta e cargas totais a autora dividiu os dados por processo executivo e tipo de estaca (cravada metálica, cravada pré-moldada, hélice contínua e escavada) e o nível de carregamento atingido na prova de carga do seguinte modo: provas de carga que não atingiram 90% da carga de ruptura; provas de carga que atingiram mais de 90% da carga de ruptura e provas de carga que atingiram a ruptura. O resultado para os valores de α e β são apresentados na Tab. E.1.

Tabela E.1 – Valores de α e β (Lobo, 2005)

Tipo de Estaca	α	β
Cravada pré-moldada	1,5	1,1
Cravada metálica	1,0	1,0
Hélice contínua	1,0	0,6
Escavada	0,7	0,5