



Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho"

Programa Interunidades

unesp 

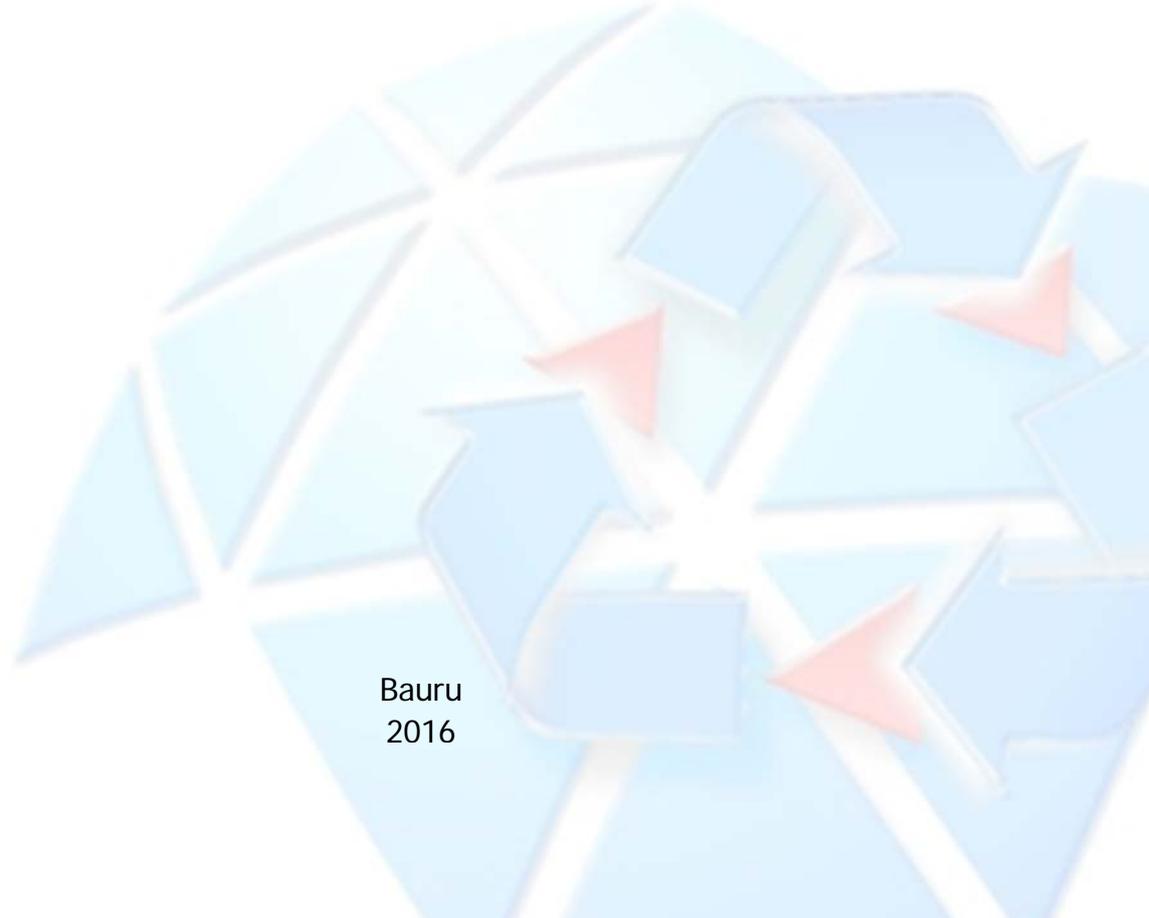
Mestrado

---

## Engenharia Civil e Ambiental

NÉLIO JOSÉ BASTOS

INTERPRETAÇÃO RACIONAL DO ENSAIO DPL



Bauru  
2016

**NÉLIO JOSÉ BASTOS**

**INTERPRETAÇÃO RACIONAL DO ENSAIO DPL**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. George de Paula Bernardes.



Bauru  
2015

# DEDICATÓRIA

*À memória de minha mãe, Helena C. Bastos, que sempre me incentivou a estudar.*

*À minha esposa Stefania Dardi, por tudo que representa em minha vida, pelo amor e compreensão neste período.*

*À minha filha Elena Dardi Bastos, que foi meu pequeno e grandioso porto seguro nos momentos de desânimo.*

# AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. George de Paula Bernardes, pelo apoio, pela dedicação, pelo tempo dispensado, pela tolerância com minhas falhas, por acreditar em mim mais que eu mesmo acreditei em muitos momentos, e sobretudo pela amizade e pelo exemplo de pessoa e profissional acadêmico que sempre me servirá de referência.

Ao Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti da FEB-UNESP, pelo apoio e tempo dispensado, pelos conhecimentos transmitidos durante este mestrado, por permitir que a campanha de investigação "in situ" fosse realizada em conjunto com a parte prática do curso de Investigação Geotécnica e Geoambiental, utilizando inclusive equipamentos e instalações da FEB. Também agradeço imensamente pelas contribuições durante a qualificação deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Roger Augusto Rodrigues, pela dedicação no curso de Fundamentos de Geotecnia, e pela participação e contribuições dadas durante a qualificação deste trabalho.

À Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Anna Sílvia Palcheco Peixoto, ao Prof. Dr. Alexandre Marco da Silva, ao Prof. Dr. Paulo César Lodi, ao Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho Simões, pelas valiosas contribuições à minha formação, pelo apoio recebido e pelos conhecimentos passados.

Aos demais professores do PPG em Engenharia Civil e Ambiental, por toda a dedicação durante as matérias cursadas e pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Prof. Dr. Edmundo Rogério Esquivel da EESC-USP, pela imensa gentileza de emprestar os acelerômetros, cabos, interfaces, sistema de aquisição de dados HBM MX410 e o programa de aquisição de dados catman®Easy/AP, além de permitir o uso dos laboratórios e instalações do Departamento de Geotecnia da EESC-USP para que a célula de carga fosse calibrada e a instrumentação testada.

À colega Msc. Eng.<sup>a</sup> Thaise da Silva Oliveira Moraes, que gentilmente me auxiliou no aprendizado do software catman®Easy/AP, bem como me autorizou a usar e adequar o programa por ela desenvolvido em MatLab® para o tratamento dos dados dinâmicos.

Ao aluno de iniciação científica e colega Dalmir Augusto Paiva Santos Pereira, pelo auxílio nos ensaios realizados em Guaratinguetá. Obrigado por todo o apoio.

À minha colega e amiga Alessandra Malta Mattos Branco, que dividiu comigo os desafios de iniciar uma carreira acadêmica, pelo apoio em muitos momentos difíceis, pelo bom humor que amenizava as dificuldades, e sobretudo pela imensa amizade que formamos nestes anos.

Ao Laboratório de Metrologia da PUC-RJ, por ter confeccionado a célula de carga usada nesta pesquisa.

Ao CNPq Pronex, Projeto Geotecnia Ambiental PUC-Rio pela aquisição do equipamento DPL.

À CAPES pela bolsa de mestrado cedida.

A todos que de alguma forma me auxiliaram e incentivaram neste desafio.

## RESUMO.

As propriedades geomecânicas do solo são dados imprescindíveis na elaboração e execução de um projeto de engenharia geotécnica. Para isso, diversos métodos são comumente utilizados na prática tais como o ensaio à percussão (SPT) e o ensaio de cone (CPT), entre outros. Cada tipo de equipamento vai apresentar vantagens e desvantagens em função da geologia, das condições de acesso e área de montagem e trabalho. O Penetrômetro Dinâmico Leve modificado por Nilsson (2001), com medida de torque, é um equipamento leve e simples que apresenta grande mobilidade, permitindo realizar ensaios em regiões de difícil acesso, como relevo acidentado, florestas e áreas inundadas. Esse equipamento é pouco difundido no Brasil e a interpretação dos seus resultados é feita através do índice  $N_{10}$  que fornece uma ideia da resistência do solo, assim como o  $N_{SPT}$  faz com o SPT. Este trabalho procurou interpretar racionalmente os resultados do DPL aplicando os mesmos conceitos de energia e propagação de onda unidimensional de tensão, hoje amplamente usados para interpretar o SPT. Foi investigada a influência da geometria de ponta no atrito mobilizado, constatando que pode-se substituir a ponteira de  $90^\circ$  do DPL por uma com  $60^\circ$  de ápice, como as usadas no CPT. É proposto uma nova fórmula relacionando o torque medido no DPL com o atrito lateral da ponteira, considerando as contribuições da luva cilíndrica e da ponta cônica. Ensaios de campo mostraram que esta fórmula proposta contabiliza mais adequadamente o atrito lateral, especialmente quando se usa a medida do torque residual e não a do torque máximo, além de que o peso do sistema DPL tem influência nas medidas de torques máximo e residual. Foi desenvolvida uma haste instrumentada com célula de carga e acelerômetros, com o objetivo de medir os sinais de força e aceleração durante a propagação de onda de tensão no topo da composição das hastes, através de um sistema de aquisição digital de dados. Os sinais obtidos em um ensaio de campo, realizado em conjunto com ensaios CPT, foram tratados através do próprio programa de aquisição de dados e de software desenvolvido para esta finalidade. A partir dos sinais de força e aceleração medidos foram determinadas as quantidades de energia transmitidas às hastes pela queda do martelo, determinando as perdas de energia na cravação da ponteira no solo. Verificou-se que a relação entre a energia potencial do sistema e a energia medida EFV é constante a partir de certa profundidade. Foram determinadas as forças dinâmicas mobilizadas na cravação a partir dos sinais de força e do deslocamento permanente médio da ponteira, e também através da aplicação do método CASE aos sinais de  $F$  e  $Z_v$ . A partir da força dinâmica calculada, e dos atritos laterais calculados através da fórmula proposta, usando as medidas de torque máximo e residual, foi possível utilizar o ábaco de Robertson *et al.* (1986) para classificar o solo ensaiado até a profundidade de 12m, obtendo grande correspondência com os resultados apresentados na classificação através dos resultados do CPT elétrico.

Palavras chave: DPL, energia no DPL, ponteiros do DPL, instrumentação dinâmica.

## ABSTRACT.

Geotechnical properties of soil are given essential in the preparation and execution of a geotechnical engineering design. For this, several methods are commonly used in practice such as percussion test (SPT) and cone test (CPT), among others. Each type of equipment will have advantages and disadvantages depending on the geology, the conditions of access and mounting area and work. The Dynamic Light Penetrometer modified by Nilsson (2001), to measure torque, is a lightweight and simple tool that exhibits high mobility, allowing perform tests in areas of difficult access, such as rugged terrain, forests and wetlands. This equipment is not yet widespread in Brazil and the interpretation of results is done via the N10 index that provides an idea of the strength of the soil, as well as the NSPT makes the SPT. This study sought to rationally interpret the DPL results of applying the same concepts of energy and one-dimensional wave propagation of tension, now widely used to interpret the SPT. The influence of the tip geometry the mobilized friction was investigated, noting that one may substitute the tip 90 of the DPL by a 60 ° apex, as used in CPT. It is proposed a new formula relating the torque measured in DPL with the lateral friction of the tip, considering the contributions of the cylindrical sleeve and the conical tip. Field trials have shown that this accounts for proposed formula more suitably the lateral friction, especially when using the measurement of the residual torque, and not the maximum torque, and the weight of the DPL system has an influence on the measurements of maximum and residual torques. An instrumented with load cell rod and accelerometers, for the purpose of measuring the force and acceleration signals during stress wave propagation at the top of the stems of the composition via a digital acquisition system data has been developed. The signals obtained in a field test, carried out in conjunction with CPT trials were treated by own data acquisition software and software developed for this purpose. From the signs of strength and measured acceleration were determined amounts of energy transmitted to the rods by the hammer fall, causing energy losses in crimping the ferrule on the ground. It was found that the relationship between the potential energy of the system and the energy measure EFV is constant at a certain depth. We determined the dynamic forces mobilized in the piling from the force signals and the average displacement of the permanent ferrule, and also by applying the method to CASE signals F and Zv. From the calculated dynamic force, and the calculated lateral friction through the proposed formula, using the maximum and residual torque measurements, it was possible to use the abacus Robertson et al. (1986) tested for classifying the soil to a depth of 12m, achieving great correspondence with the results shown in sorting through the results of electric CPT.

Keywords: DPL, energy in DPL, DPL tips, dynamic instrumentation.

## LISTA DE FIGURAS.

FIGURA 2.1	CONE MECÂNICO DE BEGEMANN.....	5
FIGURA 2.2	ÁBACO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS PROPOSTO POR BEGEMANN.....	6
FIGURA 2.3	CONE ELÉTRICO.....	6
FIGURA 2.4	EXEMPLO DE RESULTADOS OBTIDOS PELO CPT ELÉTRICO.....	7
FIGURA 2.5	PIEZOCONE COM ELEMENTO FILTRANTE EM $U_2$ .....	8
FIGURA 2.6	DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE “A” DA CORREÇÃO DA RESISTÊNCIA DE PONTA DO PIEZOCONES.....	8
FIGURA 2.7	EXEMPLO DE RESULTADOS OBTIDOS PELO CPTU.....	9
FIGURA 2.8	ÁBACO PARA CLASSIFICAÇÃO DO SOLO PELO SEU COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO PROPOSTO POR ROBERTSON ET AL. (1986).....	10
FIGURA 2.9	ÁBACOS DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS PROPOSTOS POR ROBERTSON (1990) BASEADOS EM DADOS NORMALIZADOS DE CTPU.....	11
FIGURA 2.10	GEOMETRIA DA PONTEIRA DOS PENETRÔMETROS DINÂMICOS DE ACORDO COM A NORMA DIN 4094:1990.....	14
FIGURA 2.11	FORMAS DAS PONTEIRAS DOS PENETRÔMETROS DINÂMICOS.....	16
FIGURA 2.12	INSTRUMENTAÇÃO PREVISTA PARA MEDIÇÃO DA ENERGIA NO DCP.....	17
FIGURA 2.13	COMPORTAMENTO DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO DOS COXINS SEGUNDO OS MODELOS DE (A) SMITH (1960) E (B) LOWERY ET AL. (1967).....	21
FIGURA 2.14	ONDA DE COMPRESSÃO PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE RIGIDEZ DO COXIM.....	22
FIGURA 2.15	PRINCIPAIS COMPONENTES DO DPL MODIFICADO COM MEDIDA DE TORQUE.....	23
FIGURA 2.16	PLANILHA COM RESULTADOS DO DPL MODIFICADO POR NILSSON EM 2001.....	28
FIGURA 2.17	DPL COM PONTEIRA COM ÂNGULO DE ÁPICE DE 60° (ALVES FILHO, 2010).....	30
FIGURA 3.1	PROPAGAÇÃO DE ONDA LONGITUDINAL DE TENSÃO.....	34
FIGURA 3.2	OBTENÇÃO DA ENERGIA DE DEFORMAÇÃO DE UMA HASTE, DEVIDO A UM ESFORÇO EXTERNO CRESCENTE $F_x$ .....	36
FIGURA 3.3	ONDA DE COMPRESSÃO INICIAL PARA O CASO DE IMPACTO DE MARTELO RÍGIDO E HASTE, SEM USO DE COXIM COMO AMORTECEDOR.....	38
FIGURA 3.4	ONDA DE COMPRESSÃO INICIAL PARA O CASO DE IMPACTO DE MARTELO RÍGIDO E HASTE, COM USO DE COXIM COMO AMORTECEDOR.....	40
FIGURA 3.5	ESQUEMA DE PROPAGAÇÃO LONGITUDINAIS DE TENSÃO, CONSIDERANDO AMORTECEDORES DE DIFERENTES RIGIDEZ.....	42
FIGURA 3.6	PROPAGAÇÃO DE ONDA LONGITUDINAL DE TENSÃO ATRAVÉS DE SEÇÕES DE ÁREAS DISTINTAS.....	43
FIGURA 3.7	REGISTROS TÍPICOS DE FORÇA E $Z.v$ .....	45
FIGURA 3.8	ENERGIA POTENCIAL DO SISTEMA.....	48
FIGURA 4.1	ESQUEMA GERAL DA INSTRUMENTAÇÃO DINÂMICA UTILIZADA.....	49
FIGURA 4.2	CÉLULA DE CARGA.....	50
FIGURA 4.3	MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE DADOS HMB MX 410 UTILIZADO.....	51
FIGURA 4.4	TELA DE CONFIGURAÇÃO DOS SENSORES ACOPLADOS AO HMB MX 410.....	52
FIGURA 4.5	VISUALIZAÇÃO EM TEMPO REAL DOS DADOS COLETADOS.....	52
FIGURA 4.6	ESQUEMA DA CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DA CÉLULA DE CARGA.....	53
FIGURA 4.7	CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA.....	54
FIGURA 4.8	PROJETO GEOMÉTRICO DO SUPORTE DOS ACELERÔMETROS UTILIZADO.....	55
FIGURA 4.9	DIMENSÕES DO ACELERÔMETRO PCB 350B04 E DO FURO DE MONTAGEM DOS MESMOS.....	55
FIGURA 4.10	ACELERÔMETROS, CABOS COAXIAIS E CONDICIONADORES/AMPLIFICADORES DE SINAL.....	56
FIGURA 4.11	INTERVALO BRUTO DE CAPTURA DE SINAIS PARA UM GOLPE À PROFUNDIDADE DE 5,9M.....	57
FIGURA 4.12	SINAIS LIDOS PARA O PRIMEIRO GOLPE INSTRUMENTADO COM A PONTEIRA A 10,9M DE PROFUNDIDADE.....	58
FIGURA 4.13	SINAIS CORRIGIDOS QUANTO AO SENTIDO, PARA GOLPE INSTRUMENTADO.....	58
FIGURA 4.14	TRECHO INICIAL DOS SINAIS MOSTRANDO A NECESSIDADE DE CORREÇÃO DOS ZERO DA BASE, E A PRESENÇA DE RUÍDOS PARA O PRIMEIRO GOLPE INSTRUMENTADO COM A PONTEIRA A 10,9 M DE PROFUNDIDADE.....	59
FIGURA 4.15	SINAIS CORRIGIDOS QUANTO À LINHA DE ZEROS PARA O PRIMEIRO GOLPE INSTRUMENTADO COM A PONTEIRA A 10,9 M DE PROFUNDIDADE.....	60
FIGURA 4.16	SINAIS RECORTADOS PARA O PRIMEIRO GOLPE INSTRUMENTADO COM A PONTEIRA A 10,9M DE PROFUNDIDADE, COM PRESENÇA DE INTERFERÊNCIAS.....	60
FIGURA 4.17	SINAIS COM AS ACELERAÇÕES TRATADAS PELO FILTRO SAVITZKY-GOLAY PARA O PRIMEIRO GOLPE INSTRUMENTADO COM A PONTEIRA A 10,9 M DE PROFUNDIDADE.....	61

FIGURA 4.18	DETERMINAÇÃO DO INTERVALO DE TEMPO EQUIVALENTE A $2L/c$ .	62
FIGURA 4.19	FLUXOGRAMA DO FUNCIONAMENTO GERAL DO PROGRAMA DESENVOLVIDO NO MATLAB®.	66
FIGURA 4.20	EXEMPLO DA REGRA DOS TRAPÉZIOS.	68
FIGURA 4.21	JANELA DE RESULTADOS SEM CORREÇÃO DE TENDÊNCIA POR ROTAÇÃO.	69
FIGURA 4.22	RESULTADOS CORRIGIDOS COM REBATIMENTO DA VELOCIDADE.	70
FIGURA 4.23	PLANILHA DE SAÍDA DE EXPORTAÇÃO DOS DADOS DE UM GOLPE INSTRUMENTADO.	70
FIGURA 4.24	- ABA DE EXPORTAÇÃO DE RESUMO DO GOLPE.	71
FIGURA 4.25	ABA DE EXPORTAÇÃO DOS RESULTADOS DO MÉTODO CASE.	71
FIGURA 4.26	TESTE DA INSTRUMENTAÇÃO EM LABORATÓRIO.	72
FIGURA 4.27	SINAIS LIDOS NO PRIMEIRO GOLPE INSTRUMENTADO.	73
FIGURA 4.28	SINAIS LIDOS NO SEGUNDO GOLPE INSTRUMENTADO.	73
FIGURA 4.29	SINAIS LIDOS NO TERCEIRO GOLPE INSTRUMENTADO.	74
FIGURA 4.30	RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DOS SINAIS DO PRIMEIRO GOLPE.	74
FIGURA 4.31	RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DOS SINAIS DO SEGUNDO GOLPE.	75
FIGURA 4.32	RESULTADOS DO PROCESSAMENTO DOS SINAIS DO TERCEIRO GOLPE.	75
FIGURA 4.33	MODELO DE EMBREAGEM PLANA.	76
FIGURA 4.34	MODELO DE EMBREAGEM CÔNICA USADO PARA DETERMINAR O TORQUE DE UM CONE SENDO ROTACIONADO NO SOLO.	77
FIGURA 5.1	PROJETO GEOMÉTRICO DAS PONTEIRAS DO DPL.	79
FIGURA 5.2	PONTEIRAS DO DPL COM DIFERENTES ÂNGULOS DE 180° (A), 90° (B), 60° (C) E 30° (D).	80
FIGURA 5.3	ENSAIOS "QUASI-ESTÁTICOS" DE PENETRAÇÃO DAS PONTEIRAS EM LABORATÓRIO.	81
FIGURA 5.4	LOCAL DO ENSAIO "IN SITU".	82
FIGURA 5.5	PROCEDIMENTOS INICIAIS DO ENSAIO.	83
FIGURA 5.6	DETALHES DO ENSAIO.	84
FIGURA 5.7	TORQUÍMETRO POSICIONADO PARA O INÍCIO DAS MEDIDAS DE TORQUE MÁXIMO E RESIDUAL.	85
FIGURA 5.8	DPL COM MARTELO E MASSAS DE HALTERES SOBREPOSTAS.	86
FIGURA 5.9	DESLOCAMENTO DAS PONTEIRAS EM FUNÇÃO DA FORÇA EM ENSAIO "QUASI-ESTÁTICO".	87
FIGURA 5.10	CUNHA DE SOLO COMPACTADO FORMADA ABAIXO DA PONTEIRA COM ÂNGULO DE ÁPICE DE 180°.	88
FIGURA 5.11	UMIDADE DO SOLO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE.	89
FIGURA 5.12	$N_{10}$ E PENETRAÇÃO POR GOLPE NOS ENSAIOS DA LINHA 3.	90
FIGURA 5.13	COMPORTAMENTO DE (A) TORQUE MÁXIMO E (B) TORQUE RESIDUAL DAS PONTEIRAS EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE NOS ENSAIOS DA LINHA 3.	91
FIGURA 5.14	TENSÕES CISALHANTES CALCULADAS PELA FORMULAÇÃO DE (A) NILSSON (2008) E DE (B) BASTOS ET AL. (2014).	92
FIGURA 5.15	GRÁFICOS DE TORQUE E ATRITO LATERAL EM FUNÇÃO DO PESO DA COMPOSIÇÃO PARA DIVERSAS PROFUNDIDADES.	93
FIGURA 6.1	MAPA GEOLÓGICO DA REGIÃO DE BAURU.	97
FIGURA 6.2	LOCALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.	98
FIGURA 6.3	LOCAÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS.	99
FIGURA 6.4	EQUIPAMENTO PAGANI TG63-150.	100
FIGURA 6.5	ENSAIO DE CONE MECÂNICO.	101
FIGURA 6.6	DADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO CPT MECÂNICO NA CAMPANHA DE ENSAIOS DE BAURU.	101
FIGURA 6.7	ENSAIO DE CONE ELÉTRICO.	102
FIGURA 6.8	DADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO CPT ELÉTRICO NA CAMPANHA DE ENSAIOS DE BAURU.	103
FIGURA 6.9	PLATAFORMA NIVELADORA DO DPL.	104
FIGURA 6.10	ENSAIO DPL COM INSTRUMENTAÇÃO NO TOPO DA COMPOSIÇÃO DE HASTES.	105
FIGURA 6.11	MODELOS DE COXINS PARA O DPL: (A) EM MADEIRA DE PINUS, (B) EM BORRACHA COMUM DE 3 MM, (C) EM BORRACHA DE POLIURETANO DE 3 MM E (D) EM BORRACHA DE POLIURETANO DE 4 MM.	107
FIGURA 6.12	FORÇA MEDIDA EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA A PRIMEIRA ONDA DE TENSÃO USANDO DIFERENTES TIPOS DE COXINS.	108
FIGURA 6.13	$F=Z.v$ EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA A PRIMEIRA ONDA DE TENSÃO USANDO DIFERENTES TIPOS DE COXINS.	109
FIGURA 6.14	EFV EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA A PRIMEIRA ONDA DE TENSÃO USANDO DIFERENTES TIPOS DE COXINS.	110
FIGURA 6.15	EFV EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA OS GOLPES USANDO DIFERENTES TIPOS DE COXINS.	110
FIGURA 6.16	EFV E $EP_5$ OBTIDOS EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE CORRIGIDA.	113
FIGURA 6.17	EFICIÊNCIA DO SISTEMA EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE CORRIGIDA.	115
FIGURA 6.18	FORÇA DINÂMICA, $N_{10}$ E PENETRAÇÃO PERMANENTE MÉDIA AO LONGO DA PROFUNDIDADE DE ENSAIO.	119

---

FIGURA 6.19 FORÇA DINÂMICA PELO MÉTODO CASE, $N_{10}$ E PENETRAÇÃO PERMANENTE MÉDIA AO LONGO DA PROFUNDIDADE DE ENSAIO. ....	120
FIGURA 6.20 COMPARAÇÃO ENTRE A FORÇA DINÂMICA OBTIDA PELO MÉTODO CASE E A OBTIDA PELA POR PELA ENERGIA. ...	121
FIGURA 6.21 FORÇAS QUE ATUAM EM PONTEIRAS DE ENSAIOS DINÂMICO E EM ENSAIOS ESTÁTICOS. ....	121
FIGURA 6.22 COMPARATIVO DO ATRITO LATERAL OBTIDO POR NILSSON (2008) E A FORMULAÇÃO PROPOSTA COM O ATRITO LATERAL MEDIDO PELO CPT ELÉTRICO .....	124
FIGURA 6.23 RESISTÊNCIA DE PONTA EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. ....	126
FIGURA 6.24 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS ENSAIADOS EM BAURU PELO CPT ELÉTRICO. ....	128
FIGURA 6.25 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS ENSAIADOS EM BAURU PELO CPT ELÉTRICO A CADA METRO. ....	128
FIGURA 6.26 COMPARATIVO DE CLASSIFICAÇÃO DO CPT COM RESULTADOS DINÂMICOS DO DPL CONSIDERANDO O ATRITO LATERAL DE NILSSON (2008). ....	129
FIGURA 6.27 COMPARATIVO DE CLASSIFICAÇÃO DO CPT COM RESULTADOS DINÂMICOS DO DPL CONSIDERANDO O ATRITO LATERAL CALCULADO PELO TORQUE MÁXIMO E A FORMULAÇÃO PROPOSTA. ....	130
FIGURA 6.28 COMPARATIVO DE CLASSIFICAÇÃO DO CPT COM RESULTADOS DINÂMICOS DO DPL CONSIDERANDO O ATRITO LATERAL CALCULADO PELO TORQUE RESIDUAL E A FORMULAÇÃO PROPOSTA. ....	131

## LISTA DE TABELAS.

TABELA 2.1	TIPOS DE COMPORTAMENTO DE SOLO PROPOSTO POR (ROBERTSON ET AL., 1986) .....	10
TABELA 2.2	TIPOS DE COMPORTAMENTOS DE SOLO, PARA ÁBACOS NORMALIZADOS, PROPOSTO POR ROBERTSON (1990). ....	12
TABELA 2.3	CARACTERÍSTICAS DOS PENETRÔMETROS DINÂMICOS SEGUNDO A NORMA ALEMÃ DIN 4094-3:1990. ....	14
TABELA 2.4	DIMENSÕES DOS COMPONENTES PRINCIPAIS DO DCP, SEGUNDO A EN ISO 22476-2:2005. ....	16
TABELA 3.1	CONVENÇÕES ADOTADAS PARA VELOCIDADES E FORÇAS. ....	38
TABELA 3.2	FATORES DE CORREÇÃO DE T* .....	45
TABELA 3.3	VALORES DE $J_{Case}$ .....	46
TABELA 4.1	COMPRIMENTO EFETIVO DAS COMPOSIÇÕES DO DPL COM A HASTE INSTRUMENTADA. ....	63
TABELA 4.2	DADOS UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA DE TENSÃO .....	63
TABELA 5.1	CARACTERÍSTICAS DAS PONTEIRAS. ....	80
TABELA 5.2	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SOLO UTILIZADO EM LABORATÓRIO. ....	81
TABELA 5.3	CRAVAÇÃO INICIAL DAS PONTEIRAS NOS ENSAIOS, DEVIDO AO PESO PRÓPRIO. ....	87
TABELA 6.1	RESULTADOS DE ENERGIA E EFICIÊNCIA PARA AS PROFUNDIDADES DE 1,9 M A 11,9 M. ....	112
TABELA 6.2	RESULTADOS DE FORÇA DINÂMICA PARA AS PROFUNDIDADES DE 1,9M A 11,9M. ....	116
TABELA 6.3	RESULTADOS DE FORÇA DINÂMICA PARA AS PROFUNDIDADES DE 1,9M A 11,9M, OBTIDOS PELO MÉTODO CASE. ....	117
TABELA 6.4	ATRITO LATERAL CALCULADO POR NILSSON (2008) E BASTOS ET AL. (2014) .....	123
TABELA 6.5	RESISTÊNCIAS DE PONTA OBTIDAS DE ACORDO COM AS FORMULAÇÕES DE NILSSON (2008) E DA PROPOSTA NESTE TRABALHO COM OS VALORES DE TORQUE MÁXIMO E RESIDUAL. ....	125
TABELA 6.6	DADOS PARA A CLASSIFICAÇÃO DO SOLO UTILIZANDO O ÁBACO DE ROBERTSON ET AL. (1986), CONSIDERANDO OS DIFERENTES ATRITOS LATERAIS UTILIZADOS. ....	127

## LISTA DE SÍMBOLOS.

$\Delta\rho$	Penetração média por golpe da ponteira.
$\rho$	Penetração medida da ponteira.
$\varepsilon(t)$	Deformação sofrida pela haste em função do tempo.
$\sigma_x$	Tensão longitudinal em uma barra/haste metálica.
$\rho$	Massa específica das hastes metálicas.
$A_p$	Área projetada da ponteira cônica.
$A_t$	Área da seção transversal de uma haste.
$a(t)$	Aceleração em função do tempo.
$c$	Velocidade de propagação de onda de tens
$E$	Módulo de elasticidade.
$EFV$	Energia calculada pelo método $E= FV$ .
$E_{meas}$	Energia medida pela norma EN ISO 22476-2:2005.
$E_{nthru}$	Energia transmitida às hastes medida no topo da composição.
$EP_T$	Energia potencial teórica do sistema.
$EP_S$	Energia potencial do sistema, segundo Odebrecht (2003)
$F(t)$	Força em função do tempo.
$F_d$	Força dinâmica.
$F_x$	Força de compressão.
$f_s$	"Sleeve friction", ou atrito lateral do CPT.
$g$	Aceleração da gravidade, adotado em $9,81 \text{ m/s}^2$ .
$h_q$	Altura de queda do martelo utilizado.
$I$	Impulso no elemento de barra/haste metálica.
$L$	Comprimento das hastes metálicas
$m$	Massa das partículas de um elemento de barra/haste metálica
$m_M$	Massa do martelo utilizado.
$N_{10}$	Número de golpes do martelo necessário para cravar um penetrômetro 10 cm (100 mm) no solo.
$N_{20}$	Número de golpes do martelo necessário para cravar um penetrômetro 20 cm (200 mm) no solo.

---

$N_{SPT}$	Soma do número de golpes necessários para cravar os últimos 30 cm do amostrador do SPT no solo.
$q_c$	Resistência de ponta do CPT.
$q_t$	Resistência de ponta corrigida em relação à poropressão, no CPTu.
$Q$	Quantidade de movimento.
$r_d$	Tensão de resistência dinâmica de ponta.
$R_f$	Razão de fricção utilizada na análise dos dados do CPT/CPTu.
$t$	Tempo.
$u$	Poropressão
$u_1$	Poropressão medida no cone da ponteira do CPT.
$u_2$	Poropressão medida na base da ponteira do CPT.
$u_3$	Poropressão medida na luva da ponteira do CPT.
$v$	Velocidade das partículas no interior de um elemento de barra/haste metálica comprimido.
$v(t)$	Velocidade em função do tempo.
$Z$	Impedância das hastes.

## LISTA DE SIGLAS.

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPT	Cone Penetration Test, ensaio de penetração de cone
CTPu	CPT com medida de poropressão.
DCP	Dynamic Cone Probing
DIN	Deutsches Institut für Normung
DPL	Dynamic Probe Light
ISO	International Organization for Standardization
ISSMFE	International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
NBR	Norma Brasileira
SPT	Standard Penetration Test

# SUMARIO.

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS.....	2
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	2
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1	ENSAIOS ESTÁTICOS.....	4
2.2	ENSAIOS DINÂMICOS DE CONE.....	12
2.3	O DPL MODIFICADO POR NILSSON EM 2001.....	22
2.4	VANTAGENS E LIMITAÇÕES DOS ENSAIOS DINÂMICOS DE CONE.....	30
2.5	PESQUISAS SOBRE ENERGIA NO DCP.....	31
<b>3</b>	<b>TEORIA DA PROPAGAÇÃO DA ONDA LONGITUDINAL DE TENSÃO.....</b>	<b>33</b>
3.1	A ENERGIA ASSOCIADA À ONDA LONGITUDINAL DE TENSÃO.....	36
3.2	SOLUÇÕES FECHADAS DA ONDA DE TENSÃO INICIAL.....	38
3.3	ALTERAÇÃO DA IMPEDÂNCIA HASTE.....	42
3.4	MÉTODO CASE.....	44
3.5	TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA NO ENSAIO DPL.....	46
<b>4</b>	<b>A INSTRUMENTAÇÃO DINÂMICA.....</b>	<b>49</b>
4.1	A CÉLULA DE CARGA.....	49
4.2	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS HBM MX410.....	50
4.3	CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA.....	52
4.4	SUPORTES DE FIXAÇÃO DOS ACELERÔMETROS.....	54
4.5	ACELERÔMETROS.....	55
4.6	PROCESSAMENTO DOS DADOS DINÂMICOS.....	56
4.7	VERIFICAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO DINÂMICA.....	71
4.8	PROPOSTA DE NOVA INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO DE TORQUE.....	75
<b>5</b>	<b>ENSAIOS COMPLEMENTARES.....</b>	<b>79</b>
5.1	RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DAS PONTEIRAS EM LABORATÓRIO.....	80
5.2	TESTE DO DPL EM CAMPO.....	82
5.3	RESULTADOS PRELIMINARES.....	86
<b>6</b>	<b>CAMPANHA DE ENSAIOS DE CAMPO EM BAURU.....</b>	<b>97</b>
6.1	GEOLOGIA DE BAURU E REGIÃO.....	97
6.2	ASPECTOS GEOTÉCNICOS.....	98
6.3	ENSAIOS REALIZADOS.....	99

6.4	RESULTADOS .....	106
	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>133</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA. ....</b>	<b>134</b>
<b>ANEXO I</b>	<b>COMPONENTES DO DPL.....</b>	<b>138</b>
<b>ANEXO II</b>	<b>DADOS DO DPL MEDIDOS EM LABORATÓRIO.....</b>	<b>140</b>
<b>ANEXO III</b>	<b>DADOS COLETADOS E TABELADOS NA CAMPANHA DE ENSAIOS DE BAURU. ....</b>	<b>142</b>
<b>ANEXO IV</b>	<b>SOFTWARE DE TRATAMENTO DE DADOS.....</b>	<b>146</b>

# 1 INTRODUÇÃO.

Existem diversos ensaios de campo que objetivam estimar as propriedades geotécnicas do solo, dentre os mais conhecidos e estudados estão o SPT e o CPT, ambos amplamente usados no Brasil e no exterior.

Os ensaios feitos com penetrômetros dinâmicos de cone, dentre eles o DPL, são pouco difundidos no uso cotidiano da engenharia geotécnica brasileira, a despeito de serem ensaios de baixo custo e frequentemente usado nos países europeus e asiáticos.

Enquanto o ensaio SPT é normatizado pela ABNT, os ensaios dinâmicos de cone não o são, o que significa que no Brasil inexistem regulamentações sobre o equipamento e sua operação, o que implica que os engenheiros geotécnicos tenham que recorrer a normas internacionais para o fabrico e a operação destes equipamentos, e principalmente para interpretar os resultados obtidos.

O DPL modificado por Nilsson é um equipamento leve, simples, de fácil operação, que apresenta grande mobilidade e capacidade de acesso a locais em onde outros equipamentos não entrariam, ou teriam grandes dificuldades de entrar, como matas fechadas, relevo acidentado, regiões alagadiças e pequenos rios. Ao contrário do que ocorre na Europa, não é um equipamento normatizado.

A interpretação de seus resultados ainda carece de estudos, e apesar de ser um ensaio dinâmico como o SPT, pode ser interpretado a partir de medidas de resistência de ponta e atrito lateral, como é feito no CPT que é um ensaio "quasi-estático".

A ponteira do DPL guarda algumas semelhanças geométricas com a ponteira usada no CPT, como a área de projeção de 10 cm<sup>2</sup>, porém enquanto o CPT usa uma ponteira com ângulo de ápice de 60°, no DPL modificado por Nilsson é usada uma ponteira com ângulo de ápice de 90°. Porém, existem equipamentos em uso no Brasil que trabalham com ponteiros com ápice de 60°

As pesquisas que buscam explicar de forma racional o comportamento de ensaios dinâmicos são voltadas quase que em sua totalidade para a interpretação do ensaio SPT, sob o ponto de vista do princípio de conservação de energia de Hamilton.

Diversos e importantes trabalhos vem sendo publicados sobre a transferência de energia potencial associada à queda de um martelo e a conseqüente cravação do SPT e seu amostrador no solo. Tais princípios podem e devem ser aplicados ao DPL, pois do mesmo modo que o SPT, o DPL faz uso do impacto de um martelo para cravar uma ponteira no solo.

## 1.1 OBJETIVOS.

Este trabalho tem como objetivo principal interpretar racionalmente os resultados do ensaio DPL, com base em medições de força e aceleração e utilizando a teoria da equação de onda.

### 1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Desenvolver uma haste instrumentada para conexão no DPL visando medir força e aceleração devido ao impacto do martelo.
- Investigar a influência da geometria de ponta na cravação das ponteiros do DPL no solo.
- Quantificar o atrito lateral da ponteira do DPL com base em sua geometria e no ensaio de torque.
- Determinar a resistência dinâmica da ponta, com base no trabalho realizado pela ponta durante sua penetração no solo.
- Classificar o solo ensaiado com base no atrito lateral e a resistência de ponta com base em energia, usando o ábaco de Robertson *et al.* (1986).
- Investigar o comportamento dos coxins utilizados como amortecedores no sistema.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.

Este trabalho está organizado em 7 capítulos conforme segue abaixo:

- Capítulo 1: trata da introdução ao trabalho, estabelecendo sua importância, seus objetivos e sua organização.
- Capítulo 2: estabelece a bibliografia consultada no trabalho, e a sintetiza estabelecendo o desenvolvimento histórico dos principais ensaios de cone, entre eles o DPL, descreve o ensaio DPL no que se refere a seus equipamentos e sua operação básica.
- Capítulo 3: resume os principais conceitos envolvidos na teoria da onda unidimensional, que trata da transferência de energia e sua aplicação no DPL.
- Capítulo 4: define a instrumentação dinâmica a ser utilizada, bem como os softwares usados, a calibração da instrumentação e estabelece uma nova formulação para relacionar o torque medido com o atrito lateral da ponteira do DPL.
- Capítulo 5: aborda a campanha experimental realizada no campus da FEG-UNESP, com ensaios de laboratório e de campo para se compreender a influência da geometria de ponta no DPL.

- 
- Capítulo 6: aborda a campanha experimental realizada no campus da FEB-UNESP, onde foram realizados ensaios de campo com o DPL e CPT elétrico e mecânico, o que permitiu estabelecer critérios que permitiu classificar o solo de acordo com o ábaco usado no CPT.
  - Conclusões: apresenta as principais conclusões sobre o trabalho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

Todo projeto de engenharia civil deve ser precedido de uma campanha de investigação geotécnica, de forma que sejam determinadas as características e propriedades do subsolo do local onde será realizada a obra, tais como sua estratigrafia, as propriedades geomecânicas das diferentes camadas de solo, as profundidades do nível freático e do impenetrável, etc. A investigação geotécnica é feita através de ensaios de campo (investigações "in-situ") e das análises laboratoriais dos materiais coletados durante o trabalho de campo.

A necessidade de se investigar o subsolo fez com que fossem desenvolvidos diversos tipos de equipamentos capazes de fornecer os dados que possibilitam aos engenheiros geotécnicos estimar as propriedades do solo e, dentre estes equipamentos, destacam-se os diversos tipos de penetrômetros de cone.

Um penetrômetro de cone consiste em um conjunto formado por uma ou mais hastes metálicas rígidas, acopladas a uma ponteira cônica em sua extremidade inferior.

Este conjunto pode ser empurrado para o subsolo através de macacos hidráulicos (método estático) ou cravado através de golpes de um martelo (método dinâmico). Os dois métodos permitem que a resistência oferecida pelo solo à penetração do conjunto de hastes e ponteira seja registrado em toda profundidade alcançada.

Os dados obtidos geralmente são representados em gráficos onde a resistência oferecida pelo solo ao avanço da ponteira é registrada na abscissa e a profundidade na ordenada.

### 2.1 ENSAIOS ESTÁTICOS.

De acordo com Sanglerat (1972), entre 1932 e 1937 Barentsen desenvolveu um penetrômetro estático utilizando uma ponteira mecânica com uma luva móvel cônica, cujo ângulo de ápice era de 60°, o diâmetro de 36 mm, e a área projetada de ponta era de 10 cm<sup>2</sup>, originando o que atualmente se conhece como Cone Penetration Test ou simplesmente CPT.

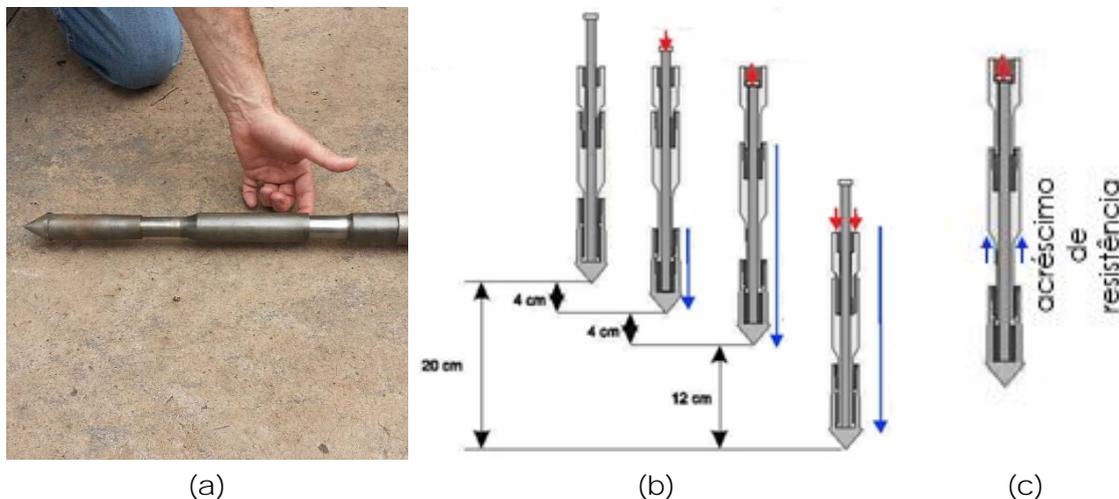
Segundo Massarsch (2014), um avanço tecnológico significativo ocorreu em 1953, quando Begemann adicionou uma luva de atrito independente à ponteira, logo acima do cone, de forma a permitir a medida da resistência lateral  $f_s$ , além da resistência de ponta  $q_c$  a cada 20 cm de penetração do equipamento no solo, criando o que hoje é conhecido como cone mecânico, Figura 2.1(a). A realização do ensaio de cone mecânico consiste em posicionar o equipamento totalmente recolhido a uma determinada profundidade, para inicialmente cravar a ponta cônica por 4 cm no solo, obtendo-se assim a resistência de ponta  $q_c$ , Figura 2.1(b). Em seguida o conjunto formado

pela conta cônica e a luva de atrito é cravado por mais 4 cm no solo, obtendo-se a resistência total, formada pela soma da resistência de ponta  $q_c$  e do atrito lateral  $f_s$ . O equipamento é recolhido e cravado por mais 12 cm, de forma a permitir a realização de uma nova medida. O valor do atrito lateral é obtido pela subtração da resistência de ponta da resistência total.

Apesar de ser utilizado até os dias atuais, segundo de Ruitter (1971) o cone mecânico de Begemann apresenta resultados superestimados para a medida da resistência lateral  $f_s$ , uma vez que é desenvolvido um acréscimo de resistência no bordo inferior da luva de atrito, Figura 2.1(c), que é somada ao registro da resistência total, e assim indiretamente acrescida ao valor calculado da resistência lateral  $f_s$ . Segundo Giacheti et al. (2004) o atrito lateral obtido pelo cone mecânico equivale ao dobro do atrito lateral medido pelo cone elétrico.

Segundo Fellenius e Eslami (2000), Begemann mostrou que os solos de granulares apresentam valores de resistência de ponta e de atrito lateral mais altos que os apresentados pelos solos finos, e que uma classificação dos solos a partir dos resultados do ensaio CPT não é função dos valores isolados de  $q_c$  ou  $f_s$ , mas sim função de uma combinação dos dois valores.

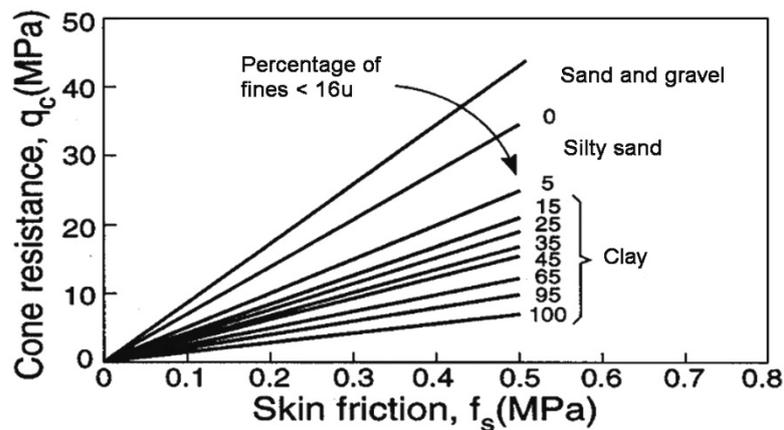
Figura 2.1 Cone mecânico de Begemann.



Fontes: (a) arquivos pessoais do autor; (b) e (c) adaptados de <http://www.pagani-geotechnical.com>.

Begemann propôs a utilização de um ábaco, Figura 2.2, representando a resistência de ponta em função do atrito lateral, e mostrou que o tipo de solo está relacionado ao que chamou de razão de atrito  $R_f$ , que é a razão entre o atrito lateral e a resistência de ponta medidos no CPT. A razão de atrito  $R_f$  é representada pela inclinação das linhas apresentadas no ábaco.

Figura 2.2 Ábaco de classificação de solos proposto por Begemann.



Fonte: Robertson e Cabal (2009)

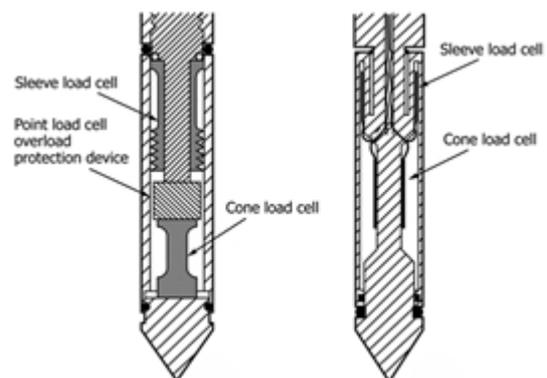
Segundo Robertson e Cabal (2009), em 1965 a empresa Fugro desenvolveu a primeira ponteira elétrica, que serviu de base para as normatizações atuais do CPT, bem como base de desenvolvimento das ponteiros elétricas mais recentes, Figura 2.3(a). Neste tipo de ponteira, não existem movimentações mecânicas da ponta cônica ou da luva de atrito. Ambas estão ligadas a células de carga independentes, Figura 2.3(b), geralmente strain gauges formados por pontes de Wheatstone completas, de forma que são capazes de registrar simultaneamente tanto a resistência de ponta  $q_c$  quanto o atrito lateral  $f_s$  na medida em que o equipamento é cravado no subsolo.

De acordo com a norma americana ASTM D5778-12:2012, a base do cone deve ter um diâmetro de 35,7 mm, o que resulta em uma área projetada de 10 cm<sup>2</sup>, e um ângulo de ápice de 60°. A luva de atrito deve possuir o mesmo diâmetro da base do cone e um comprimento de 134 mm, o que resulta em uma área lateral de 150 cm<sup>2</sup>. As células de carga geralmente são ligadas a um sistema de aquisição automático de dados através de cabos apropriados que passam no interior das hastes.

Figura 2.3 Cone elétrico.



(a)



(b)

Fonte: (a) <http://www.gouda-geo.com/products>; (b) ASTM D5778-12:2012.

Estes avanços tecnológicos permitiram eliminar os registros incorretos de atrito lateral que ocorriam no cone mecânico, e possibilitaram a execução do ensaio de forma contínua, com uma velocidade de penetração no subsolo constante (2 cm/s), com maior precisão dos dados registrados.

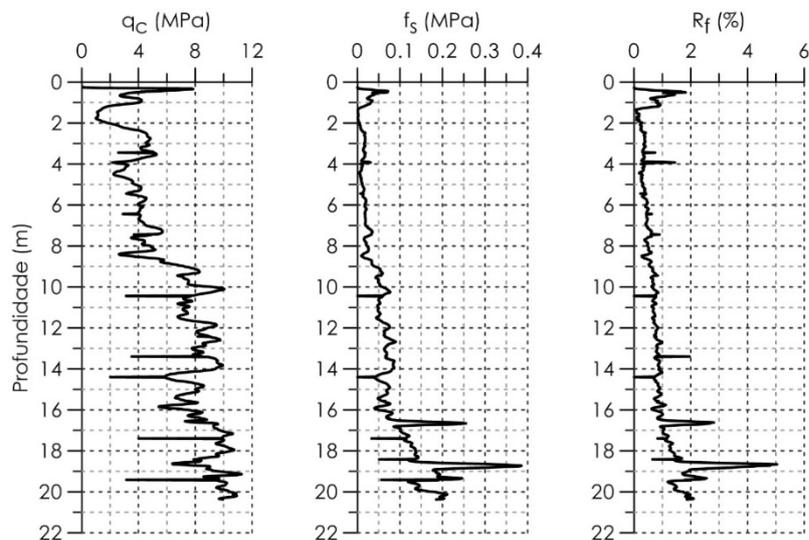
A partir dos dados registrados no ensaio, é calculada a razão de atrito  $R_f$ , dada pela Eq. (2.1), e que é utilizada para a classificação das camadas de solo.

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \quad \text{Eq. (2.1)}$$

Os valores medidos da resistência de ponta  $q_c$ , do atrito lateral  $f_s$ , assim como os valores calculados da razão de atrito  $R_f$  são plotados em gráficos em função da profundidade, como mostrado na Figura 2.4.

Através destes gráficos é possível se estabelecer uma identificação das camadas do solo, através de algumas relações conhecidas. Camadas de areias, por exemplo, são identificadas através de valores altos de  $q_c$ , associados a valores baixos de  $R_f$  (no máximo entre 1% e 2%). Já as camadas de argilas são identificadas por valores baixos de  $q_c$ , associados a valores altos de  $R_f$  (geralmente acima de 2%).

Figura 2.4 Exemplo de resultados obtidos pelo CPT elétrico.



Fonte: arquivos pessoais do autor.

Segundo Robertson e Cabal (2009), em 1974 surgem os primeiros cones que além da resistência de ponta, e do atrito lateral, também mediam a poropressão  $u$  exercida pela água presente no subsolo (piezocones).

A medida da poropressão é feita através de sensores que utilizam anéis filtrantes (Figura 2.5), que podem estar posicionados no meio da parte cônica da ponteira,  $u_1$ , imediatamente acima da base da ponta cônica,  $u_2$ , ou ainda na luva de atrito,  $u_3$ . Os

ensaios realizados com piezocones são conhecidos como CPT com medida de poropressão ou simplesmente CPTu. As dimensões padrões dos piezocones, segundo a norma americana ASTM D5778-12:2012, são as mesmas dos cones elétricos.

Figura 2.5 Piezocone com elemento filtrante em  $u_2$ .



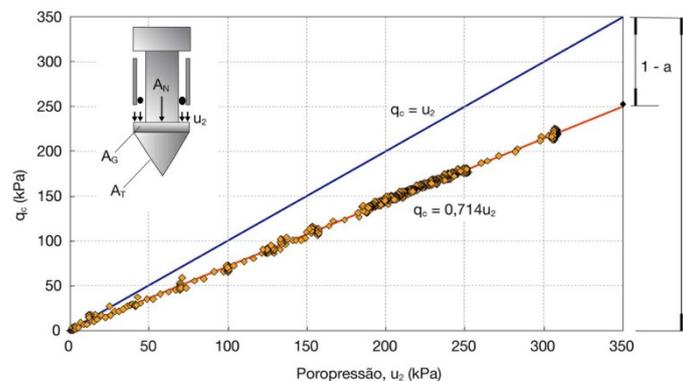
Fonte: arquivos pessoais do autor.

A resistência de ponta dos piezocones, especialmente em argilas, siltes ou abaixo de água, sofre interferência da água que atua na ponteira. A resistência  $q_c$  precisa ser corrigida com relação aos efeitos da poropressão que atua em áreas desiguais da geometria do cone, de forma a obter a resistência  $q_t$  correspondente à resistência real mobilizada durante a penetração da ponteira no solo (ROBERTSON E CABAL, 2009; SCHNAID E ODEBRECHT, 2012). Esta correção é feita pela aplicação da Eq. (2.2):

$$q_t = q_c + (1 - a) \cdot u_2 \quad \text{Eq. (2.2)}$$

onde o coeficiente  $a$  representa uma razão líquida de áreas influenciadas pelo efeito de poropressão e pode ser determinado graficamente durante o processo de calibração do piezocone, como mostrado na Figura 2.6. Segundo Robertson e Cabal (2009), para solos arenosos, acima do nível d' água, pode-se considerar  $q_t = q_c$ .

Figura 2.6 Determinação do coeficiente "a" da correção da resistência de ponta do piezocones.



Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012).

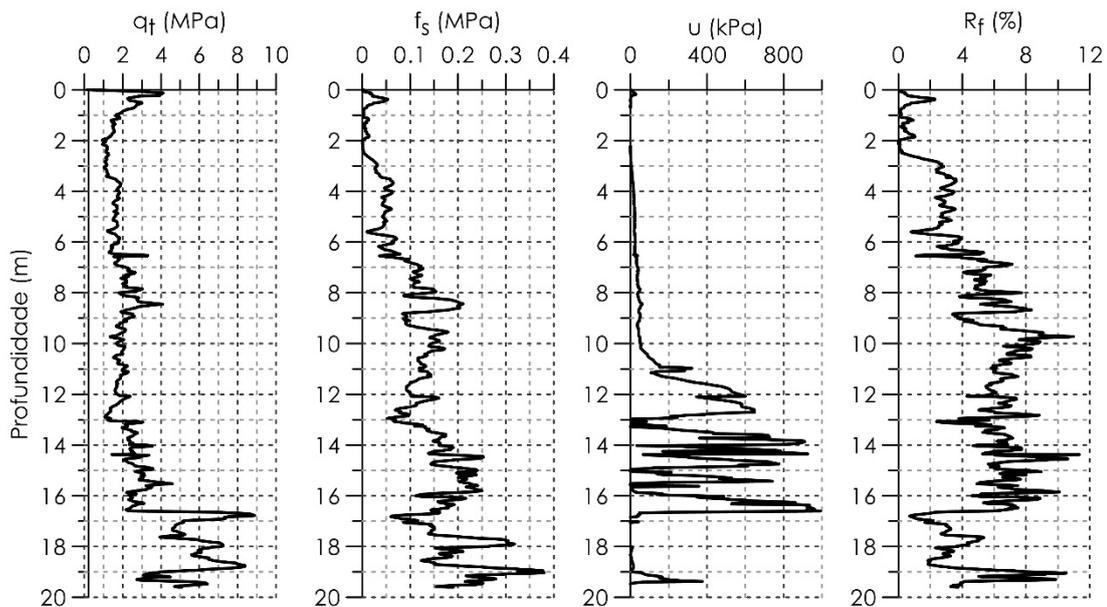
A razão de atrito  $R_f$  passa a ser definida em função da resistência real mobilizada  $q_t$ , de acordo com a Eq. (2.3).

$$R_f = \frac{f_s}{q_t} \quad \text{Eq. (2.3)}$$

No caso de ensaios de CPTu, os valores da resistência mobilizada  $q_t$ , do atrito lateral  $f_s$ , da poropressão  $u$  e da razão de atrito  $R_f$  são plotados em gráficos em função da profundidade (Figura 2.7).

Os ensaios de CPT e CPTu normalmente são utilizados para determinar o perfil estratigráfico do subsolo e tipificar os estratos de acordo com seu comportamento geomecânico, não sendo adequados para fornecer previsões precisas do tipo de solo com base em características físicas como o tamanho e a distribuição dos grãos. De acordo com Robertson e Cabal (2009), a previsão do tipo de solo baseada em seu comportamento geomecânico é feita através do uso de ábacos.

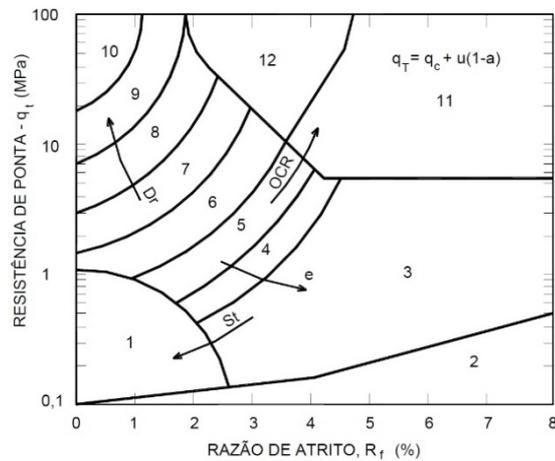
Figura 2.7 Exemplo de resultados obtidos pelo CPTu.



Fonte: arquivos pessoais do autor.

O ábaco mais comumente utilizado, proposto por Robertson *et al.* (1986), utiliza os valores de  $q_t$  e  $R_f$  para prever o comportamento do solo, Figura 2.8, além de mostrar tendências gerais como os incrementos da densidade relativa  $D_r$ , do OCR, do índice de vazios  $e$ , e da sensibilidade do solo  $S_t$ . No caso do ensaio de cone elétrico (CPT), não há medida de poropressão, assim adota-se  $q_t = q_c$ , possibilitando o uso do ábaco.

Figura 2.8 Ábaco para classificação do solo pelo seu comportamento geomecânico proposto por Robertson et al. (1986).



Fonte: Robertson et al. (1986).

Neste ábaco são definidas 12 zonas, cada qual associada a um tipo de comportamento de solo, especificadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Tipos de comportamento de solo proposto por (ROBERTSON et al., 1986)

Zona	Tipo de comportamento de solo
1	Solo fino sensível
2	Solo orgânico
3	Argila
4	Argila siltosa à argila
5	Silte argiloso à argila siltosa
6	Silte arenoso à silte argiloso
7	Areia siltosa à silte arenoso
8	Areia à areia siltosa
9	Areia
10	Areia com pedregulho para areia
11	Areias finas rígidas *
12	Areia à areia argilosa *

\* sobreadensada ou cimentada

Fonte: Robertson et al. (1986).

De acordo com Robertson (1990), na medida em que os valores de  $q_t$  e  $R_f$  aumentam gradativamente com o aumento da profundidade, a classificação dos solos pelo ábaco da Figura 2.8 também muda. A explicação para isso se deve ao fato de que a resistência de ponta, o atrito lateral e a poropressão tendem a aumentar na medida em que a tensão vertical aumenta com a profundidade em que se encontra o piezocone e são feitas as medidas. Assim, é sugerido que os dados obtidos pelo CPTu sejam normalizados e os seguintes parâmetros sejam usados para na classificação dos solos:

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \quad \text{Eq. (2.4)}$$

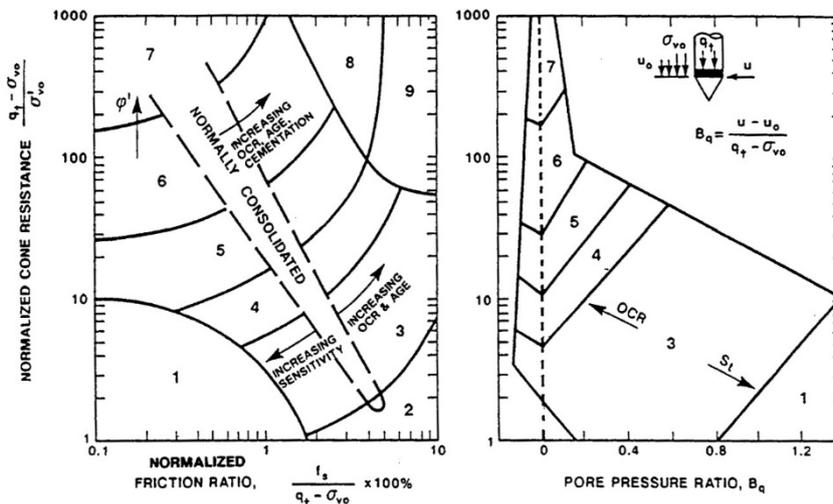
$$F_R = \frac{fs}{q_t - \sigma_{v0}} \quad \text{Eq. (2.5)}$$

$$B_q = \frac{u - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma_{v0}} \quad \text{Eq. (2.6)}$$

onde  $Q_t$  é a resistência de ponta normalizada,  $F_R$  a razão de atrito normalizada,  $B_q$  a razão de poropressão normalizada,  $\sigma_{v0}$  a tensão vertical,  $\sigma'_{v0}$  a tensão vertical efetiva,  $u$  a poropressão e  $u_0$  a pressão hidrostática.

A partir destes parâmetros, Robertson (1990) propõe o uso de dois ábacos normalizados para se fazer a classificação dos solos de acordo com seu comportamento, Figura 2.9, o primeiro relacionando  $Q_t$  versus  $F_R$  e o segundo relacionando  $Q_t$  versus  $B_q$ .

Figura 2.9 Ábacos de classificação de solos propostos por Robertson (1990) baseados em dados normalizados de CTPu.



Fonte: Robertson (1990).

Nestes ábacos são identificadas 9 zonas, cada qual associada a um tipo de comportamento de solo, especificadas na Tabela 2.2.

No ábaco que relaciona  $Q_t$  versus  $F_R$  é apontada uma região que representa o comportamento de solos normalmente adensados, as tendências de aumento de OCR e da idade do solo; na região de solos finos é apontada a tendência de aumento da sensibilidade e, na região de solos granulares são apontadas as tendências de aumento do ângulo de atrito, do OCR, da idade e da cimentação.

O ábaco que relaciona  $Q_t$  versus  $F_R$  pode ser usado com dados obtidos pelo cone elétrico (assumindo  $q_t = q_c$ ) ou pelo piezocone, enquanto que o ábaco que relaciona  $Q_t$  versus  $B_q$  é usado exclusivamente com dados obtidos pelo piezocone pois há a necessidade de se conhecer a poropressão.

Tabela 2.2 Tipos de comportamentos de solo, para ábacos normalizados, proposto por Robertson (1990).

Zona	Tipo de comportamento de solo
1	Solo fino sensível
2	Solo orgânico e turfas
3	Argilas a argilas siltosas
4	Argilas siltosas a siltes argilosos
5	Siltes arenosos a areias siltosas
6	Areias limpas areias siltosas
7	Areias com predregulhos a areias
8	Areias rígidas a areias argilosas
9	Areias muito finas e rígidas

Fonte: Robertson (1990).

## 2.2 ENSAIOS DINÂMICOS DE CONE.

Segundo Hashmat (2000), os atuais ensaios dinâmicos de cone (Dynamic Cone Probing ou DCP) surgiram na Europa no período entre as duas Guerras Mundiais e, após 1945, foram amplamente difundidas dentro e fora da Europa.

De acordo com Massarsch (2014), em 1936 foi desenvolvido um penetrômetro dinâmico leve, que utilizava inicialmente um martelo de 5 kg (posteriormente modificado para 10 kg) com altura de queda de 50 cm para ser cravado no solo e, originalmente, a penetração obtida para cada 10 golpes do martelo era registrada. Posteriormente foi acrescentada uma ponteira cônica com diâmetro de 35,6 mm ao equipamento. Na mesma época foi desenvolvido um penetrômetro dinâmico pesado na Suécia, e em 1950 na antiga URSS foi desenvolvido outro modelo. Nestes, basicamente um martelo de 60 kg e altura de queda de 80 cm era usado para conduzir um conjunto de hastes de aço provido de uma ponteira cônica com diâmetro de 74 mm no solo, e registrava-se o número de golpes necessários para se avançar uma determinada distância no solo. Outros modelos foram desenvolvidos na França, na Alemanha e em outros países europeus, e começaram a ser normatizados a partir de 1964 na Alemanha.

Sanglerat (1972) e Hashmat (2000) ressaltam que originalmente os penetrômetros dinâmicos foram projetados para fornecer dados qualitativos sobre a resistência à penetração no solo e, particularmente para determinar a compacidade de solos não coesivos difíceis de serem amostrados.

Também são usados para se verificar a uniformidade das condições do solo em um determinado terreno de forma a estimar a localização e a espessura de diferentes estratos do subsolo, além de determinar a profundidade do leito rochoso. Atualmente também são usados no projeto de fundações rasas ou por estacas, determinando a capacidade de carga dos diversos estratos do subsolo (SANGLERAT, 1972).

Na Europa é comum usar o DCP na fase de investigações preliminares para estimar a resistência e a compressibilidade dos diversos estratos do subsolo (HASHMAT, 2000).

### 2.2.1 TIPOS DE DCP.

Usualmente os ensaios dinâmicos de cone são classificados de acordo com a massa e a altura de queda do martelo usado para cravar as hastes e a ponteira cônica no solo. As diferentes combinações de massa do martelo e altura de queda do mesmo, implicam em diferentes energias de cravação do penetrômetro no solo. Segundo Hashmat (2000), considerando a massa dos martelos empregados, em ordem crescente, os principais tipos de DCP são:

- DPL (Light Dynamic Probing), são penetrômetros que utilizam os martelos mais leves, geralmente de 5 kg ou 10 kg, apresentando em geral a menor energia de cravação.
- DPM (Medium Dynamic Probing), são penetrômetros cujos martelos tem massa intermediária entre os mais leves e os pesados, geralmente de 30 kg.
- DPH (Heavy Dynamic Probing), são penetrômetros que usam martelos com massas maiores que o DPM e menores que os mais pesados, geralmente de 50 kg.
- DPSH (Super Heavy Dynamic Probing), são os penetrômetros com martelos de maior massa, geralmente de 63,5 kg, apresentando a maior energia de cravação.

Em geral a altura de queda dos martelos é de 50 cm. Porém, de acordo com a norma utilizada, o peso e a altura de queda pode mudar, mas a nomenclatura básica é a exposta acima.

Os resultados dos ensaios são registrados geralmente em termos do número de golpes necessários para se cravar o penetrômetro 10 cm ou 20 cm no solo ( $N_{10}$  ou  $N_{20}$ ), e normalmente representados através de gráficos com o número de golpes na abscissa e a profundidade na ordenada.

A escolha do equipamento DCP para um dado trabalho normalmente depende das condições do local onde será feita a investigação e o propósito desta.

### 2.2.2 NORMATIZAÇÃO.

No Brasil os ensaios dinâmicos de cone além de serem pouco difundidos, principalmente frente ao SPT e ao CPT, carecem de padronização e normatização. No entanto, os ensaios e os equipamentos utilizados estão padronizados em mais de 20 países e existem referências internacionais para os procedimentos do ensaio estabelecidas pela ISSMFE (1989). A norma alemã DIN 4094-3:1990, e posteriormente a European Standard EN ISO 22476-2:2005 tem sido usadas como referência para o ensaio.

Destas normas, apenas a segunda possui referências a medidas de energia no DCP, sendo superficial no que se refere aos ensaios de medida de energia, principalmente

quanto a equipamentos e procedimentos usados. Em virtude disso, também é apresentada a norma americana ASTM D4633-10 que padroniza métodos de ensaio de medida de energia em penetrômetros dinâmicos.

### 2.2.3 NORMA ALEMÃ DIN 4094-3:1990.

A norma DIN 4094-3 define tipos, equipamentos básicos e aplicações de diversos penetrômetros, incluindo o SPT e o CPT. Com relação aos penetrômetros de dinâmicos de cone, são definidas cinco categorias, cujas principais características estão relacionadas na Tabela 1.2, abaixo.

Tabela 2.3 Características dos penetrômetros dinâmicos segundo a norma alemã DIN 4094-3:1990.

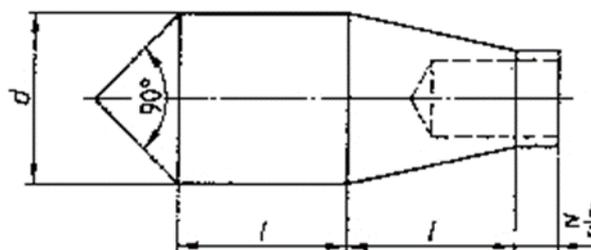
	Unid.	DPL	DPL-5	DPM	DPM-A	DPH
Área nominal da base do cone	cm <sup>2</sup>	10	5	10	10	15
Diâmetro da base do cone	mm	35,7±0,3	25,2±0,2	35,7±0,3	35,7±0,3	43,7±0,3
Massa do martelo	kg	10,0±0,1	10,0±0,1	30,0±0,3	30,0±0,3	50,0±0,5
Altura de queda do martelo	m	0,50±0,01	0,50±0,01	0,50±0,01	0,20±0,01	0,50±0,01
Diâmetro da ponteira	mm	34,0	24,0	34,0	34,0	42,0
Energia do golpe	kJ/m <sup>2</sup>	50	50	150	150	167

Fonte: Adaptado de DIN 4094-3:1990.

Os resultados devem ser apresentados em termos de número de golpes necessários para se cravar a ponteira 10 cm no solo ( $N_{10}$ ) não oferecendo outras possibilidades de registro dos resultados.

Por ser mais antiga que a norma europeia EN ISO 22476-2:2005, apresenta definições mais simplistas, não havendo qualquer referência ao uso de torquímetro, e também a medições de energia dinâmica do equipamento. As ponteiros cônicas para todos os penetrômetros dinâmicos são especificadas com ângulo de ápice de 90° (Figura 2.10), variando basicamente em seu diâmetro, o que implica em áreas projetadas de ponta diferentes.

Figura 2.10 Geometria da ponteira dos penetrômetros dinâmicos de acordo com a norma DIN 4094:1990.



Fonte: DIN 4094:1990.

A diferença entre o DPL e o DPL-5 está na área projetada da ponteira cônica, e não na energia aplicada no golpe, uma vez que ambas utilizam martelo de 10 kg em

queda de uma altura de 50 cm. Não existe especificação de penetrômetro padrão Super Heavy (DPSH).

A interpretação dos ensaios é feita através dos valores registrados de  $N_{10}$  ao longo da profundidade do ensaio, apresentados através de gráficos.

#### **2.2.3.1 CONSIDERAÇÕES.**

É importante notar que nesta norma não existe nenhuma consideração quanto à energia de cravação fornecida pelo impacto do martelo sobre o conjunto de hastes e ponteira. A energia potencial fornecida pelo martelo é dada pelo produto da massa do martelo pela altura de queda do mesmo.

Para um determinado equipamento, podem ocorrer variações da energia fornecida pelo martelo durante o impacto, porém essa variação é diretamente relacionada às variações da altura de queda do martelo, bem como perdas de energia por atrito entre o martelo e partes do sistema como a haste guia, antes de ocorrer o impacto. As variações de energia implicam na variação do número de golpes necessários para cravar o penetrômetro 10 cm no solo,  $N_{10}$ . Maior energia no impacto implica em menor número de golpes, enquanto que menor energia implica em maior número de golpes.

Como a interpretação dos resultados é dada em função dos valores obtidos de  $N_{10}$  ao longo da profundidade, a mesma é influenciada pela energia realmente transferida para as hastes pelo impacto do martelo.

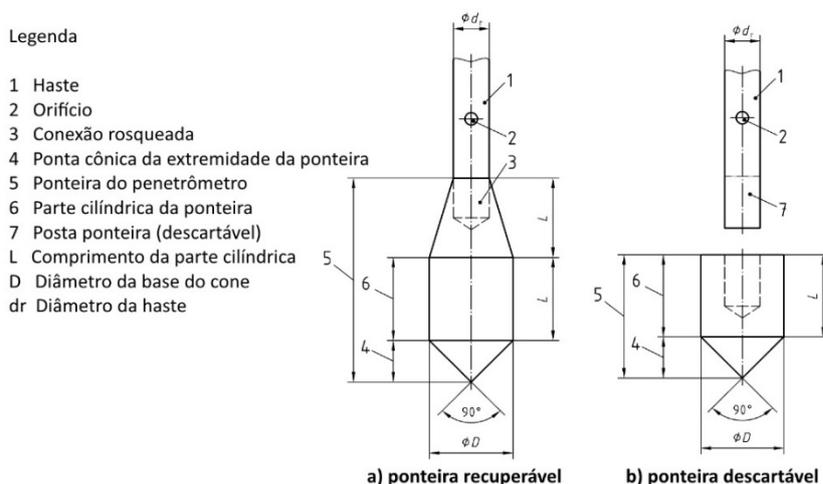
#### **2.2.4 NORMA EUROPEIA EN ISO 22476-2:2005.**

Define o penetrômetro dinâmico como um conjunto de hastes metálicas, associado a uma ponteira cônica que pode ser recuperável ou não, e todos os equipamentos necessários para cravar este conjunto no subsolo.

A norma padroniza 4 tipos de penetrômetros dinâmicos, cujas características encontra-se relacionadas na Tabela 2.4. Segundo essa norma, as ponteiros cônicas devem ter um ângulo de ápice de 90°, conforme pode ser observado na Figura 2.11.

A norma prevê o uso de um torquímetro, de capacidade máxima de 200 N.m e divisões de 5 N.m, que deve ser acoplado às hastes à cada vez que se cravar o equipamento 1 m no subsolo, quando o conjunto deve ser rotacionado lentamente e o torque medido. O torquímetro pode estar associado a algum tipo de sistema de eletrônico aquisição e registro de dados. Pela norma, o torque é apenas informado no relatório de ensaio, e a informação não é utilizada em cálculos posteriores.

Figura 2.11 Formas das ponteiros dos penetrômetros dinâmicos.



Fonte: adaptado de EN ISO 22476-2:2005.

Tabela 2.4 Dimensões dos componentes principais do DCP, segundo a EN ISO 22476-2:2005.

	Unid.	DPL	DPM	DPH	DPSH	
					DPSH-A	DPSH-B
Massa do martelo	kg	10±0,1	30±0,3	50±0,5	63,5±0,5	63,5±0,5
Altura de queda	mm	500±10	500±10	500±10	500±10	750±20
Diâmetro da cabeça de bater	mm	>50	>50	>50	>50	>50
Massa da cabeça de bater (max)	kg	6	18	18	18	30
Área nominal da base do cone	cm <sup>2</sup>	10	15	15	16	20
Diâmetro da base do cone novo	mm	35,7±0,3	43,7±0,3	43,7±0,03	45,0±0,3	50,5±0,5
Diâmetro mínimo da base do cone usado	mm	34	42	42	43	49
Comprimento da parte cilíndrica	mm	35,7±0,1	43,7±0,1	43,7±0,1	90,0±2	51±2
Comprimento da parte cônica	mm	17,9±0,1	21,9±0,1	21,9±0,1	22,5±0,1	25,3±0,4
Desgaste máximo admitido da parte cônica	mm	3	4	4	5	5
Massa máxima das hastes	kg	3	6	6	6	8
Diâmetro máximo das hastes	mm	22	32	32	32	35
Energia nominal / área	kJ/m <sup>2</sup>	50	100	167	194	238

Fonte: adaptado de EN ISO 22476-2:2005.

Para os penetrômetros tipo DPL, DPM e DPH, devem ser registrados o número de golpes do martelo para uma cravação de 100 mm no solo ( $N_{10}$ ), enquanto que para os penetrômetros DPSH-A e DPSH-B pode-se registrar o número de golpes do martelo para uma cravação de 100 mm ( $N_{10}$ ) ou 200 mm no solo ( $N_{20}$ ).

A norma especifica que os resultados dos ensaios podem ser expressos em termos de  $N_{10}$  ou  $N_{20}$ , em função da profundidade, dependendo do tipo de equipamento

usado, ou ainda em termos de resistência dinâmica de ponta, levando em consideração a energia dos golpes.

#### 2.2.4.1 ENERGIA POTENCIAL TEÓRICA E ENERGIA TRANSMITIDA AO SISTEMA.

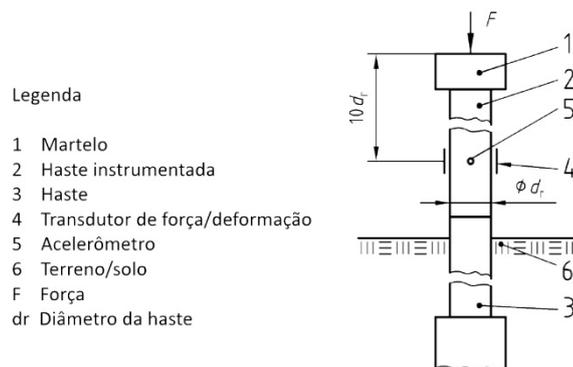
Segundo a EN ISO 22476-2:2005, a energia potencial teórica  $EP_T$  de um golpe de um martelo de massa  $m_M$  sobre a composição de hastes, cabeça de bater, haste guia e ponteira pode ser obtida através da mecânica, conforme a Eq. (2.7):

$$EP_T = m_M \cdot g \cdot h_q \quad \text{Eq. (2.7)}$$

onde  $g$  é o valor adotado para a aceleração da gravidade e  $h_q$  é a altura de queda do martelo. Esta forma de obter a energia não considera qualquer variação de massa do martelo, da altura de queda, ou mesmo de perdas de energia durante a queda, superestimando o valor da resistência dinâmica de ponta.

Alternativamente, a norma prevê a medição da energia transmitida ao conjunto, através do uso de um segmento de haste instrumentada com dois acelerômetros e um conjunto de strain gauge para medir a deformação sofrida pela haste em decorrência do impacto do martelo, conforme mostrado na Figura 2.12.

Figura 2.12 Instrumentação prevista para medição da energia no DCP.



Fonte: adaptado de EN ISO 22476-2:2005.

A partir dos dados obtidos pela instrumentação, a força em função do tempo transmitida às hastes pode ser calculada por:

$$F(t) = A_t \cdot E \cdot \varepsilon(t) \quad \text{Eq. (2.8)}$$

onde  $A_t$  é a área da seção transversal da haste usada,  $E$  é o módulo de elasticidade da haste instrumentada e  $\varepsilon(t)$  é a deformação sofrida pela haste instrumentada em função do tempo.

A velocidade em função do tempo  $v(t)$  é calculada a partir da integração das acelerações em função do tempo  $a(t)$  medidas pelos acelerômetros posicionados na

haste instrumentada. A quantidade de energia  $E_{nthru}$  de um golpe, transmitida ao topo da composição das hastes, é então calculada pela seguinte integração:

$$E_{nthru} = \int_0^{t'} F(t) \cdot v(t) dt \quad \text{Eq. (2.9)}$$

onde  $t'$  é o tempo de duração do impacto do martelo.

A norma considera a energia  $E_{meas}$  como sendo a energia média de pelo menos 5 golpes, dada por:

$$E_{med} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_{nthru_j} \quad \text{Eq. (2.10)}$$

A norma também prevê determinar a eficiência  $\eta$  do equipamento, dada por:

$$\eta = \frac{E_{med}}{EP_T} \leq 1 \quad \text{Eq. (2.11)}$$

#### 2.2.4.2 RESULTADOS EM TERMOS DE RESISTÊNCIA DINÂMICA DE PONTA.

Ainda de acordo com a EN ISO 22476-2:2005, para expressar os resultados do DCP em termos de resistência dinâmica de ponta em função da profundidade, é necessário determinar a energia potencial teórica  $EP_T$  dos golpes, ou a energia efetivamente medida no topo da composição das hastes  $E_{nthru}$ , que equivalem ao trabalho realizado para se cravar a ponteira no solo. Considera-se que este trabalho equivale ao produto da força resistente pela penetração média dos golpes.

A penetração média dos golpes  $\Delta\rho$  é obtida a partir dos valores anotados de  $N_{10}$  ou  $N_{20}$ , como sendo  $\Delta\rho = 0,1m/N_{10}$  ou  $\Delta\rho = 0,2m/N_{20}$ .

Conhecendo a área projetada  $A_p$  da base da ponteira cônica, a resistência dinâmica de ponta  $r_d$  é calculada pela Eq. (2.12)

$$r_d = \frac{EP_T}{\Delta\rho \cdot A_p} \quad \text{Eq. (2.12)}$$

ou ainda pela Eq. (2.13)

$$r_d = \frac{E_{med}}{\Delta\rho \cdot A_p} \quad \text{Eq. (2.13)}$$

A resistência dinâmica de ponta deve ser corrigida através da Eq. (2.14), levando em consideração uma relação entre a inércia dada pela massa do martelo  $m_M$  e a inércia total do sistema, que considera a massa do martelo somada à massa total da composição  $m_{TC}$ , dada pela massa da haste guia, da cabeça de bater, da composição de hastes e da ponteira.

$$q_d = \frac{m_M}{m_M + m_{TC}} \cdot r_d \quad \text{Eq. (2.14)}$$

O resultado obtido da resistência dinâmica depende da forma como se obtém a energia de um golpe, e a norma prevê que a mesma pode ser obtida de forma teórica, ou medida através de instrumentação.

### 2.2.5 NORMA AMERICANA ASTM D4633-10.

A norma americana ASTM D4633-10 descreve os procedimentos necessários para se medir a energia que transmitida ao conjunto de hastes de um penetrômetro devido ao impacto de um martelo. Apesar de ter sido desenvolvida particularmente para ser aplicada em ensaios SPT, os procedimentos descritos nessa norma podem ser aplicados em qualquer tipo de penetrômetro dinâmico, o que inclui todos os tipos de DCP. A seguir são apresentados os principais pontos de interesse desta norma.

Com relação aos equipamentos utilizados para a medida de energia, a norma define basicamente os seguintes itens:

- **Haste instrumentada:** segmento de haste acoplada entre o topo da composição de hastes do penetrômetro e abaixo da cabeça de bater onde ocorrerá o impacto do martelo. Deve ser feita do mesmo aço das hastes, com no máximo 60 cm e a instrumentação responsável pelas medidas de força e aceleração colocadas no máximo a 30 cm abaixo da cabeça de bater.
- **Dispositivos para medir força:** a força transmitida à haste instrumentada deve ser medida através de extensômetros (strain gauges) formando um circuito de ponte de Wheatstone completa, formando uma célula de carga. Os extensômetros devem ser dispostos de forma simétrica na célula de carga, de forma a cancelar efeitos de flexão e temperatura na haste.
- **Dispositivos para medir aceleração:** dois acelerômetros colocados em posições diametralmente opostas na haste instrumentada, e a 10 cm dos transdutores de força. Devem ser lineares e capazes de medir acelerações de pelo menos 10.000 g, onde g é a aceleração da gravidade, e ter frequência de resposta mínima de 4,5 kHz.
- **Dispositivos de registro, processamento e exibição dos dados:** os sinais das células de carga e acelerômetros devem ser enviados a equipamentos de aquisição de dados capazes de os registrar e processar, de forma ser possível determinar a força e a velocidade em função do tempo. Os equipamentos de aquisição de dados podem ser analógicos ou digitais e seguir especificações mínimas, tanto para os sistemas de registro de dados, quanto para os sistemas de processamento e exibição dos dados.

As células de carga devem ser calibradas com medidas simultâneas de força aplicada e deformação axial sofrida, para valores de força de até 70% da carga máxima prevista. Esta calibração permite calcular a área efetiva da seção transversal  $A_c$ , dada pela Eq. (2.15), onde  $F$  é a força aplicada,  $E$  é o módulo de elasticidade do aço da haste instrumentada e  $\varepsilon$  é a deformação medida durante a calibração.

$$A_c = \frac{F}{E \cdot \varepsilon} \quad \text{Eq. (2.15)}$$

Se a diferença entre a área calculada e a área medida for maior que 5%, se recomenda fazer nova calibração ou medir novamente a área. Persistindo a diferença, a área calculada pela Eq. (2.15) deve ser adotada.

Recomenda-se que os acelerômetros também sejam calibrados com uma acurácia de  $\pm 3\%$ , a partir de um choque de ao menos 2000g, usando uma barra de Hopkinson's, em um impacto de "aço com aço".

São apresentadas diversas diretrizes para os procedimentos executivos dos ensaios de medição de energia, inclusive no que diz respeito ao controle da qualidade dos sinais registrados e processados.

O cálculo da energia transferida para as hastes após o impacto do martelo é feito pelo método EFV, que basicamente integra o produto da força medida em função do tempo  $F(t)$ , pela velocidade calculada em função do tempo  $v(t)$  de acordo com a Eq. (2.16), sendo que a integração deve ser feita do instante inicial do impacto até o final dos registros, de forma a determinar o máximo de energia possível.

$$EFV = \max \left[ \int F(t) \cdot v(t) dt \right] \quad \text{Eq. (2.16)}$$

É importante ressaltar que não é registrado o sinal de velocidade em função do tempo, e sim o sinal da aceleração em função do tempo  $a(t)$ , de forma que a velocidade calculada deve ser obtida pela integração do sinal da aceleração em função do tempo.

A energia calculada pode ser comparada a energia potencial teórica  $PE$  calculada para o sistema, de forma a obter a taxa de energia transferida para as hastes  $ETR$ , dada pela Eq. (2.17)

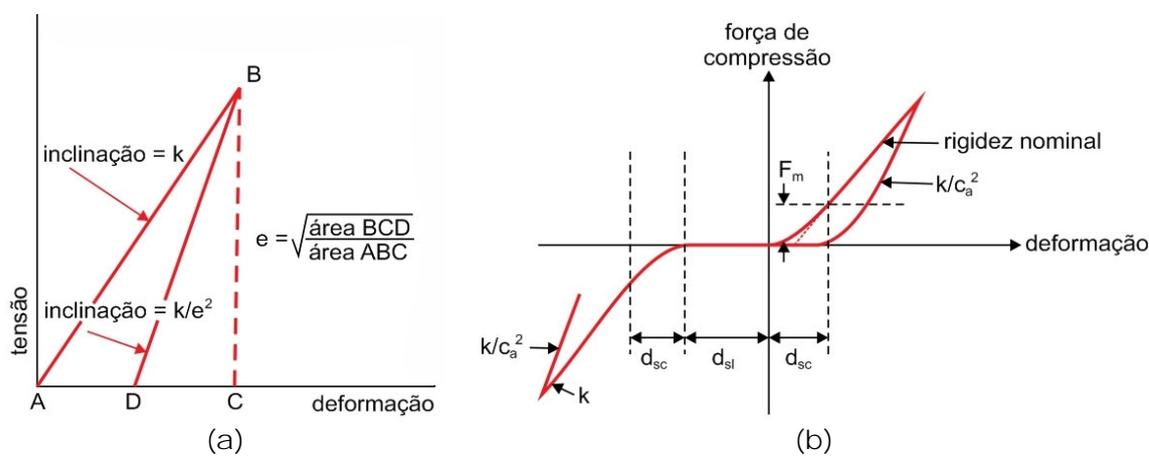
$$ETR = \frac{EFV}{PE} \quad \text{Eq. (2.17)}$$

## 2.2.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE O COXIM.

Segundo Gonçalves *et al.* (2007), a função do coxim é limitar as máximas tensões transmitidas para as hastes e reduzir os efeitos de ruídos e vibrações durante a cravação do penetrômetro. O coxim pode ser comparado a uma mola com uma rigidez  $k$  cujo comportamento de tensão deformação pode ser representado pelo modelo bi-linear de

Smith (1960), Figura 2.13(a), em que a compressão ocorre segundo a linha AB, cuja inclinação é o coeficiente de rigidez  $k$ , e o descarregamento através da linha BD. Uma vez que o coxim não transmite esforço de tração, o processo de descarregamento final segue a reta DA, de forma que o ciclo de histerese se dá pela poligonal ABDA. As perdas de energia são consideradas através do coeficiente de restituição calculado pela raiz quadrada da razão entre a energia que retorna do sistema (área BCD) e a energia fornecida pelo sistema (área ABC), que varia entre 0,50 a 0,75 para coxins de madeira novos e usados, ou entre 0,80 e 0,90 para coxins de borracha dura e nylon.

Figura 2.13 Comportamento de tensão e deformação dos coxins segundo os modelos de (a) Smith (1960) e (b) Lowery et al. (1967).

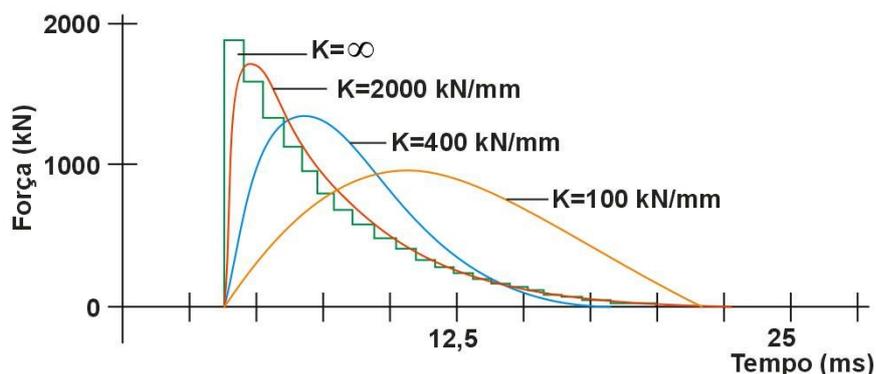


Fonte: adaptado de Gonçalves et al. (2007).

Lowery et al. (1967) propuseram um modelo com carregamento parabólico e descarregamento linear, que prevê de forma satisfatória tanto o valor de tensão máxima transmitida, quanto o formato da onda de compressão das hastes. Gonçalves et al. (2007) atentam que a correta representação da rigidez do coxim dependerá de seu módulo de elasticidade, sua espessura, a área de sua seção transversal e do coeficiente de restituição do material utilizado, e notam que estes parâmetros variam com a vida útil do coxim,

Ainda segundo Gonçalves et al. (2007), o aumento das rigidez do coxim, devido à sucessão de impactos, aumenta a força máxima de compressão transmitida para as hastes, podendo provocar danos caso o coxim não seja substituído ou a altura de queda do martelo não seja reduzida. Na Figura 2.14 pode-se observar o comportamento da onda de compressão transmitida para uma haste rígida, no caso de estacas de concreto pré-fabricadas, que ocorre com o aumento da rigidez do coxim.

Figura 2.14 Onda de compressão para diferentes coeficientes de rigidez do coxim.



Fonte: adaptado de Gonçalves et al. (2007).

No caso de coxins de madeira, é recomendado o uso de madeira mole, que se deforme durante o processo de cravação, absorvendo as tensões que estariam sendo diretamente transferidas à cabeça de bater a às hastes. A madeira mais utilizada para esta finalidade é originada do Pinus (GONÇALVES et al., 2007). Porém tais coxins em geral são inutilizados após seu uso em uma cravação, ou mesmo chegam a ser danificados durante o processo de cravação, o que implica em elevação dos custos de operação do equipamento.

### 2.3 O DPL MODIFICADO POR NILSSON EM 2001.

Apesar de ser um ensaio bastante usado na Europa, inclusive com padronizações de equipamentos e procedimentos através de normas específicas, os ensaios dinâmicos de cone (em especial o DPL) continuam praticamente desconhecidos no Brasil, tanto nas principais regiões do país, quanto no interior (FIGUEIREDO et al., 2012). No Brasil, o ensaio de campo mais utilizado ainda é a Sondagem de Simples Reconhecimento, ou SPT, seguido do Ensaio de Cone, ou CPT.

Em 2001, foram realizados os primeiros ensaios com o penetrômetro portátil DPL modificado por Nilsson no estado do Paraná (NILSSON, 2004b). De acordo com o fabricante, este equipamento atende as normas ISSMFE (1989) e DIN 4094:1990, porém incorpora algumas modificações, como a introdução medidas de torque máximo e residual a cada metro de profundidade. Essas medidas são feitas com auxílio de um torquímetro analógico manual, característica posteriormente incorporada na norma ISO 22476-2:2005.

Trata-se de um equipamento leve e simples, que apresenta grande mobilidade, permitindo realizar ensaios em regiões de difícil acesso, como relevo acidentado, florestas e até áreas inundadas. Esse equipamento é pouco difundido no Brasil e a interpretação dos seus resultados ainda encontra-se em fase de estudos (BASTOS et al., 2014).

Uma das vantagens deste equipamento, é que o tamanho máximo de suas peças não ultrapassa 1m, de forma que todo o equipamento pode ser colocado em duas

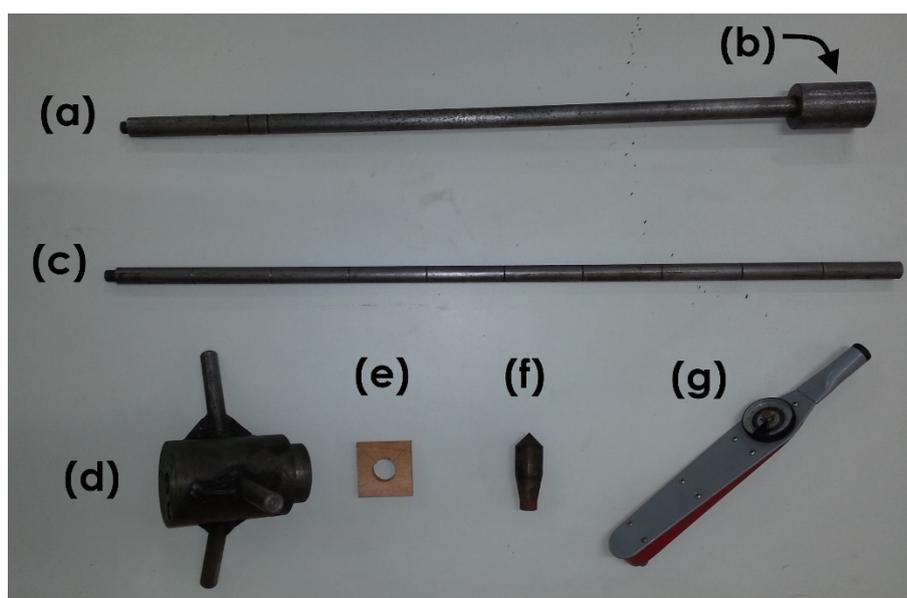
caixas de transporte pequenas que podem ser acomodadas no porta-malas de um carro convencional. Além disso, o seu peso de 116 kg não necessita de grandes esforços para sua mobilização. Apresenta como principal limitação o fato de atingir profundidade máxima de 12m.

Segundo Nilsson (2004b), o Penetrômetro Dinâmico Leve pode ser usado em ambientes públicos urbanos, onde é necessário efetuar sondagens em calçadas e com o menor impacto possível; em ambientes de mata fechada, com acesso difícil ou impossível para outros equipamentos; em áreas de várzeas e mangues, para determinação do perfil geotécnico em áreas alagadas; no reconhecimento geotécnico para implantação de indústrias, loteamentos, estradas, controle de terraplenagem; no dimensionamento de fundações rasas e profundas; em aplicações geoambientais diversas, desde projetos de contenções de taludes, até identificação de áreas contaminadas com resíduos de caráter lubrificante que anulam o atrito lateral.

### 2.3.1 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO.

A relação completa dos componentes do DPL modificado por Nilsson em 2001 encontra-se no ANEXO I (NILSSON E CUNHA, 2004; NILSSON, 2004a; b; 2008), enquanto que no ANEXO II encontra-se a relação das dimensões e massas medidas em laboratório desses mesmos componentes. Conforme o fabricante, as características geométricas e o peso do equipamento são basicamente os especificados na norma alemã DIN 4094:1990. Os principais componentes do equipamento são mostrados na Figura 2.15, abaixo.

Figura 2.15 Principais componentes do DPL modificado com medida de torque.



Fonte: arquivos pessoais do autor.

- **Haste-guia**, Figura 2.15(a), confeccionada em aço, tendo 850 mm de comprimento e 25 mm de diâmetro, responsável por sustentar e direcionar o

martelo em sua queda. Existem duas marcações em baixo relevo na metade superior da haste, de forma a indicar uma altura de queda de 50 cm do martelo, com ou sem o uso de coxins.

- **Cabeça de bater**, Figura 2.15(b), confeccionada em aço, com 90 mm de altura e diâmetro de 57 mm, cuja função é transmitir a energia do impacto do martelo à composição de hastes e ponteira.
- **Hastes**, Figura 2.15(c), confeccionadas em aço, com 22 mm de diâmetro por 1 m de comprimento. Na lateral destas hastes existem marcações em baixo relevo de 10 em 10 cm, utilizadas como referência ao registro da profundidade alcançada e para a contagem do número de golpes  $N_{10}$ .
- **Martelo**, Figura 2.15(d), confeccionado em aço, com massa de 10 kg, tendo comprimento de 165 mm e diâmetro de 100 mm. Existe um furo de 25,7 mm ao longo do eixo do martelo, que permite a passagem da haste-guia. Para facilitar seu manuseio, existem 3 hastes dispostas radialmente ao mesmo, por onde o martelo é levantado manualmente.
- **Coxins**, Figura 2.15(e), confeccionados em madeira de Pinus, quadrados com 75 mm de lado, e 25 mm de altura. Possui um furo central com 27 mm de diâmetro, que permite sua passagem pela haste guia de forma que fique posicionado sobre a cabeça de bater.
- **Ponteira cônica**, Figura 2.15(f), confeccionada em aço, possuindo uma parte cilíndrica e uma parte cônica. O diâmetro da parte cilíndrica e base do cone é de 35,7 mm, de forma que a área projetada da base é de 10 cm<sup>2</sup>. A altura da parte cilíndrica também é de 35,7 mm e o comprimento total da ponteira é de 100 mm. O ângulo de ápice da parte cônica é de 90°, diferindo do ângulo de ápice das ponteiros utilizados nos diversos tipos de equipamentos de CPT, que são de 60°.
- **Torquímetro**, Figura 2.15(g), analógico de relógio, com escala de 0 a 70 N.m, utilizado para medir o torque do giro na ponteira provocado através das hastes, de forma a medir diretamente a resistência entre o solo e a ponteira. Possui uma agulha morta (sem molas) que é usada para marcação do torque máximo.

É importante notar que a haste guia, a cabeça de bater, o martelo, as hastes e a ponteira são todos confeccionados com o mesmo tipo de aço de alta resistência.

### 2.3.2 EXECUÇÃO DO ENSAIO E REGISTRO DOS DADOS.

Segundo Nilsson (2004b), o ensaio é iniciado por um pré-furo com 40 cm feito com um trado com 15 cm de diâmetro. A ponteira é parafusada em uma haste, que é inserida em uma plataforma niveladora, e o conjunto formado é inserido no pré-furo, e

devidamente apurado e nivelado. O conjunto formado pela haste-guia e a cabeça de bater é rosqueado sobre a primeira haste. Após a sua fixação, a haste-guia deve ser engraxada para reduzir eventuais atritos com o martelo na queda livre deste. Após um coxim de madeira ser posicionado sobre a cabeça de bater, e o martelo é inserido pela guia e pousado sobre o coxim.

É iniciada uma sequência de golpes, elevando o martelo 50 cm acima do coxim e deixando-o cair livremente, tantas vezes quantas forem necessárias para que a ponteira seja cravada 10 cm no solo. A cravação é verificada através de marcações presentes na haste em relação à plataforma niveladora. O número de golpes necessários para cravar a ponteira 10 cm ( $N_{10}$ ) é registrado em uma planilha de campo.

Este procedimento é repetido sucessivas vezes até que a parte inferior da cabeça de bater esteja a 10 cm da plataforma niveladora. Após registrar o índice  $N_{10}$  correspondente, o martelo é removido e o conjunto formado pela haste-guia, cabeça de bater e coxim é desrosqueado e removido do sistema. Isso permite o acoplamento do torquímetro no topo da haste, possibilitando o ensaio de torque, no qual são registrados os torques máximo e residual entre a ponteira e o solo.

O torquímetro é retirado do sistema, e uma nova haste é acrescentada, sobre a qual é rosqueado o conjunto formado pela haste-guia, cabeça de bater, coxim e martelo, de forma que o ciclo de cravação da ponteira no solo se reinicie.

É recomendado que o ensaio seja executado com um máximo de 12 hastes, ou seja, até 12 m de profundidade (NILSSON, 2004b). Ainda segundo o autor, durante o processo de retirada das hastes e ponteira do solo, é possível identificar o nível d'água no subsolo.

### 2.3.3 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS.

Nilsson (2008) aponta que resultado bruto inicial obtido pelos ensaios DPL são os valores de  $N_{10}$  em função da profundidade, que fornece uma ideia inicial do comportamento do solo ao longo da profundidade, de forma similar ao que acontece com o registro do  $N_{SPT}$  para o ensaio de SPT.

Ainda segundo Nilsson (2008), a tensão cisalhante ou atrito lateral  $f_s$  que atua na ponteira do DPL pode ser calculada pela Eq. (2.18), onde  $M$  é o torque máximo medido,  $A_L$  é a área lateral da ponteira em contato com o solo e  $\ell^*$  é um braço de alavanca arbitrado em 16 mm a partir de aproximações que consideram o raio médio da parte cônica e o raio da parte cilíndrica da ponteira.

$$f_s = \frac{M}{A_L \cdot \ell^*} \quad \text{Eq. (2.18)}$$

No caso de uma ponteira cônica, com ângulo de ápice de  $90^\circ$ , a partir de aproximações que levam em conta as áreas da parte cônica  $A_{cone}$  e da parte cilíndrica  $A_{cil}$ , Nilsson (2008) aproxima o produto  $A_L \cdot \ell^*$  para  $100 \text{ cm}^2 \times \text{cm}$  e converte para  $\text{m}^2 \times \text{m}$ , de forma que:

$$f_s = 10 \cdot M \quad \text{Eq. (2.19)}$$

com o torque em N.m e  $f_s$  em kPa.

É importante ressaltar que o valor do atrito lateral obtido pelas Eq. (2.18) e Eq. (2.19) são apenas aproximações devido ao fato do autor adotar um braço de alavanca arbitrado, e não uma formulação que leve em conta a geometria completa da ponteira em contato com o solo.

Nilsson (2008) obtém a tensão de resistência de ponta  $q_c$  de acordo com a Eq. (2.20) abaixo:

$$q_c = \frac{P_f}{A_c} - f_s \quad \text{Eq. (2.20)}$$

onde  $P_f$  é a força resistente de ponta,  $A_c$  é a área projetada de base da ponteira (área transversal da parte cilíndrica) e  $f_s$  é a tensão de atrito lateral obtida pela Eq. (2.18).

A força resistente de ponta é calculada pela fórmula dinâmica de Hiley modificada por Nilsson (2008) e dada pela Eq. (2.21), onde é acrescentando um fator de correção hidráulica  $\eta_a$ .

$$P_f = \eta_a \cdot \frac{\eta \cdot m_M \cdot g \cdot h_q}{s_{pl} + s_{el}/2} + \frac{m_M + e^2 \cdot m_{sist}}{m_M + m_{sist}} \quad \text{Eq. (2.21)}$$

onde  $\eta$  é um fator que representa a perda de energia do martelo em sua queda,  $m_M$  é a massa do martelo,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $h_q$  é a altura de queda do martelo,  $s_{pl}$  é o deslocamento plástico do penetrômetro no solo,  $s_{el}$  é o deslocamento elástico do penetrômetro no solo,  $e$  é o coeficiente de restituição do choque do martelo com a cabeça de bater e  $m_{sist}$  é a massa do sistema formado pela haste-guia, cabeça de bater, hastes acopladas e ponteira.

No entanto, os deslocamentos plástico e elástico sofridos pelo penetrômetro não são registrados a cada golpe do martelo e sim o número de golpes necessários para uma penetração do sistema em 10 cm no solo ( $N_{10}$ ). Desta forma, podemos substituir o valor de  $s_{pl} + s_{el}/2$  pela penetração média da ponteira por golpe do martelo ( $\Delta\rho$ ) ao longo de 10 cm de penetração no solo, dada por:

$$\Delta\rho = \frac{0,1}{N_{10}} \quad \text{Eq. (2.22)}$$

Desta forma, a Eq. (2.21) pode ser reescrita como:

$$P_r = \eta_a \cdot \frac{\eta \cdot m_M \cdot g \cdot h_q}{\Delta\rho} + \frac{m_M + e^2 \cdot m_{\text{sist}}}{m_M + m_{\text{sist}}} \quad \text{Eq. (2.23)}$$

É importante notar que a fórmula dinâmica de Hiley tem a vantagem de admitir que há perda de energia associada à queda do martelo, ou seja, parte da energia potencial associada à queda do martelo dada por  $EP = m_M \cdot g \cdot h_q$  é "perdida" no intervalo de tempo entre a soltura do martelo e o impacto deste com a cabeça de bater, daí a importância do fator  $\eta$  nesta fórmula. No entanto, Nilsson (2008) não especifica os valores adotados para  $\eta$  ou mesmo para o fator  $\eta_a$ , por ele introduzido na fórmula.

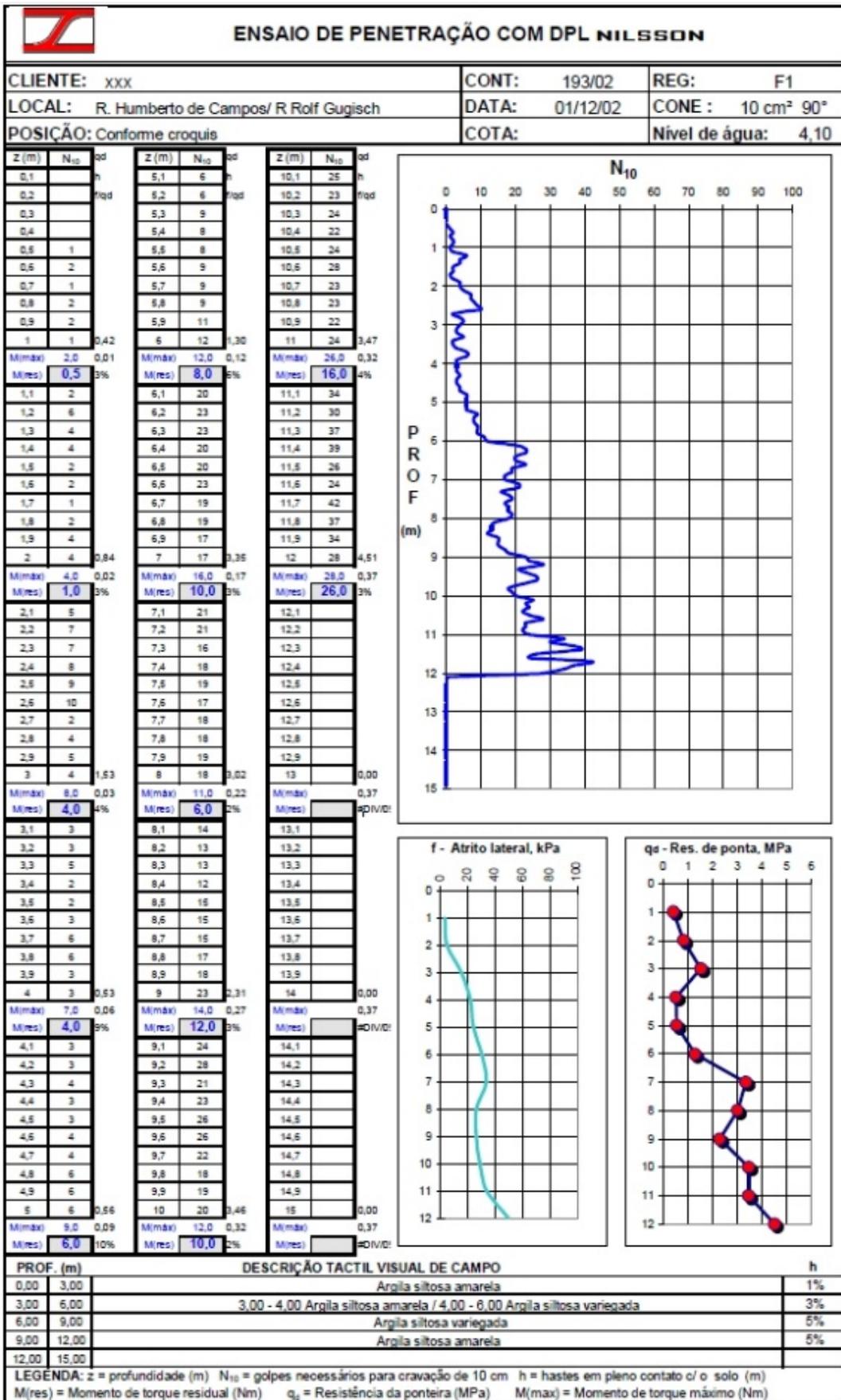
Maiores informações sobre a fórmula dinâmica de Hiley podem ser encontradas em Alves *et al.* (2004), Gonçalves *et al.* (2007), Araújo (1988) e Chellis (1961).

Os dados coletados em campo são inseridos em uma planilha fechada (sem acesso ao código fonte da programação da mesma) criada no software MS-Excel, Figura 2.16. A planilha apresenta de forma tabelada os valores de  $N_{10}$ , os valores dos torques máximos e residuais. Também são apresentados 3 gráficos: o primeiro relacionando  $N_{10}$  com a profundidade, o segundo relacionando o atrito lateral  $f_s$  com a profundidade, e o último relacionando a tensão de resistência de ponta também com a profundidade. Por último, há uma classificação da estratigrafia (NILSSON, 2004b).

A forma como é feita a classificação dos diversos estratos do subsolo através da planilha apresentada na Figura 2.16, também não é especificada em Nilsson (2004b), Nilsson (2008) ou ainda em (NILSSON E CUNHA, 2004).

De acordo com Nilsson (2008), os valores de  $N_{10}$ , torques máximos, atrito lateral  $f_s$  e resistência de ponta  $q_c$  podem ser utilizados para se determinar, de forma aproximada, outros parâmetros geotécnicos tais como a coesão e o ângulo de atrito das camadas de solo, compactidade dos solos granulares, consistência de solos argilosos.

Figura 2.16 Planilha com resultados do DPL modificado por Nilsson em 2001.



Fonte: (NILSSON, 2004b)

### 2.3.4 PESQUISAS SOBRE O DPL NO BRASIL.

Nos últimos anos, algumas pesquisas vêm sendo desenvolvidas no Brasil sobre os ensaios DPL, principalmente voltadas para a comparação de resultados com os ensaios SPT e CPT.

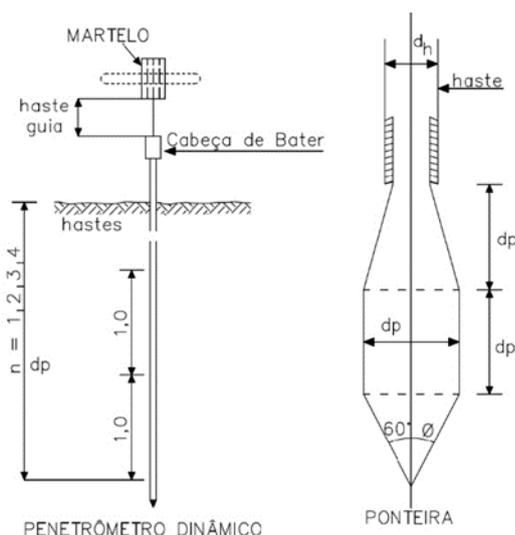
Nilsson (2004a) apresenta um estudo comparativo entre o SPT e o DPL, focado na relação entre  $N_{10}$  e  $N_{SPT}$ , com resultados obtidos em diversos ensaios realizados em Curitiba/PR, São José dos Pinhais/PR, Londrina/PR, Campinas/SP, Sorocaba/SP e Brasília/DF, onde os dois ensaios foram realizados simultaneamente. Dentre as conclusões do estudo, ressalta-se que o DPL conseguiu penetrar em solos cujo índice de resistência equivalente a  $N_{SPT} = 17$ , havendo relatos de casos com penetração em solo com  $N_{SPT} = 30$ . Conforme o autor, em argilas porosas, o empuxo horizontal passivo desenvolve-se menos, pois devido ao fato da ponteira do DPL ser pequena, o aumento do empuxo passivo é limitado pela pouca quantidade de solo deslocado, que não chega a compactar muito e não altera efetivamente os valores do intercepto de coesão e do ângulo de atrito. Já em solos moles ( $N_{SPT} \leq 4$ ) apresenta boa resolução e avanço rápido. Finalmente, o autor considera que apesar de serem possíveis correlações entre o DPL e o SPT, inclusive através da transformação do  $N_{10}$  em  $N_{SPT}$ , pode-se utilizar os conceitos de resistência de ponta  $q_c$  e de atrito lateral  $f_s$  para por exemplo se dimensionar fundações em estacas. Um dos motivos para isso, é que segundo o autor, o DPL tem maior compatibilidade com o CPT que com o SPT.

Canto *et al.* (2008) avaliaram resultados obtidos em ensaios DPL realizados nas cidades de Curitiba, Cascavel e Guaíra (estado do Paraná) e os comparou com ensaios CPT e CPTu executados paralelamente, procurando quantificar a variabilidade das medidas e as incertezas a elas relacionadas. Os autores apontam algumas fontes de incertezas inerentes ao DPL, em especial as ligadas à execução do ensaio, utilizando as normas alemãs e as propostas de procedimentos criadas pelo fabricante do equipamento. Outra fonte de incerteza apontada é a forma de medida da resistência à penetração da ponteira, que no DPL é indireta e se dá a cada 10 cm ( $N_{10}$ ) enquanto que no CPT e no CPTu a medida é feita diretamente por sensores a cada 2 cm de penetração do cone no solo. Os autores concluíram que em diversos tipos de solos, em especial onde não se observa a formação Guaritotuba, o DPL apresenta desempenho semelhante ao CPT e ao CPTu, em proporção ao  $q_c$  médio comparado ao  $N_{10}$ , considerando as profundidades alcançadas. Os autores também enfatizam com relação ao DPL ser "*notório seu desempenho quando comparado ao ensaio CPT, haja vista sua limitação de profundidade, fator decisivo na escolha do ensaio*".

Alves Filho (2010) realizou um trabalho de pesquisa utilizando um modelo de DPL cujas características atendem à norma DIN 4094:1964, tipo LRS 10, discutido em Sanglerat (1972). Tal equipamento encontra-se em uso no Departamento de Estradas de Rodagem do estado de Minas Gerais, e é similar ao DPL modificado por Nilsson em 2001 exceto pela geometria de ponteira, que neste caso possui um **ângulo de ápice de 60° ao invés do ângulo de 90°** (Figura 2.17) recomendado nas normas mais recentes.

As demais características do equipamento são praticamente iguais às dos atuais equipamentos. O autor realizou campanha com sondagens DPL, sondagens SPT, ensaios triaxiais, ensaios edométricos e ensaios CBR, buscando estabelecer correlações para a estimativa de parâmetros geotécnicos. Dentre as conclusões, ressalta-se que as medidas de ensaios SPT, feitas de metro em metro, mostraram-se menos eficientes que as do DPL para avaliar o pré-adensamento superficial, pois com o DPL há uma maior sensibilidade e maior caracterização do solo ensaiado.

Figura 2.17 DPL com ponteira com ângulo de ápice de 60° (ALVES FILHO, 2010).



Fonte: Alves Filho (2010)

## 2.4 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DOS ENSAIOS DINÂMICOS DE CONE.

Hashmat (2000) e Nilsson (2004a) apontam algumas das vantagens de se usar os ensaios dinâmicos de cone, em especial o DPL, frente a outros ensaios de campo:

- Pode penetrar camadas de solo mais resistentes, que o CPT teria dificuldades ou não poderia penetrar;
- A simplicidade do equipamento e de sua operação tornam o ensaio dinâmico de cone o mais econômico dos métodos de investigação geotécnica, e o de mais fácil operação, inclusive se comparado ao SPT;
- Permite um registro contínuo do subsolo, com medidas de resistência de 10 em 10 cm de penetração no caso do DPL, em contraste com o STP que

fornece 2 medidas de resistência a cada 15 cm nos últimos 30 cm de cada metro de penetração, porém é menos detalhado que o CPT, que fornece medidas de resistência a cada 2 cm de penetração;

- d) Pode ser utilizado para detectar camadas de solo moles e localizar camadas muito resistentes;
- e) Grande mobilidade, o que permite acesso em áreas e terrenos impossíveis de serem atingidos por outros métodos de investigação geotécnica, incluindo o SPT e o CPT;
- f) Exige pouco espaço operacional, o que potencializa seu uso em taludes, bermas, escavações, poços, beiras de rios, ruas, calçadas, áreas alagadiças, etc., sem custos adicionais de mobilização.

Por outro lado, também são apontadas as seguintes limitações:

- a) Usado principalmente em solos pouco coesivos;
- b) Em argilas moles e em argilas orgânicas, o atrito lateral pode ter um efeito substancial na resistência à penetração, crescendo muito com a profundidade e, abaixo do nível freático, gera um excesso de poropressão muito elevado.
- c) A resistência à penetração, perto das fronteiras de uma determinada camada de solo, será influenciada pelos tipos de solo acima e abaixo da camada penetrada. A compressibilidade e a inclinação da camada abaixo do local de penetração serão fatores que influenciam os resultados.

## 2.5 PESQUISAS SOBRE ENERGIA NO DCP.

Alguns estudos sobre a aplicação da teoria de onda nos penetrômetros dinâmicos vem sendo feitas recentemente, tendo por base o trabalho de Odebrecht *et al.* (2005) sobre a eficiência de energia no SPT.

Segundo Ibáñez *et al.* (2012), a penetração das ponteiros cônicas dos ensaios dinâmicos no solo, assim como a penetração do amostrador do SPT, está intimamente relacionada à energia potencial nominal do martelo, o que torna necessário compreender como esta energia é transferida para as hastes e das hastes para a ponteira cônica, de forma a se compreender o comportamento real destes ensaios. A partir de ensaios realizados com um DPSH, com medida de torque em concordância com a norma ISO 22476-2:2005, e utilizando um segmento de haste instrumentado com dois acelerômetros e uma célula de carga formada por strain gauges, os autores verificaram que a penetração do cone do solo depende da energia que é efetivamente transferida para as hastes pelo impacto do martelo ( $E_{nthru}$ ), e da energia que atinge efetivamente o cone, por eles denominada de  $E_{nthru_{CONE}}$ . O cálculo de  $E_{nthru_{CONE}}$  a partir de  $E_{nthru}$  deve considerar a perda de energia na sua transmissão pelas hastes, a perda de energia devido ao atrito superficial

das hastes com o solo a seu redor, devendo ainda ser adicionada a energia devido ao peso da composição das hastes utilizadas.

Žaržojus *et al.* (2013), relatam que é comum o uso do CPTu e dos ensaios dinâmicos na Lituânia, principalmente em decorrência de camadas de solos pouco resistentes recobertas por camadas de solos muito rígidos, geralmente formada por depósitos de areias do pleistoceno. A grande desvantagem dos ensaios dinâmicos está relacionada ao desconhecimento da transferência da energia do impacto do martelo até a ponteira cônica. Apoiando-se nas investigações sobre transferência de energia no SPT, e em pesquisas de testes dinâmicos em fundações por estacas, os autores realizaram ensaios com um DPSH-B instrumentado, adaptando sensores em um penetrômetro TG63-150 da marca italiana Pagani, visando compreender estes mecanismos de transferência de energia. Os experimentos mostraram que a transferência de energia em areias densas em profundidades rasas é praticamente igual à energia teórica do sistema. Em solos argilosos constataram que o efeito de amortecimento atua de modo a reduzir a energia transferida ao cone em apenas 16% da energia do impacto. Em solos arenosos mais profundos, constataram perdas de energia associadas ao atrito entre solo e hastes e às conexões entre as hastes, o que resulta em uma eficiência de 32%. Estas perdas de energia causam distorções na contagem de golpes do penetrômetro.

### 3 TEORIA DA PROPAGAÇÃO DA ONDA LONGITUDINAL DE TENSÃO.

Os ensaios dinâmicos de investigação geotécnica, assim como a cravação de estacas para fundações, valem-se do impacto de uma massa rígida sobre um conjunto de hastes de forma a promover a penetração de um amostrador, de um cone, ou de estacas no solo. O entendimento atual deste processo de cravação é feito através da aplicação dos conceitos de propagação de ondas longitudinais de compressão em barras, processo que teve início nos anos 1930 (LOBO, 2009), e que tornou-se rotina a partir dos procedimentos de cálculo de cravação de elementos de fundações desenvolvidos por Smith (1960).

Considerando que o DPL é um equipamento que investigação geotécnica composto por diversas barras de comprimento finito, a aplicação da teoria de ondas longitudinais de compressão na interpretação de seus resultados devem ser precedida das hipóteses simplificadoras propostas por Belincanta (1985) para o ensaio SPT:

- a) A seção transversal plana de qualquer haste permanece plana durante a passagem da onda longitudinal de tensão;
- b) A tensão se distribui uniformemente sobre toda a seção transversal;
- c) O comprimento da onda longitudinal de tensão é grande em comparação com o diâmetro das hastes;
- d) Os movimentos transversais das partículas são desprezíveis;
- e) As perdas de energia na propagação da onda longitudinal de tensão nas hastes são desprezíveis;
- f) A onda longitudinal de tensão se propaga nas hastes com uma velocidade constante  $c$  que depende, exclusivamente, das características do material constituinte das hastes;
- g) As hastes são constituídas por material elástico linear.

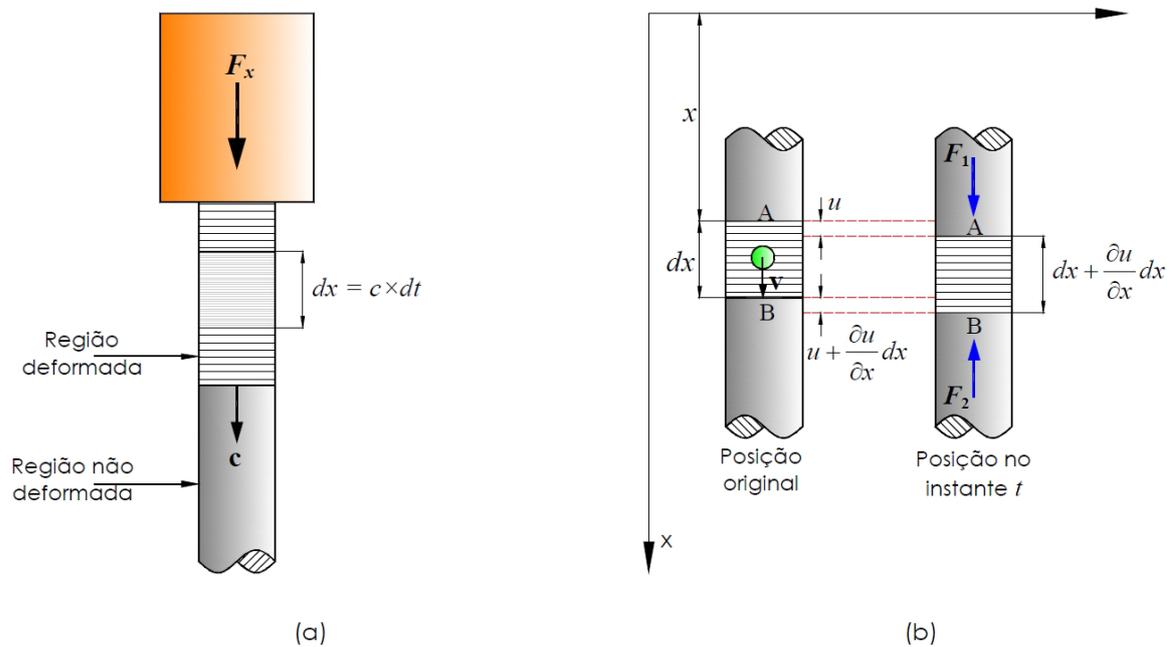
O desenvolvimento detalhado da teoria de propagação da onda longitudinal de tensão pode ser encontrado nos trabalhos de Timoshenko e Goodier (1951), Schmertmann e Palacios (1979) Belincanta (1985), Bernardes (1989), Odebrecht (2003), Lobo (2009), Lukiantchuki (2012) e Morais (2014). Recentemente tem aparecido trabalhos que aplicam esta teoria na interpretação de ensaios dinâmicos de cone, como Ibáñez *et al.* (2012).

O martelo com massa  $m_M$ , após ser solto de uma altura  $h$ , atinge a cabeça de bater do DPL, e aplica uma força dinâmica à haste superior da composição, cujo módulo de elasticidade é  $E$  e a área da seção transversal é  $A_s$ . A aplicação desta força dinâmica

em uma barra elástica acarreta na formação de ondas de tensão e deformação que se irradiam e se propagam com velocidades finitas em seu interior (ODEBRECHT, 2003).

No instante do impacto, somente um elemento infinitesimal da barra, com espessura  $dx$ , é comprimido de forma que uma tensão de compressão é produzida e transmitida ao elemento seguinte, que também se deforma, Figura 3.1(a).

Figura 3.1 Propagação de onda longitudinal de tensão.



Fonte: adaptado de Bernardes (1989) por Lukiantchuki (2012).

Assim, essa transmissão longitudinal de tensão para elementos sucessivos gera uma onda de compressão com uma velocidade de propagação  $c$  constante. Como a onda se propaga por uma distância longitudinal  $dx$  em um tempo  $dt$ , obtém-se:

$$dx = c \cdot dt \tag{Eq. (3.1)}$$

As partículas no interior de um elemento infinitesimal da haste submetida a uma compressão por uma tensão longitudinal  $\sigma_x$  possuem uma velocidade  $v$  dada por:

$$v = \frac{\sigma_x}{E} \cdot c \tag{Eq. (3.2)}$$

Pela Eq. (3.2) nota-se que as velocidades  $v$  das partículas no interior do elemento comprimido não é a velocidade da onda de compressão  $c$ , e que ambas terão sentidos iguais quando o elemento infinitesimal é percorrido por uma onda compressiva, caso contrário, quando o elemento é percorrido por uma onda de tração, terão sentidos opostos.

Considerando a força de compressão  $F_x$  aplicada, a massa  $m$  e a velocidade  $v$  das partículas, além da massa específica  $\rho$  do material da haste, é possível verificar a estreita relação entre a velocidade das partículas e a força aplicada através de:

$$v = \frac{1}{Z} \cdot F_x \quad \text{Eq. (3.3)}$$

onde:

$$Z = \frac{E}{c} \cdot A_t = c \cdot \rho \cdot A_t = \frac{m}{L} \cdot c \quad \text{Eq. (3.4)}$$

A Eq. (3.4) define a impedância  $Z$  das hastes, que depende não só das propriedades do meio de propagação da onda longitudinal, mas também da área da seção transversal destas hastes, ou do comprimento  $L$  das hastes.

Durante a propagação da onda de tensão, com velocidade  $c$ , todas as partículas do interior do elemento se deslocam em função de seu posicionamento original, de forma que as partículas da extremidade **A** tem um deslocamento  $u$  enquanto que as partículas da extremidade **B** tem um deslocamento  $u + (\partial u / \partial x) dx$ , e o elemento passa a ter um comprimento dado por  $dx + (\partial u / \partial x) dx$ , Figura 3.1(b). Devido à passagem da onda de tensão, as extremidades **A** e **B** estão sujeitas respectivamente às forças  $F_1$  e  $F_2$ , e a diferença entre estas provoca uma aceleração  $a$  no elemento de massa  $m$  representado. Assim, considerando a deformação do elemento, e a Lei de Hooke, é possível demonstrar que:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad \text{Eq. (3.5)}$$

A Eq. (3.5) é a equação geral que descreve a propagação de ondas longitudinais de tensão no interior de uma haste ao longo do tempo  $t$ , com atrito lateral desprezado, e cuja solução foi proposta pela primeira vez em 1747 por D'Alembert (BERNARDES, 1989), apresentada abaixo:

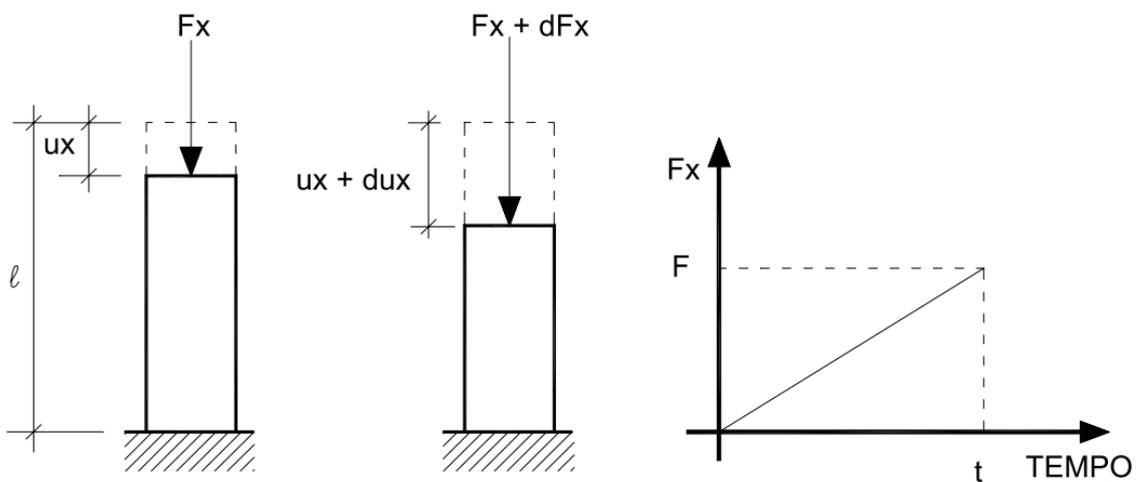
$$u(x, t) = \phi(x - c \cdot t) + \psi(x + c \cdot t) \quad \text{Eq. (3.6)}$$

A solução apresentada para o deslocamento de uma partícula em função de sua posição  $x$  no tempo  $t$  é dada pela soma das funções  $\phi$  e  $\psi$ , que por sua vez correspondem a ondas de tensão que se propagam com mesma velocidade  $c$ , mas em sentidos contrários.

### 3.1 A ENERGIA ASSOCIADA À ONDA LONGITUDINAL DE TENSÃO.

Quando uma onda longitudinal de tensão se propaga com uma velocidade  $c$  ao longo de uma haste de comprimento  $L$ , área transversal  $A_t$  e módulo de elasticidade  $E$ , uma quantidade finita de energia é conduzida. Esta energia é proveniente das deformações causadas em um elemento infinitesimal da haste sujeito aos esforços provocados por uma força  $F_x$  crescente (Figura 3.2), e também das alterações de velocidade  $v$  das partículas desta mesma seção.

Figura 3.2 Obtenção da energia de deformação de uma haste, devido a um esforço externo crescente  $F_x$ .



Fonte: Odebrecht (2003)

Belincanta (1985) adota as seguintes hipóteses para calcular a energia de uma onda longitudinal de tensão, em função do esforço crescente de compressão:

- O trabalho de deformação  $W$ , proveniente dos esforços internos na haste é igual ao trabalho de deformação realizado pelas forças externas;
- Quando a força aplicada longitudinalmente  $F_x$  sofre um acréscimo  $dF_x$ , o trabalho de deformação sofre um acréscimo  $dW$ ;
- A deformação elástica  $u$  devido à aplicação de  $F_x$  pode ser obtida pela Lei de Hooke, conforme:

$$u = F_x \cdot \frac{L}{E \cdot A_t} \quad \text{Eq. (3.7)}$$

O acréscimo de trabalho  $dW$  pode ser equacionado como:

$$dW = F_x du + dF_x du \quad \text{Eq. (3.8)}$$

No entanto,  $dF_x du$  pode ser desprezado, por ser um infinitesimal de ordem superior. Assim, derivando Eq. (3.7) e substituindo em Eq. (3.8), tem-se:

$$dW = F_x \cdot dF_x \cdot \frac{L}{E \cdot A_t} \quad \text{Eq. (3.9)}$$

Integrando  $F_x$  no intervalo de 0 a  $F$ , e efetuando as devidas substituições, obtém-se:

$$W = \frac{A_t \cdot L \cdot \sigma^2}{2 \cdot E} \quad \text{Eq. (3.10)}$$

Entretanto, a energia total  $E_{tot}$  de uma onda longitudinal de tensão é dada pela soma da parcela de energia de deformação  $E_d$  do elemento com a parcela de energia cinética  $E_c$  de suas partículas, sendo possível demonstrar que:

$$E_d = E_c = \frac{A_t \cdot \sigma^2}{2 \cdot E} \cdot c \cdot dt \quad \text{Eq. (3.11)}$$

Assim, conclui-se que metade da energia contida em uma onda longitudinal de tensão é energia de deformação, e a outra metade é energia cinética. Logo, a energia total  $E$  da onda longitudinal de tensão pode ser obtida pela integração da soma destas parcelas de energia, o que resulta em:

$$E_{tot} = \frac{C}{E \cdot A_t} \int_0^t F^2(t) dt \quad \text{Eq. (3.12)}$$

Considerando

$$F = Z \cdot v \quad \text{Eq. (3.13)}$$

onde  $Z$  é a impedância da haste, pode-se reescrever a Eq. (3.12) em função da velocidade das partículas, conforme:

$$E_{tot} = \frac{E \cdot A_t}{C} \int_0^t v^2(t) dt \quad \text{Eq. (3.14)}$$

Ou ainda, substituindo somente uma das forças da Eq. (3.12) por  $Z \cdot v$ , pode-se reescrever a equação da energia total da onda longitudinal de tensão como:

$$E_{tot} = \int_0^t F(t) \cdot v(t) dt \quad \text{Eq. (3.15)}$$

As Eq. (3.12), Eq. (3.14) e Eq. (3.15) são utilizadas pelos métodos de determinação de energia de ondas longitudinais de tensão conhecidos respectivamente como EF2, EV2 e EFV, obtidas no intervalo de tempo correspondente da passagem da onda.

Skov (1982) apud Belincanta (1985) observa que a equação que descreve a propagação de uma onda longitudinal de tensão está sujeita a diversas condições de contorno e que para facilitar o estudo destas devem ser adotadas algumas convenções de sinal para os esforços atuantes e as velocidades das partículas, além de se adotar setas indicativas do sentido de propagação das ondas, conforme mostrado na Tabela 3.1. Forças e tensões compressivas são consideradas positivas, assim como deslocamentos no sentido descendente também são considerados positivos.

Tabela 3.1 Convenções adotadas para velocidades e forças.

Sentido da onda	Força	Tensão gerada
Descendente	$F \downarrow = v \downarrow \cdot Z$	Compressão
Ascendente	$F \uparrow = v \uparrow \cdot Z$	Tração

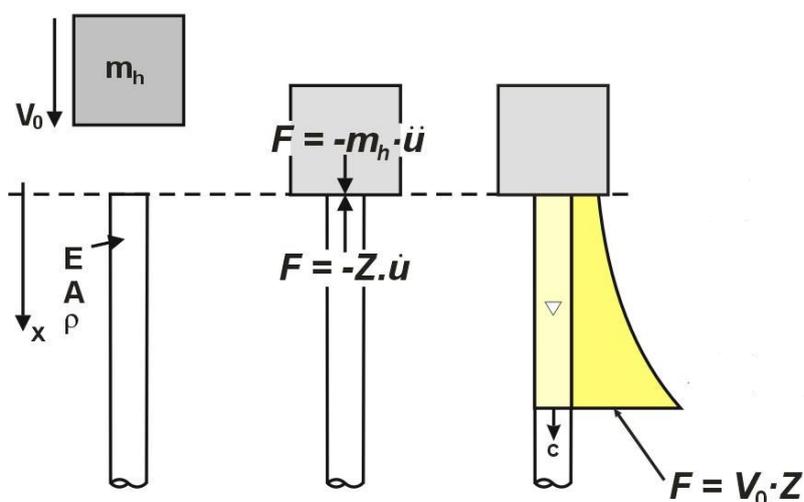
### 3.2 SOLUÇÕES FECHADAS DA ONDA DE TENSÃO INICIAL.

Bredenberg (1982) apud Bernardes (1989), apresenta algumas soluções analíticas para o fenômeno de propagação de ondas longitudinais de tensão aplicadas na cravação de estacas, mas que são utilizadas também para a análise do comportamento de ensaios dinâmicos no SPT, e que serão utilizadas para o entendimento do comportamento do DPL.

#### 3.2.1 IMPACTO DE UM MARTELO RÍGIDO DIRETO NO TOPO DA HASTE.

A Figura 3.3 mostra a representação da queda de uma massa rígida  $m_h$ , de velocidade inicial  $V_0$ , sobre uma haste de módulo de elasticidade  $E$ , peso específico  $\rho$ , impedância  $Z$  e área de seção transversal  $A$ .

Figura 3.3 Onda de compressão inicial para o caso de impacto de martelo rígido e haste, sem uso de coxim como amortecedor.



Fonte: Gonçalves et al. (2007)

No instante do impacto da massa com o topo da haste, o equilíbrio de forças é dado por:

$$m_h \cdot \ddot{u}(t) = Z \cdot \dot{u}(t) \quad \text{Eq. (3.16)}$$

Onde:

$\dot{u}(t)$  = velocidade das partículas

$\ddot{u}(t)$  = aceleração das partículas

A Eq. (3.16) pode ser reescrita como uma equação diferencial homogênea de segunda ordem, da forma:

$$\ddot{u}(t) + \frac{Z}{m_h} \cdot \dot{u}(t) = 0 \quad \text{Eq. (3.17)}$$

Esta equação diferencial possui solução com raízes reais distintas, Eq. (3.18), e constantes de integração que dependem das condições de contorno no momento do impacto da massa no topo da estaca, quando o deslocamento  $u(0) = 0$  e  $\dot{u}(0) = V_0$ , assim tem-se:

$$u(t) = c_1 + c_2 \cdot e^{\frac{-Z \cdot t}{m_h}} \quad \text{Eq. (3.18)}$$

$$c_1 = -c_2 \quad \text{Eq. (3.19)}$$

$$c_2 = -\frac{m_h}{Z} \cdot V_0 \quad \text{Eq. (3.20)}$$

Logo:

$$u(t) = \frac{m_h \cdot V_0}{Z} \left( 1 - e^{\frac{-Z \cdot t}{m_h}} \right) \quad \text{Eq. (3.21)}$$

A solução acima é adequada para um deslocamento no topo da haste, e uma solução geral para qualquer posição  $x$  em qualquer tempo  $t$ , considerando o instante  $t - x/c$ , é dada por:

$$u(x, t) = \frac{m_h \cdot V_0}{Z} \left( 1 - e^{\frac{-Z}{m_h} \left( t - \frac{x}{c} \right)} \right) \quad \text{Eq. (3.22)}$$

Como a força de impacto em função da posição  $x$  da haste, no instante  $t$ , pode ser escrita como  $F(x, t) = Z \cdot \dot{u}(x, t)$ , ao derivar a Eq. (3.22) obtém-se:

$$F(x, t) = V_0 \cdot Z \cdot e^{\frac{-Z}{m_h} \left( t - \frac{x}{c} \right)} \quad \text{Eq. (3.23)}$$

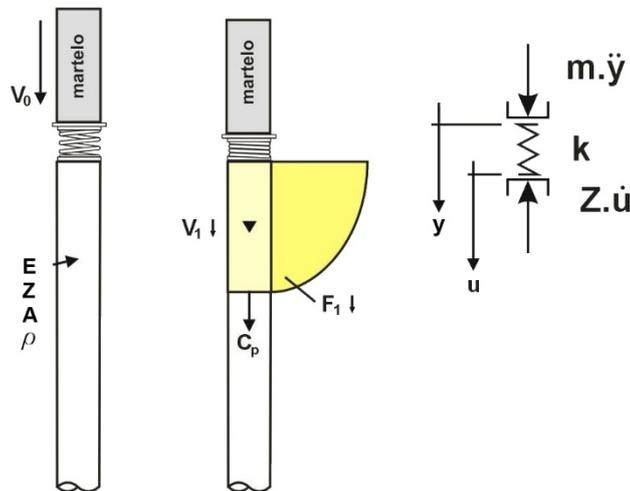
Substituindo a Eq. (3.23) na Eq. (3.15), e integrando-a, obtém-se a seguinte expressão para a energia transferida pelo impacto à haste:

$$E(x, t) = \frac{1}{2} \cdot V_0^2 \cdot m_h \left[ 1 - e^{-\frac{2Z}{m_h} \left( t - \frac{x}{c} \right)} \right] \quad \text{Eq. (3.24)}$$

### 3.2.2 IMPACTO DE UM MARTELO RÍGIDO COM USO DE COXIM NO TOPO DA HASTE.

A Figura 3.4 mostra uma representação da queda de uma massa  $m_h$  com velocidade  $V_0$  sobre um amortecedor elástico linear (coxim), de constante de rigidez  $k$ , que por sua vez transmite o impacto para a haste, de módulo de elasticidade  $E$ , peso específico  $\rho$ , impedância  $Z$  e área de seção transversal  $A$ .

Figura 3.4 Onda de compressão inicial para o caso de impacto de martelo rígido e haste, com uso de coxim como amortecedor.



Fonte: adaptado de Gonçalves et al. (2007).

A deformação do amortecedor é definida pelo deslocamento  $y$  da massa  $m_h$  após o impacto e pelo deslocamento  $u$  causado no topo da haste. Assim este deslocamento é dado por  $(y - u)$ . O seguinte sistema de equações diferenciais representa o equilíbrio entre a massa, o amortecedor e a haste:

$$\begin{cases} m_h \cdot \ddot{y} + k(y - u) = 0 \\ Z \cdot \dot{u} - k(y - u) = 0 \end{cases} \quad \text{Eq. (3.25)}$$

Considerando  $\beta^2 = k/m_h$  e  $\alpha = k/(2 \cdot Z)$ , com as devidas substituições, o sistema acima assume a seguinte forma:

$$\begin{cases} \ddot{y} + \beta^2 \cdot y - \beta^2 \cdot u = 0 \\ \dot{u} - 2 \cdot \alpha \cdot y - 2 \cdot \alpha \cdot u = 0 \end{cases} \quad \text{Eq. (3.26)}$$

Segundo Gonçalves, Bernardes e Seixas (2007), o sistema das Eq. (3.26) possuem soluções extensas que dependem da rigidez do amortecedor (coxim).

No caso de amortecedores de baixa rigidez, com  $\beta^2 > \alpha^2$  e  $k < 4 \cdot Z^2/m_h$ , as soluções para o deslocamento  $u$  do topo da haste, para a onda de compressão  $F(t)$ , e para a energia  $E(t)$  transmitida para a haste são respectivamente:

$$u(t) = \frac{V_0 \cdot k}{Z} \cdot \frac{1}{\alpha^2 + \omega^2} \cdot \left[ 1 - \frac{e^{-\alpha t}}{\omega} \cdot (\alpha \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) + \omega \cdot \text{cos}(\omega \cdot t)) \right] \quad \text{Eq. (3.27)}$$

$$F(t) = \frac{V_0 \cdot k}{\omega} \cdot e^{-\alpha t} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad \text{Eq. (3.28)}$$

$$E(t) = \frac{V_0^2}{Z \cdot \omega^2} \left\{ \frac{\omega^2}{4\alpha(\alpha^2 + \omega^2)} \left[ 1 - \frac{e^{-2\alpha t} (\alpha \text{sen}(2\omega t) + \omega \text{cos}(2\omega t))}{\omega} \right] - \frac{e^{-2\alpha t} \text{sen}^2(\omega t)}{2\alpha} \right\} \quad \text{Eq. (3.29)}$$

Nas equações acima,  $\omega = \sqrt{\beta^2 - \alpha^2}$ , válidas apenas para  $0 \leq t \leq \pi/\omega$ , que é o tempo em que a massa  $m_h$  está em contato com o amortecedor, após o qual a massa é arremessada para cima e a onda longitudinal de compressão está completamente formada.

No caso de amortecedores de alta rigidez, com  $\beta^2 < \alpha^2$  e  $k > 4 \cdot Z^2/m_h$ , as soluções para o deslocamento  $u$  do topo da haste, para a onda de compressão  $F(t)$ , e para a energia  $E(t)$  transmitida para a haste são apresentadas abaixo:

$$u(t) = \frac{V_0 \cdot k}{Z} \cdot \frac{1}{\alpha^2 - \omega^2} \cdot \left[ \frac{e^{-\alpha t}}{\omega} \cdot (\omega \cdot \text{cosh}(\omega \cdot t) + \alpha \cdot \text{senh}(\omega \cdot t)) - 1 \right] \quad \text{Eq. (3.30)}$$

$$F(t) = \frac{V_0 \cdot k}{\omega} \cdot e^{-\alpha t} \cdot \text{senh}(\omega \cdot t) \quad \text{Eq. (3.31)}$$

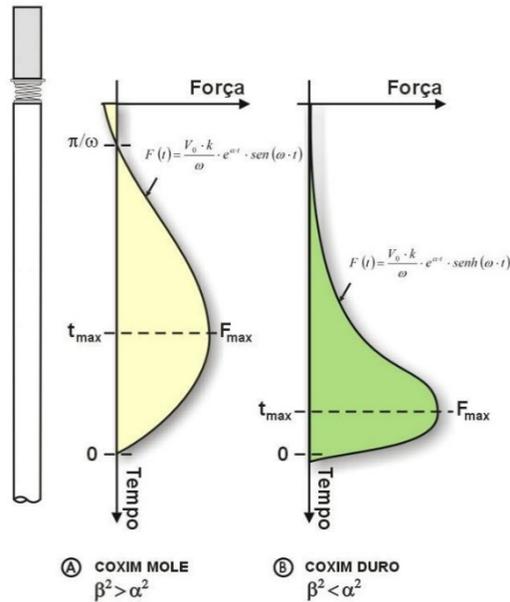
$$E(t) = \frac{(V_0 \cdot k)^2}{Z} \left[ \frac{e^{-2\alpha t} \text{senh}^2(\omega t)}{2 \cdot \alpha \cdot \omega^2} + \frac{\frac{e^{-2\alpha t}}{\omega} (\omega \text{cosh}(2\omega t) + \alpha \text{senh}(2\omega t)) - 1}{4\alpha(\omega^2 - \alpha^2)} \right] \quad \text{Eq. (3.32)}$$

Nestas expressões tem-se  $\omega = \sqrt{\alpha^2 - \beta^2}$ . A Eq. (3.31) atinge seu máximo quando a derivada segunda do deslocamento for zero ( $\ddot{u} = 0$ ), em

$$t = \frac{1}{\omega} \cdot \tanh^{-1}\left(\frac{\omega}{\alpha}\right); \left|\frac{\omega}{\alpha}\right| < 1 \quad \text{Eq. (3.33)}$$

Na Figura 3.5 podemos observar os diferentes comportamentos que as ondas de tensão assumem ao serem transmitidas para as hastes, em função da rigidez do amortecedor.

Figura 3.5 Esquema de propagação longitudinais de tensão, considerando amortecedores de diferentes rigidez.

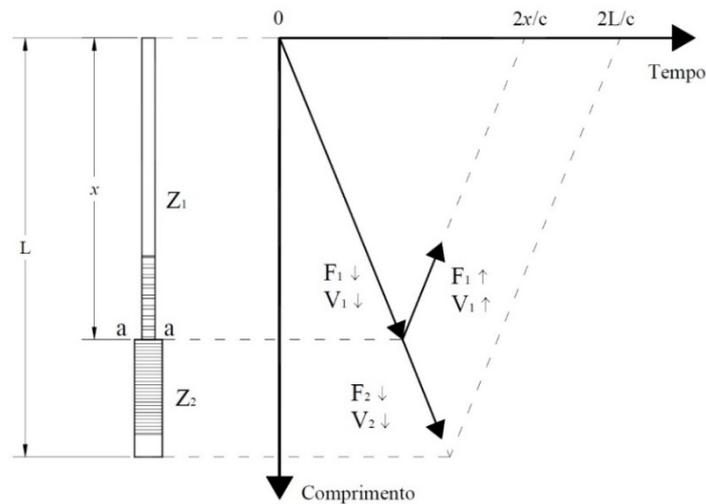


Fonte: adaptado de Gonçalves et al. (2007)

### 3.3 ALTERAÇÃO DA IMPEDÂNCIA HASTE.

A impedância de uma haste, dada pela Eq. (3.4), depende do módulo de elasticidade  $E$  do material da haste, da velocidade  $c$  de propagação da onda longitudinal de tensão e da área da seção transversal  $A_t$  da haste. Na Figura 3.6 tem-se o esquema de uma haste de comprimento  $L$ , em que as propriedades do material se mantêm, mas que em uma dada posição  $x$ , ocorre uma variação da área da seção transversal  $a - a$ , de forma que a parte superior da haste tenha impedância  $Z_1$  e a inferior  $Z_2$ .

Figura 3.6 Propagação de onda longitudinal de tensão através de seções de áreas distintas.



Fonte: adaptado de Odebrecht (2003)

Uma onda descendente sobre a seção  $a-a$ , com uma força  $F_1 \downarrow$  e velocidade das partículas  $v_1 \downarrow$ , ao atingir a seção de descontinuidade será parcialmente refletida com força  $F_1 \uparrow$  e velocidade  $v_1 \uparrow$ , e parcialmente transmitida à seção seguinte com força  $F_2 \downarrow$  e velocidade  $v_2 \downarrow$ .

Belincanta (1985) observa que para se determinar o efeito desta descontinuidade, duas condições devem ser observadas:

- As forças sobre a seção  $a-a$  devem ser iguais nos dois lados da descontinuidade, isto é, devem estar em equilíbrio.
- As velocidades das partículas sobre a seção  $a-a$  também devem ser iguais em ambos os lados da descontinuidade.

Desta forma, tem-se:

$$F_2 \downarrow = F_1 \downarrow + F_1 \uparrow \quad \text{Eq. (3.34)}$$

$$v_2 \downarrow = v_1 \downarrow + v_1 \uparrow \quad \text{Eq. (3.35)}$$

Ao resolver tais equações de forma a se determinar a força e a velocidade transmitidas pela descontinuidade, tem-se:

$$F_2 \downarrow = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} F_1 \downarrow \quad \text{Eq. (3.36)}$$

$$v_2 \downarrow = \frac{2 \cdot Z_1}{Z_1 + Z_2} v_1 \downarrow \quad \text{Eq. (3.37)}$$

E fazendo as devidas substituições, determina-se a força e a velocidade refletidas como:

$$F_1 \uparrow = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} F_1 \downarrow \quad \text{Eq. (3.38)}$$

$$v_1 \uparrow = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} v_1 \downarrow \quad \text{Eq. (3.39)}$$

### 3.4 MÉTODO CASE.

Desenvolvido entre as décadas de 1960 e 1970, o método CASE foi desenvolvido voltado para o controle dinâmico de fundações estacas. Segundo Goble *et al.* (1980), o método foi desenvolvido para responder algumas das seguintes questões:

- Qual a capacidade de carga estática das estacas obtida através de sua cravação?
- É possível obter uma descrição completa das propriedades da estaca, do solo e do martelo durante o processo de cravação?
- É possível avaliar a integridade da estaca?
- Quais as tensões na estaca durante a cravação?
- Qual é a eficiência do sistema de cravação?

A chamada "Fórmula Expedita de Case", Eq. (3.40), mostra que a reação total mobilizada pelo solo  $R_{Tot}$ , equivale à soma das reações de ponta  $R_p$  e de atrito lateral  $\sum R_L$ , que podem ser determinadas pelos registros de força  $F(t)$  e de velocidade  $v(t)$  medidos na cabeça da estaca, através de instrumentação adequada, durante a passagem de uma onda longitudinal de tensão (ALVES *et al.*, 2004). É comum que o registro das velocidades seja feito através de integrações de acelerações medidas através da instrumentação, geralmente formada por acelerômetros e transdutores de força.

$$R_D = \frac{1}{2} \left[ F(t^*) + F\left(t^* + \frac{2 \cdot L}{c}\right) \right] + \frac{1}{2} \cdot Z \cdot \left[ v(t^*) + v\left(t^* + \frac{2 \cdot L}{c}\right) \right] \quad \text{Eq. (3.40)}$$

O instante  $t^*$  é um instante de passagem da primeira onda descendente de tensão pela instrumentação, e o instante  $t^* + 2 \cdot L/c$  é o instante de chegada dessa mesma onda refletida pela ponta da estaca e,  $Z$  é a impedância da estaca calculada de acordo com a Eq. (3.4).

Normalmente o instante  $t^*$  é escolhido como o momento em que ocorre o primeiro máximo de velocidade  $v$  durante a primeira onda de tensão, que corresponde ao primeiro máximo de força calculada por  $F = Z \cdot v$ , uma vez que  $Z$  é constante. Assim a resistência dinâmica obtida pela Eq. (3.40) é uma ótima aproximação para a soma das forças estáticas e o máximo de damping (deformação plástica). No caso das forças relacionadas ao damping serem desprezíveis, o resultado para força dinâmica equivale à força estática. No caso de estacas cravadas em areias, onde o efeito de damping é muito

pequeno ou desprezível, o método Case fornece uma ótima previsão da força estática (GOBLE *et al.*, 1975).

No caso de estacas cravadas em solos onde o efeito de damping não é desprezível, como em siltes e argilas, o instante  $t^*$  escolhido necessita da correção dada pela Eq. (3.41).

$$t^* = t_{MAX} + \delta \cdot \frac{2 \cdot \ell}{c} \tag{Eq. (3.41)}$$

onde  $t_{MAX}$  é o instante do primeiro máximo de velocidade e,  $\delta$  é um fator que reflete o tipo de estaca e solo, conforme a Tabela 3.2 abaixo.

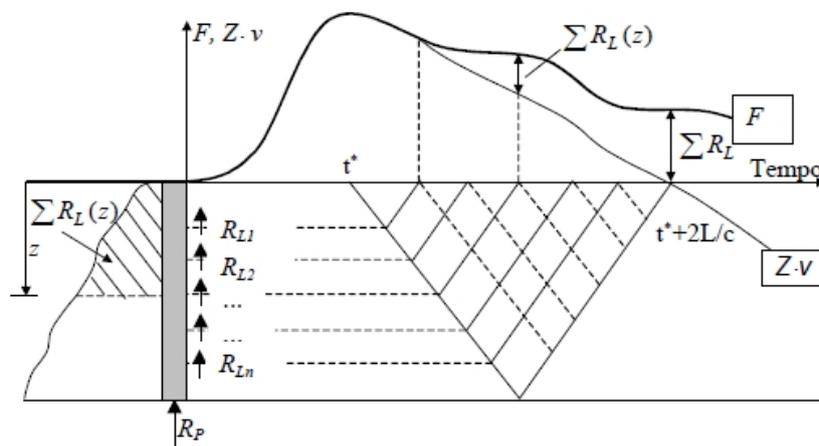
Tabela 3.2 Fatores de correção de  $t^*$ .

Tipo de estaca	Tipo de solo	$\delta$
Todos os tipos	Solos não coesivos	0,00
	Silte não plástico	0,25
Estacas tubulares (metálicas) e de madeira	Silte pouco plástico e argila mole	1,40
	Argila dura	1,20
Estacas de concreto	Solos de alta resistência	0,25
	Materiais mais moles	>0,25

Fonte: adaptado de Goble *et al.* (1975).

Através de um registro contínuo de força ( $F$ ) e de velocidade ( $Z \cdot v$ ), em função do tempo, pode-se obter as curvas exemplificadas na Figura 3.7. Nota-se que na medida em que a onda de compressão gerada pelo golpe percorre a estaca no sentido descendente, aparecem ondas refletidas no sentido ascendente, devido ao atrito da estaca com o solo. Na medida em que estas ondas ascendentes atingem a instrumentação, os registros das curvas começam a se distanciar, de forma que a distância vertical entre elas seja igual à soma de todo o atrito lateral até aquela profundidade. Uma descrição detalhada deste mecanismo, bem como a dedução da Eq. (3.40) pode ser encontrada em Goble *et al.* (1975) e em Danziger (1991).

Figura 3.7 Registros típicos de força e  $Z \cdot v$ .



Fonte: adaptado de Alves *et al.* (2004)

Segundo Goble et al. (1975), a reação total  $R_{Tot}$  descrita na Eq. (3.40) pode ser entendida como uma composição de duas parcelas: a primeira de forças resistivas estáticas  $R_s$  e a segunda por forças resistivas dinâmicas  $R_d$  (amortecimento) tratadas como proporcionais à velocidade, de forma que podemos escrever:

$$R_{Tot} = R_s + R_d \quad \text{Eq. (3.42)}$$

sendo que

$$R_d = J_{Case} \cdot Z \cdot v_p \quad \text{Eq. (3.43)}$$

onde  $J_{Case}$  é uma constante de amortecimento que depende do tipo de solo (vide Tabela 3.3) e  $v_p$  é a velocidade da ponta da estaca.

Tabela 3.3 Valores de  $J_{Case}$

Tipo de solo	$J_{Case} (*)$	$J_{Case} (**)$
Areias	0,05	0,05 – 0,20
Siltos arenosos	0,15	0,15 – 0,30
Areias siltosas	0,20	0,15 – 0,30
Siltos	0,30	0,20 – 0,45
Argilas siltosas e siltos argilosos	0,55	0,40 – 0,70
Argilas	1,10	0,60 – 1,10

Fonte: Goble et al. (1975)(\*) e Alves et al. (2004)(\*\*).

Se o instante  $t^*$  for escolhido como o momento do primeiro máximo de velocidade, a resistência obtida pela Eq. (3.40) é uma boa aproximação da soma da máxima resistência estática com o máximo amortecimento. Caso as forças de amortecimento sejam negligenciáveis, de forma que  $R_d = 0$ , então  $R_{Tot}$  representa uma boa estimativa da resistência estática oferecida pelo solo (GOBLE et al., 1975).

### 3.5 TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA NO ENSAIO DPL.

Os processos de transferência de energia no DPL são análogos aos processos de transferência de energia no SPT, descritos por Schmertmann e Palacios (1979), Bernardes (1989), Odebrecht (2003), Lukiantchuki (2012) e Morais (2014), descrito abaixo.

Ao se erguer o martelo do DPL, toda a energia do sistema equivale à energia potencial gravitacional teórica dada pela Eq. (2.7), corresponde teoricamente a 50J.

Quando o martelo é solto em queda livre, sua energia potencial é transformada em energia cinética e podem ocorrer perdas de energia por atrito em eventuais contatos do martelo com a haste-guia.

No momento em que o martelo atinge a cabeça de bater, a maior parte de sua energia cinética é transferida ao conjunto de hastes como uma onda longitudinal de

tensão que se propaga no sentido descendente. O restante de energia é dissipado sob a forma de energia sonora e energia térmica, entre outras.

No instante  $t_1 = \ell/c$ , onde  $\ell$  é o comprimento total das hastes somado ao comprimento da ponteira, a onda longitudinal de tensão alcança a extremidade final da composição e parte de sua energia é transformada no trabalho necessário à cravação da ponteira no solo, e o restante da energia é refletida sob a forma de ondas de tensão ascendentes em direção ao topo da composição do DPL.

Em  $t_2 = 2\ell/c$ , a onda refletida pela ponteira atinge a cabeça de bater sobre o topo de composição das hastes, onde parte de sua energia é refletida sob a forma de outra onda descendente que atingirá o extremo da ponteira no instante  $t_3 = 3\ell/c$ . No tempo  $t_2 = 2\ell/c$  ocorre uma rápida separação entre a cabeça de bater e o martelo, o que caracteriza o final da primeira onda de tensão incidente. Assim que o martelo atinge novamente a cabeça de bater, novos pulsos de tensão se propagam pela composição de hastes, iniciando uma segunda onda de tensão. As ondas de tensão a partir deste momento não são mais simples, e sim constituídas por impulsos ascendentes e descendentes.

Dependendo da magnitude de energia desta segunda onda ao atingir a ponteira, pode ou não ocorrer a continuidade da cravação. Caso esta onda tenha energia suficiente para vencer a resistência oferecida pelo solo, ocorrerá a continuidade do processo. Caso a energia seja insuficiente, considera-se que o golpe está encerrado.

### 3.5.1 ENERGIA POTENCIAL DO SISTEMA

A energia potencial teórica do DPL, assim como de outros penetrômetros dinâmicos é dada tradicionalmente pela Eq. (2.7), como definida na EN ISO 22476-2:2005, e associada somente à queda do martelo:

$$EP_T = m_M \cdot g \cdot h_q$$

Odebrecht (2003) demonstra que a energia potencial total disponibilizada no sistema para a cravação da ponteira é maior que a energia potencial teórica  $EP_T$ , apesar das perdas de energia ocorridas na queda do martelo.

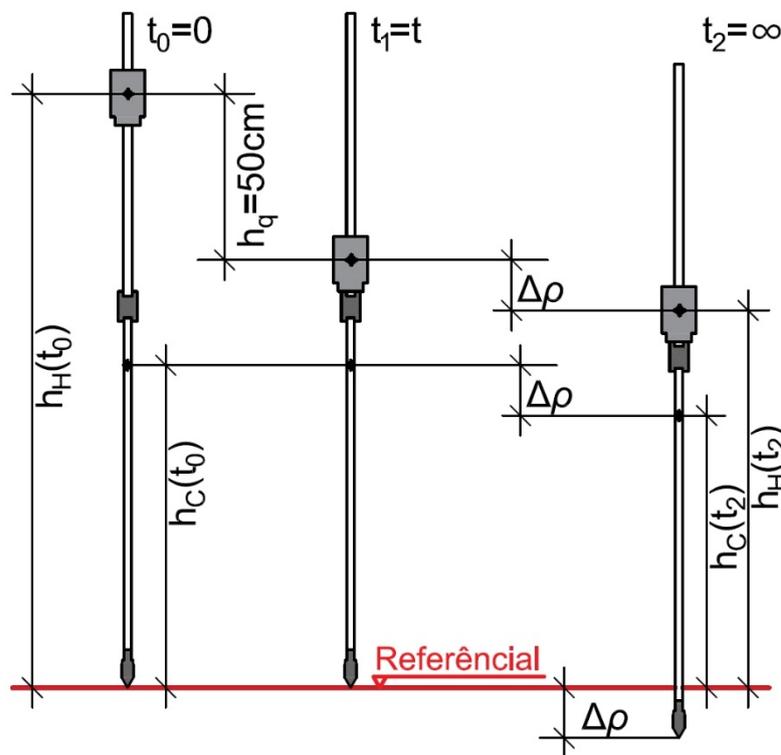
Isso ocorre devido ao fato de que quando é considerado um referencial fixo e externo ao DPL, Figura 3.8, a altura de queda do martelo é  $h_q$  somente entre o momento em que o martelo é solto,  $t_0 = 0$ , e o instante em que o martelo atinge a cabeça de bater,  $t_1 = t$ , assim como a massa considerada na quantificação da energia entre estes dois instantes é somente a massa do martelo  $m_M$ . No entanto, após o impacto do martelo, todo o sistema formado pelo martelo, haste-guia, cabeça de bater, composição de hastes

e ponteira, sofre um deslocamento  $\Delta\rho$  igual à penetração permanente da ponteira no solo, que se encerra em  $t_2 = \infty$ . Assim, Odebrecht (2003) propõe que a energia potencial devido à cravação da ponteira no solo deva ser considerada, ou seja:

$$EP_s = m_M \cdot g \cdot h_q + (m_M + m_{HG} + m_{CB} + n \cdot m_H + m_p) \cdot g \cdot \Delta\rho \quad \text{Eq. (3.44)}$$

onde  $m_M$  é a massa do martelo,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $h_q$  é a altura de queda do martelo,  $m_{HG}$  é a massa da haste-guia,  $m_{CB}$  é a massa da cabeça de bater,  $n$  é o número de hastes utilizadas na composição,  $m_H$  é a massa de uma haste,  $m_p$  é a massa da ponteira e  $\Delta\rho$  é a penetração permanente da ponteira no solo.

Figura 3.8 Energia potencial do sistema.

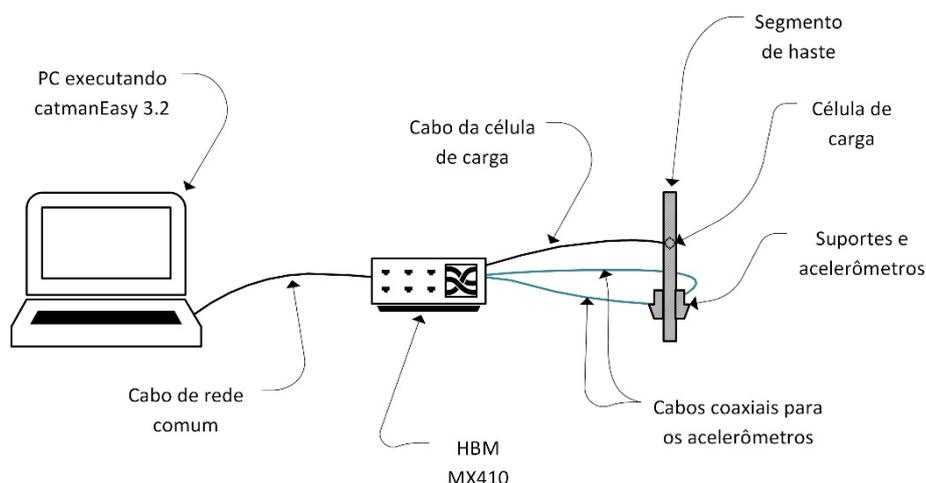


Fonte: adaptado de Odebrecht (2003).

## 4 A INSTRUMENTAÇÃO DINÂMICA.

Conforme as orientações da norma americana ASTM D4633-10:2010, uma instrumentação deve ser composta por uma célula de carga formada por uma ponte de *Wheatstone* coladas em uma haste metálica e dois acelerômetros montados em suportes parafusados na mesma haste. Para o monitoramento utiliza-se um sistema digital de aquisição de dados e um computador capaz de executar o programa de comunicação e de tratamento dos dados coletados. O segmento de haste instrumentado para o DPL foi montado entre a cabeça de bater e o conjunto de hastes do sistema, de forma a medir a força e aceleração que é transmitida às hastes. O esquema da instrumentação, é mostrado na Figura 4.1. Os acelerômetros, cabos, interfaces, sistema de aquisição de dados e o programa de comunicação conforme descritos a seguir foram emprestados pelo Departamento de Geotecnia da EESC-USP.

Figura 4.1 Esquema geral da instrumentação dinâmica utilizada.



Fonte: o autor.

### 4.1 A CÉLULA DE CARGA.

A célula de carga foi confeccionada usando um segmento de haste do DPL com 25 cm de comprimento e diâmetro de 22 mm e com encaixes para os parafusos comerciais M16 nas suas duas extremidades. Desta forma este segmento tem a mesma área transversal e a mesma impedância mecânica das demais hastes utilizadas no DPL e pode ser acoplado entre a cabeça de bater e a primeira haste da composição, mas também em qualquer outra posição que se mostre necessário.

A célula de carga foi montada no Laboratório de Metrologia da PUC-Rio, e é constituída por quatro extensômetros duplos de 350  $\Omega$  da Micro Measurement formando uma ponte de *Wheatstone* completa, Figura 4.2(a), conforme proposto por Odebrecht (2003). O uso de extensômetros duplos assim como sua colagem em posições

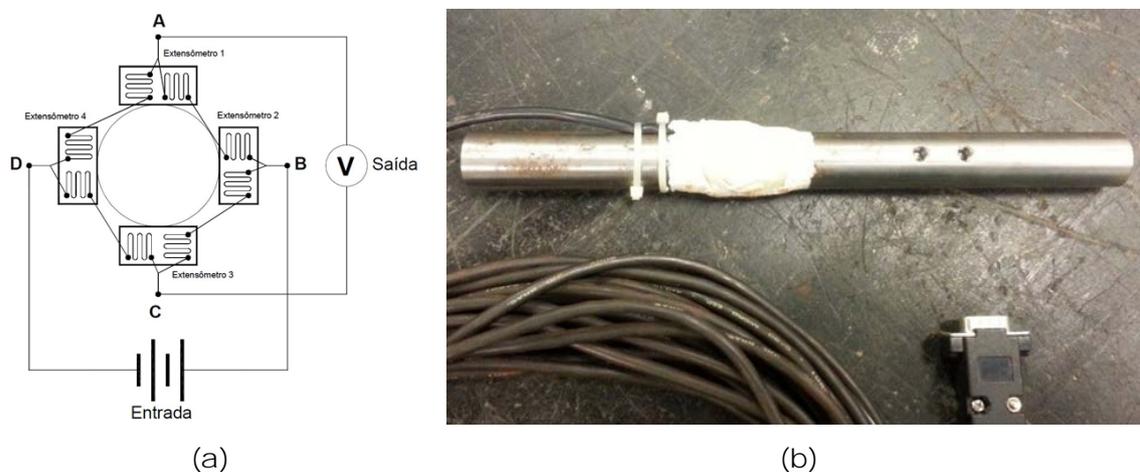
diametralmente opostas no segmento de haste, minimizam os efeitos de temperatura e flexão na tomada de dados.

O local em que foram colados foi previamente submetido a um jateamento de areia para eliminar as impurezas presentes em sua superfície. Posteriormente foi lixado apropriadamente para eliminar a rugosidade criada no processo de jateamento. Este preparo garantiu a perfeita aderência dos extensômetros à superfície da haste.

Antes de colar os extensômetros, foram feitos quatro furos para a posterior fixação de dois suportes para acelerômetros nas hastes.

Para proteção dos extensômetros colados, e de sua fiação, foi aplicada uma pasta de silicone sobre eles, Figura 4.2(b). Posteriormente esta pasta foi recoberta por uma borracha autocolante que fornece proteção mecânica e contra umidade à célula de carga.

Figura 4.2 Célula de carga.



Fonte: (a) Odebrecht (2003) e (b) arquivos pessoais do autor.

O esquema de montagem da célula de carga foi o mesmo utilizado por Odebrecht (2003), Lukiantchuki (2012) e Morais (2014).

## 4.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS HBM MX410.

A norma ASTM D4633-10:2010 estabelece parâmetros para se medir a energia em penetrômetros dinâmicos, aplicáveis a ensaios como o SPT e também ao DPL. No que se refere ao sistema de aquisição/processamento/exibição de dados, a norma recomenda equipamentos com capacidade de amostragem por canal entre 50 kHz e 250 kHz no caso de uso de sensores digitais, e entre 10 kHz e 25 kHz no caso de sensores analógicos, dependendo ainda do filtro passa-baixo adotado.

O sistema HBM MX-410, Figura 4.3, permite o uso simultâneo de até 4 sensores (4 canais), com taxas de amostragem bruta de 96 kHz (96000 leituras de dados por canal, por segundo), permitindo o uso de filtro passa-baixo. Entre as indicações de uso está a de

auxílio na análise de eventos dinâmicos, uma vez que admite o uso de sensores/transdutores como strain gauges de ponte completa ou de meia ponte e acelerômetros digitais.

O equipamento trabalha com uma faixa de excitação de 5 a 24 V. Os dados são adquiridos nesta faixa de tensão elétrica, sendo que no caso de transdutores piezoelétricos, como os acelerômetros digitais, há a necessidade de usar um condicionador de sinais IEPE, que tem por objetivo amplificar os sinais recebidos.

Os valores lidos são convertidos para unidades adequadas ( $kN$ ,  $m/s$ ,  $m/s^2$ , etc.) pelo software *Catman®Easy/AP* através de curvas de calibração dos transdutores/sensores acoplados ao sistema.

Figura 4.3 Módulo de aquisição de dados HBM MX 410 utilizado



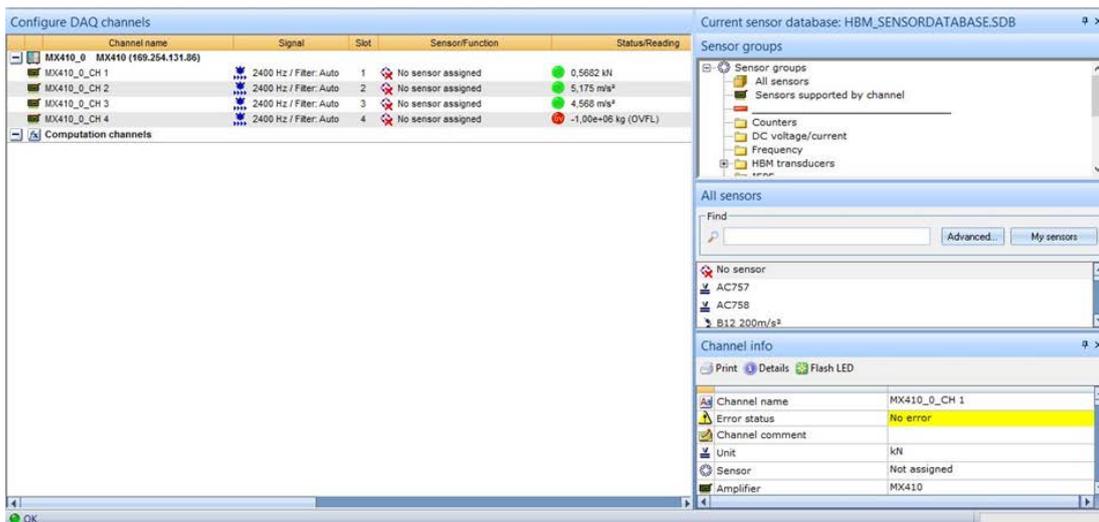
Fonte: arquivos pessoais do autor.

O software *Catman®Easy/AP* v3.4, que acompanha o módulo de aquisição de dados HBM MX410, permite a identificação automática dos sensores acoplados às portas de entrada de dados, através de um banco de dados próprio (Figura 4.4). Uma vez identificados, o usuário pode inserir as curvas de calibração através de uma função matemática, ou ainda através de dados de calibração tabelados.

A visualização dos sinais é obtida através de ferramentas próprias, em tempo real dos dados, bem como sua análise, Figura 4.5. Os dados coletados podem ser gravados para pós-processamento, manipulação e análise.

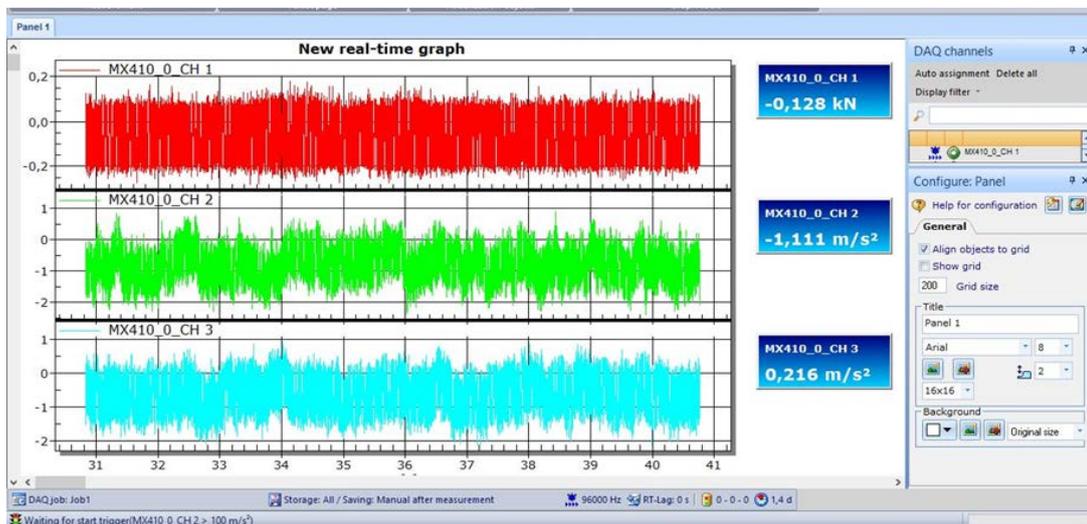
Dentre as ferramentas de pós-processamento destacam-se a capacidade de se manipular matematicamente os dados processados, de se selecionar ou filtrar os dados que interessam e a capacidade de exportar estes dados para diversos formatos.

Figura 4.4 Tela de configuração dos sensores acoplados ao HMB MX 410.



Fonte: arquivos pessoais do autor.

Figura 4.5 Visualização em tempo real dos dados coletados.



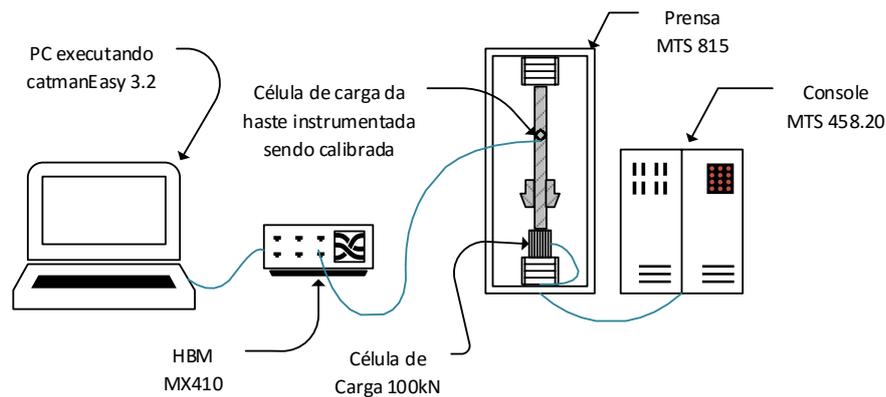
Fonte: arquivos pessoais do autor.

### 4.3 CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA.

A calibração da célula de carga foi feita no Laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos/USP. Foi utilizada uma prensa MTS 815 Rock Mechanics Test System, na qual foi montada uma célula de carga de 100 kN pré-aferida. Ligado à prensa, existia um sistema de controle/aquisição MTS 458.20 da *MicroConsole*, onde era controlada a carga aplicada pela prensa, Figura 4.6.

A haste instrumentada somente com a célula de carga foi ligada ao sistema de aquisição de dados HBM MX410, que por sua vez era ligada a um notebook comum através de um cabo de rede padrão *Ethernet*. Neste notebook era executado o software *Catman®Easy/AP*.

Figura 4.6 Esquema da calibração estática da célula de carga.



Fonte: o autor.

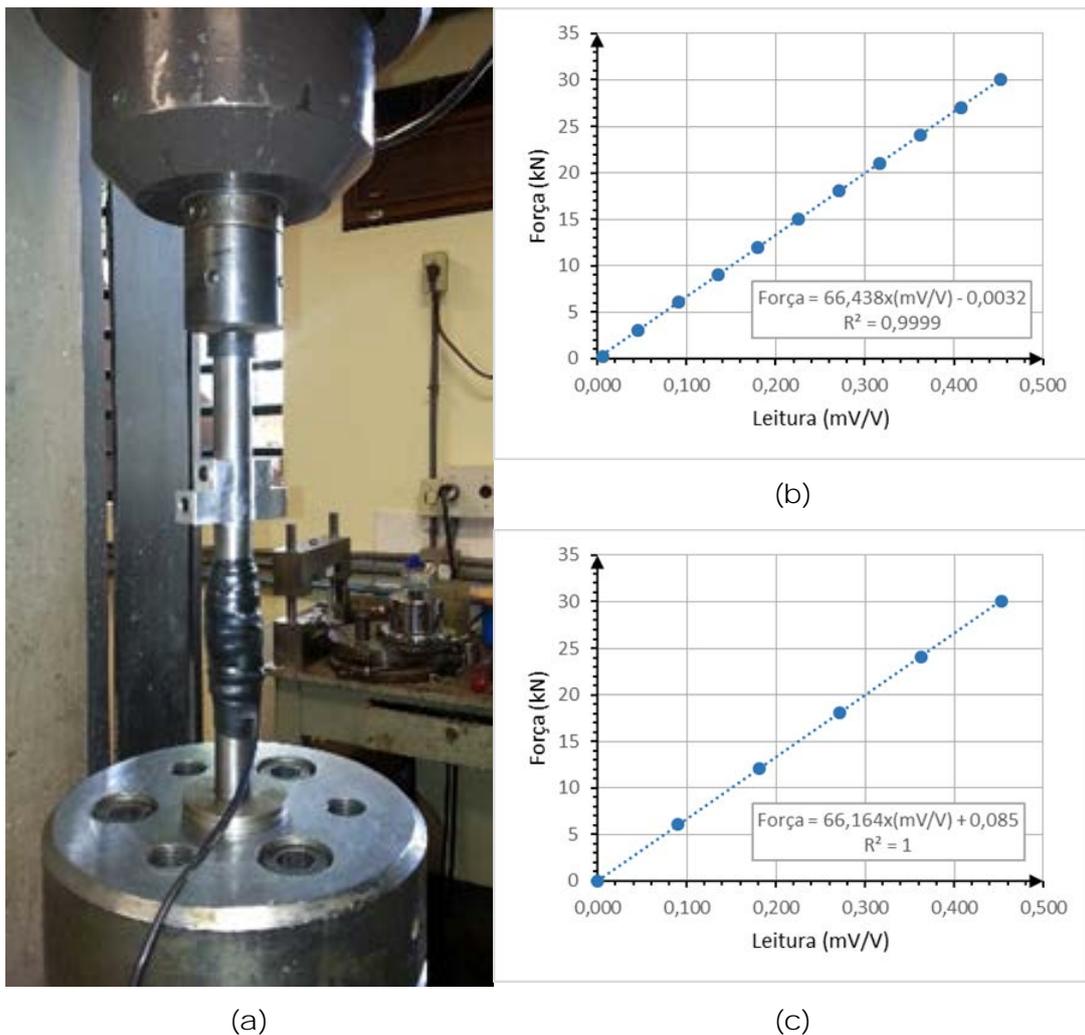
Após o posicionamento do segmento de haste na prensa, Figura 4.7(a), foi efetuada a calibração aplicando-se forças com sucessivos incrementos de 3 kN, até uma carga total de 30 kN, que eram ajustadas e lidas no Console MTS 458.20. Para cada incremento de carga, o programa *catman®Easy/AP* registrava a leitura de mV/V gerada pela célula de carga.

Após atingir a carga máxima, foi feito o descarregamento da haste, com sucessivos decrementos de 6 kN, até zerar a carga aplicada. Novamente as leituras de mV/V foram registradas.

As curvas de calibração para o carregamento, Figura 4.7(b), e para descarregamento, Figura 4.7(c) resultaram em equações lineares muito semelhantes. Em seguida, no programa *Catman®Easy/AP*, foi configurado um sensor com a calibração obtida no carregamento e a haste foi novamente carregada.

A leitura da força aplicada pela prensa (efetuada no Console MTS 458.20), comparada com a lida no software apresentou uma diferença inferior a 0,5%. O sensor foi modificado para a calibração do descarregamento e um novo carregamento foi feito comparando as leituras aplicadas pela prensa e lidas no software, porém neste teste a diferença entre ambas atingiu 0,75%. Com isso, foi adotada a calibração da fase de carregamento da haste.

Figura 4.7 Calibração da célula de carga.

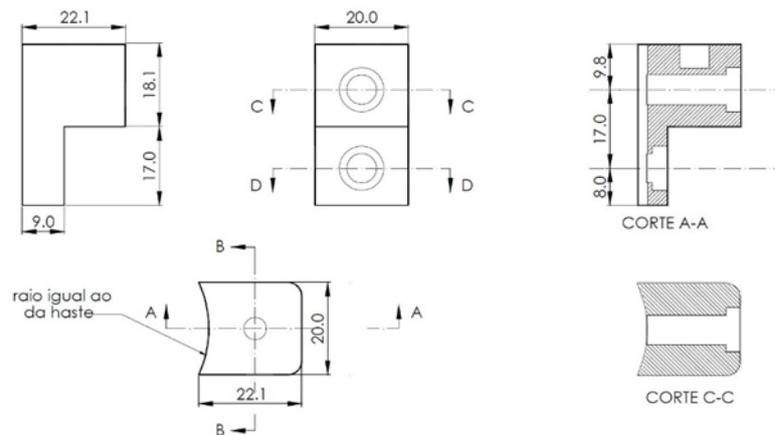


Fonte: arquivos pessoais do autor.

#### 4.4 SUPORTES DE FIXAÇÃO DOS ACELERÔMETROS.

Para a fixação dos acelerômetros na haste instrumentada, foram adotados os suportes modelo SP3 desenvolvidos por Lukiantchuki (2012), Figura 4.8, para ensaios com SPT com instrumentação dinâmica. O projeto destes suportes pôde ser facilmente adaptado para que fossem instalados nas hastes mais delgadas do DPL. Esse modelo apresentou melhor comportamento em relação à influência dos efeitos de ressonância e antirressonância, além de permitir leituras com pequenas variações de amplitude até uma frequência aproximada de 14 kHz. Os testes realizados pela autora mostraram a ocorrência de uma transmissibilidade próxima à constante e igual a 1 até a uma faixa de frequências próximas a 9,5 kHz. A partir desta faixa aparecem ressonâncias e antirressonâncias com amplitudes bem pequenas.

Figura 4.8 Projeto geométrico do suporte dos acelerômetros utilizado.

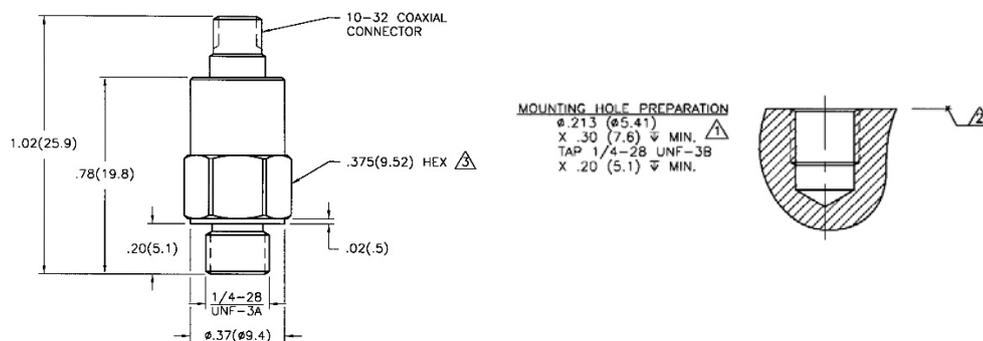


Fonte: Lukiantchuki (2012)

## 4.5 ACCELERÔMETROS.

Foram utilizados dois acelerômetros piezoelétricos modelo 350B04 fabricados pela PCB Piezotronics (Figura 4.9), números de série 30757 e 30758, cuja capacidade de medir acelerações é da ordem de  $\pm 5000$  g, o equivalente a  $49.000$  m/s<sup>2</sup>, em uma faixa de frequência entre 0,4 kHz e 10,0 kHz, tendo uma sensibilidade nominal de 1,0 mV/g.

Figura 4.9 Dimensões do acelerômetro PCB 350B04 e do furo de montagem dos mesmos



Fonte: manual dos acelerômetros.

Por serem dispositivos piezoelétricos, foi necessário o uso de cabos coaxiais de baixo ruído, bem como de condicionadores/amplificadores de sinal IEPE (Figura 4.10).

Os dois acelerômetros já vêm pré-calibrados de fábrica, não havendo necessidade de se desenvolver uma rotina de calibração para os mesmos. Os dados de calibração, que acompanhavam os sensores, foram utilizados para criar os sensores lógicos do programa catman®Easy/AP.

Nos testes preliminares, bem como nos ensaios de campo, estes acelerômetros mostraram-se adequados às necessidades de aquisição de dados, pois em nenhum momento a maior aceleração medida, da ordem de  $17.000$  m/s<sup>2</sup> (ou 1735 g), ultrapassou a capacidade máxima dos sensores.

Figura 4.10 Acelerômetros, cabos coaxiais e condicionadores/amplificadores de sinal.



Fonte: arquivos pessoais do autor.

#### 4.6 PROCESSAMENTO DOS DADOS DINÂMICOS.

Nos ensaios instrumentados, para cada golpe do martelo são obtidos três sinais a partir da haste instrumentada: um sinal de força e dois de aceleração. Estes sinais de força foram gravados em um arquivo binário, em formato específico do banco de dados do software de aquisição de dados catman®Easy/AP. Este software possui módulos adicionais que permitem a posterior análise, manipulação e tratamento destes sinais no escritório, bem como a sua visualização de uma forma interativa.

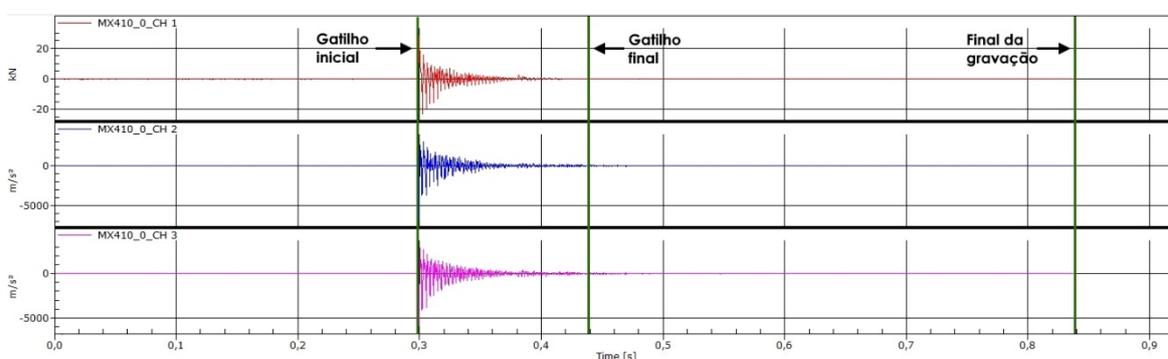
Os dados foram capturados a uma taxa de amostragem de 96 kHz (96 mil leituras de força e aceleração por segundo) de forma contínua. O sistema de aquisição foi configurado com dois gatilhos (trigger) ligados a um dos acelerômetros para determinar o intervalo de gravação. O primeiro é acionado quando uma primeira aceleração igual ou maior que  $100 \text{ m/s}^2$  é lida, e o segundo após a última aceleração de  $100 \text{ m/s}^2$  é identificada depois do término da aquisição dos dados. Assim são gravados os dados que contidos no intervalo compreendido entre 3 ms antes do primeiro gatilho e 4ms após o segundo gatilho, conforme a configuração utilizada.

Fica evidente que em cada golpe foram gravados muito mais dados que o necessário para o trabalho de análise, Figura 4.11. Portanto sempre foi feito um corte dos dados para um intervalo de tempo mais próximo dos gatilhos.

Segundo Odebrecht (2003), os sinais podem ser considerados de qualidade e, portanto, aprovados para análise, quando os resultados da força calculada por  $F = Z \cdot v$  se sobrepõem aos sinais de força obtidos pela célula de carga no primeiro impacto e, adicionalmente, quando o valor da penetração no solo calculado é próxima à penetração medida em campo. Para se obter as velocidades  $v$  das partículas em função

do tempo foi necessário integrar os sinais das acelerações. Para se obter os deslocamentos em função do tempo foi necessária uma integração da velocidade em função do tempo (dupla integração dos sinais de aceleração).

Figura 4.11 Intervalo bruto de captura de sinais para um golpe à profundidade de 5,9m.



Fonte: capturado do catman®Easy/AP pelo autor.

O processo não foi simples na medida em que os golpes podiam sofrer interferências diversas que afetavam os sinais registrados. Para eliminar estas interferências, os sinais brutos já cortados no intervalo de tempo adequado, foram tratados tanto no catman®Easy/AP, quanto através de um programa desenvolvido para o MatLab®.

O tratamento dos sinais visando corrigir o baseline, eliminar possíveis interferências e filtrar ruídos foi feito no catman®Easy/AP através de seu módulo de pós-tratamento matemático. Os dados referentes aos sinais tratados de força e acelerações eram exportados para arquivos em formato ASCII, para serem lidos no Matlab®, ou quando necessário copiados e colados para planilhas criadas no MS-Excel.

Paralelamente a este primeiro tratamento, os sinais copiados para o MS Excel® foram analisados para determinar a real velocidade  $c$  de propagação da onda de tensão nas hastes e a impedância mecânica  $Z$  das mesmas.

Finalmente, através de um programa criado no MatLab®, foi possível processar os sinais para calcular as velocidades em função do tempo, da força obtida por  $Z \cdot v$  em função do tempo, da energia transferida às hastes ( $EFV$ ) em função do tempo, os deslocamentos permanentes em função do tempo através e, finalmente, os valores de força ( $Z \cdot v$ ) pelo método CASE.

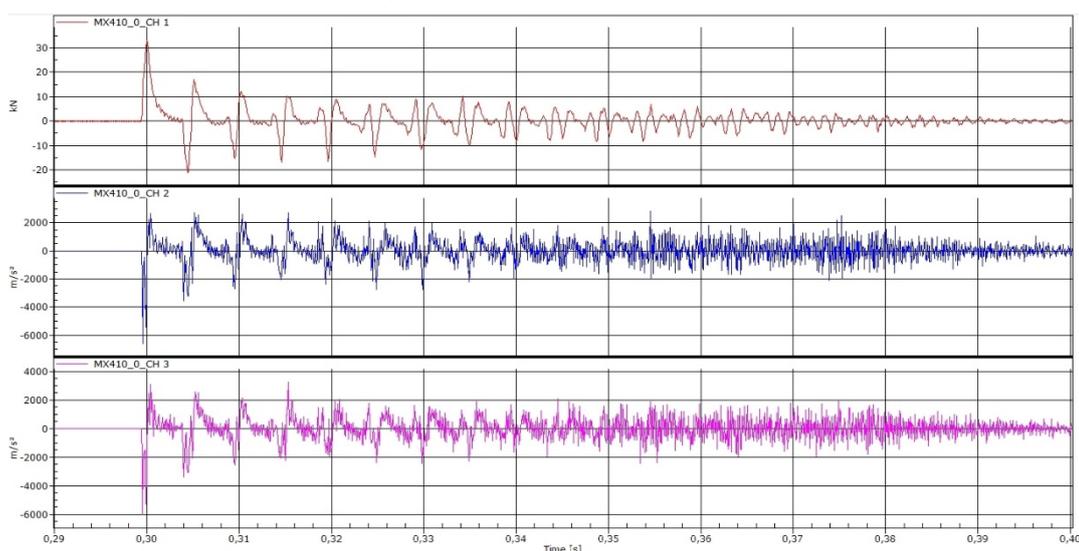
#### 4.6.1 TRATAMENTO NO CATMANEASY®/AP

Após iniciar o programa catman®Easy/AP no modo de análise de projeto, o arquivo de sinais de um golpe a ser tratado era aberto, permitindo sua visualização, manipulação e corte. Por padrão no canal 1 sempre foi gravado o sinal da célula de carga, no canal 2 o sinal do acelerômetro 1, e no canal 3 o sinal do acelerômetro 2.

Devido ao posicionamento dos acelerômetros na haste de instrumentação, os sinais de acelerações eram medidos e registrados com sentido invertido em relação ao

signal de força, interferindo diretamente nas integrações para se obter os sinais de velocidade da onda e o deslocamento permanente. Tipicamente, estes sinais lidos apresentavam-se como mostrado na Figura 4.12, com o primeiro pico do sinal de força voltado para cima, e os primeiros picos dos sinais de aceleração voltados para baixo, mostrando a necessidade de inversão dos sinais de aceleração.

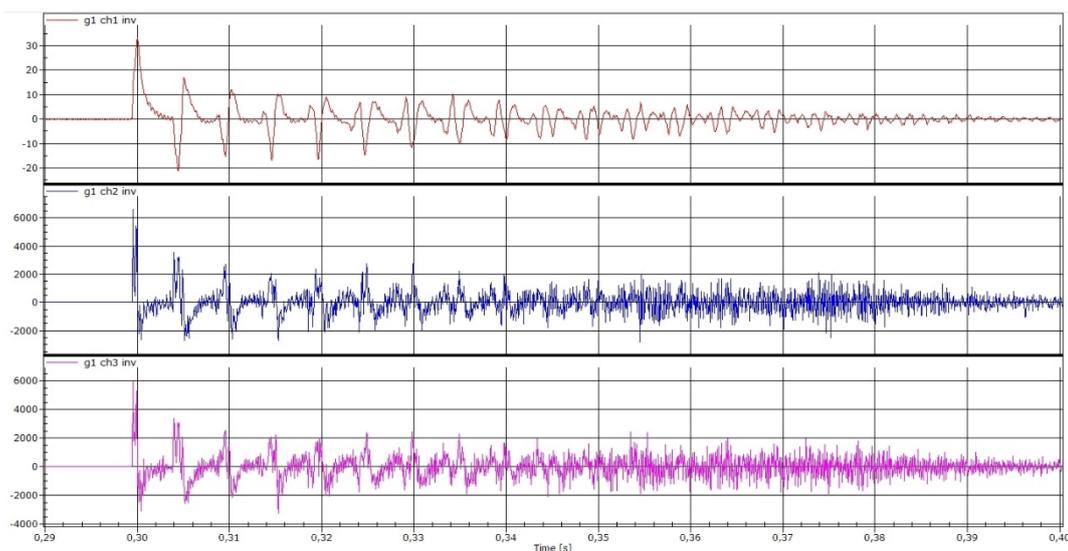
Figura 4.12 Sinais lidos para o primeiro golpe instrumentado com a ponteira a 10,9m de profundidade.



Fonte: capturado do catman®Easy/AP pelo autor.

Após serem multiplicados por -1 (menos um), os sinais de aceleração eram invertidos, como mostra a Figura 4.13. O sinal de força não sofre nenhuma alteração neste momento.

Figura 4.13 Sinais corrigidos quanto ao sentido, para golpe instrumentado.

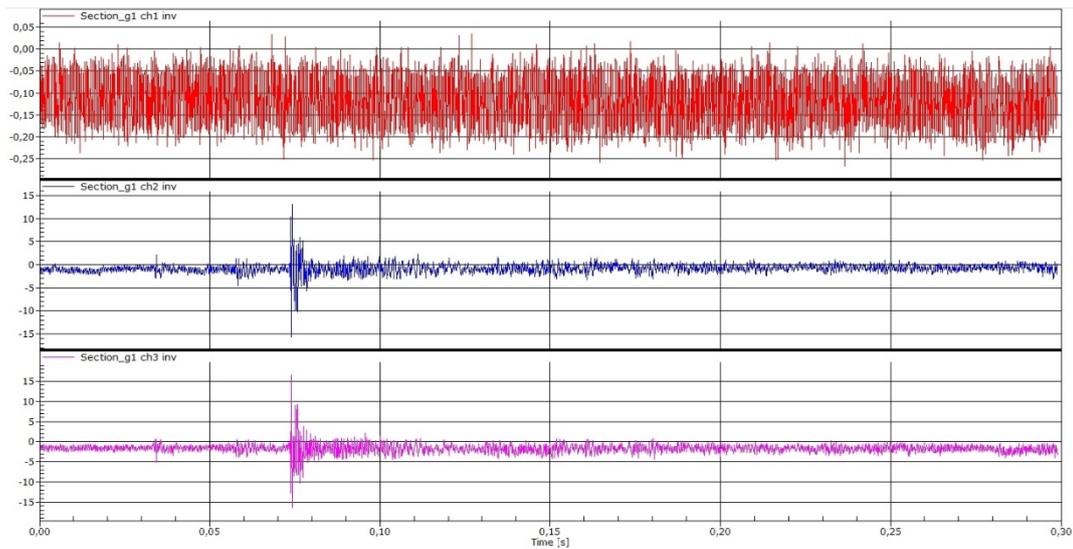


Fonte: capturado do catman®Easy/AP pelo autor.

Antes de cada ensaio, o sistema de aquisição de dados era ajustado quanto à baseline dos sinais, em uma situação de repouso inicial do martelo sobre o coxim, de forma

que os sinais iniciais eram próximos a zero. Uma inspeção do trecho inicial dos sinais gravados, geralmente no intervalo de tempo  $0 \text{ s} \leq t \leq 0,299 \text{ s}$  mostrava que a base dos sinais se encontrava abaixo do zero, como mostrado na Figura 4.14, possivelmente em decorrência do ato de se erguer o martelo e soltá-lo, quando há algum atrito entre a haste-guia e o martelo. Também, em muitos casos foi possível notar a presença de ruídos devido a vibrações indesejáveis na haste-guia como pode ser observado no intervalo  $0,07 \text{ s} \leq t \leq 0,08 \text{ s}$ .

Figura 4.14 Trecho inicial dos sinais mostrando a necessidade de correção dos zero da base, e a presença de ruídos para o primeiro golpe instrumentado com a ponteira a 10,9 m de profundidade.

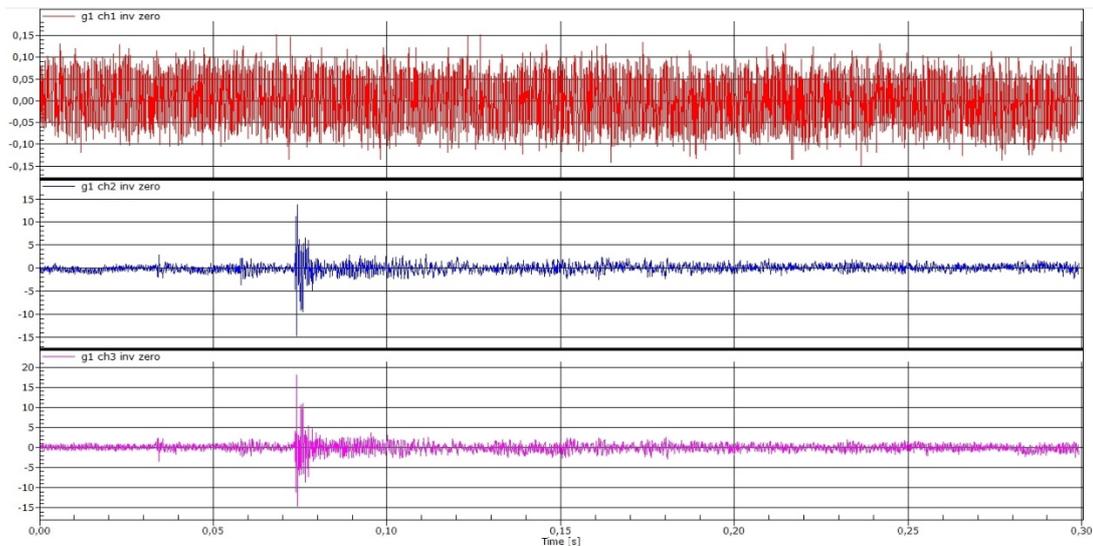


Fonte: capturado do catman®Easy/AP pelo autor.

Assumindo que os sinais oscilavam em torno de um valor médio, geralmente abaixo de zero, os valores numéricos dos dados relativos a esse intervalo de tempo foram copiados para uma planilha do MS-Excel, onde para cada canal, foi calculada uma média aritmética simples para estes dados. Estes valores médios foram então subtraídos dos respectivos sinais, ao longo de todo o intervalo de tempo, e uma nova inspeção no trecho inicial mostrava o reposicionamento dos sinais em relação ao zero, conforme pode ser observado na Figura 4.15

Os sinais foram então cortados em um intervalo de tempo adequado, em geral para o intervalo  $0,298 \text{ s} \leq t \leq t_{FINAL}$ , onde  $t_{FINAL}$  era escolhido como o tempo em que os sinais de força são próximos a zero. Desta forma, os eventuais ruídos presentes nos trechos iniciais dos sinais de aceleração são eliminados, assim como os dados gravados para um instante anterior ao primeiro gatilho, e posterior ao segundo.

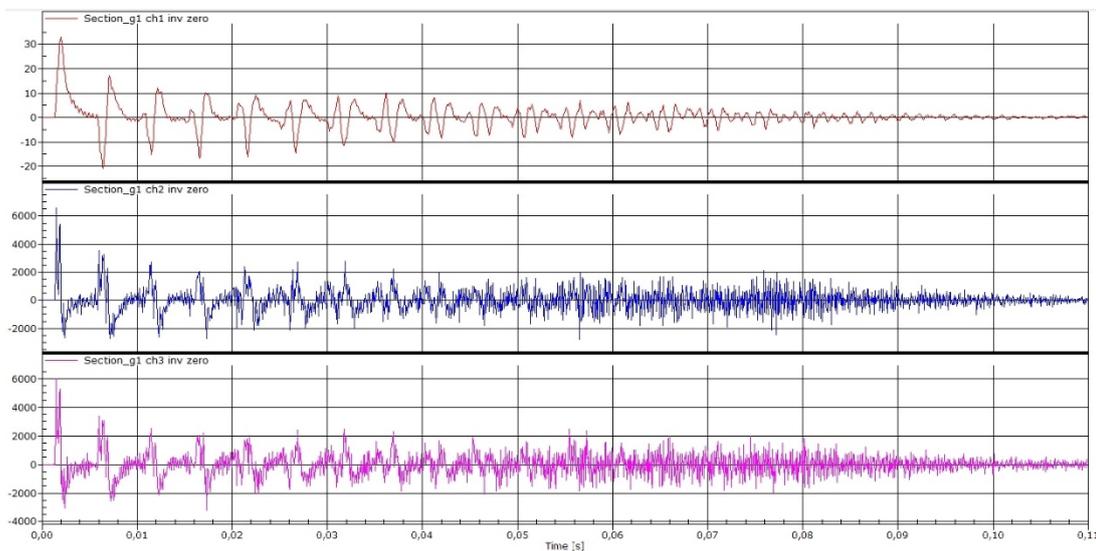
Figura 4.15 Sinais corrigidos quanto à linha de zeros para o primeiro golpe instrumentado com a ponteira a 10,9 m de profundidade.



Fonte: capturado do catman®Easy/AP pelo autor.

Porém, em muitos casos foi possível verificar a presença de ruídos ao longo do sinal recortado, como pode ser observado na Figura 4.16, em especial para  $t \geq 0,056$ s. Este tipo de comportamento em geral denota a necessidade de filtrar os dados, eliminando frequências indesejáveis ou suavizando as curvas.

Figura 4.16 Sinais recortados para o primeiro golpe instrumentado com a ponteira a 10,9m de profundidade, com presença de interferências.

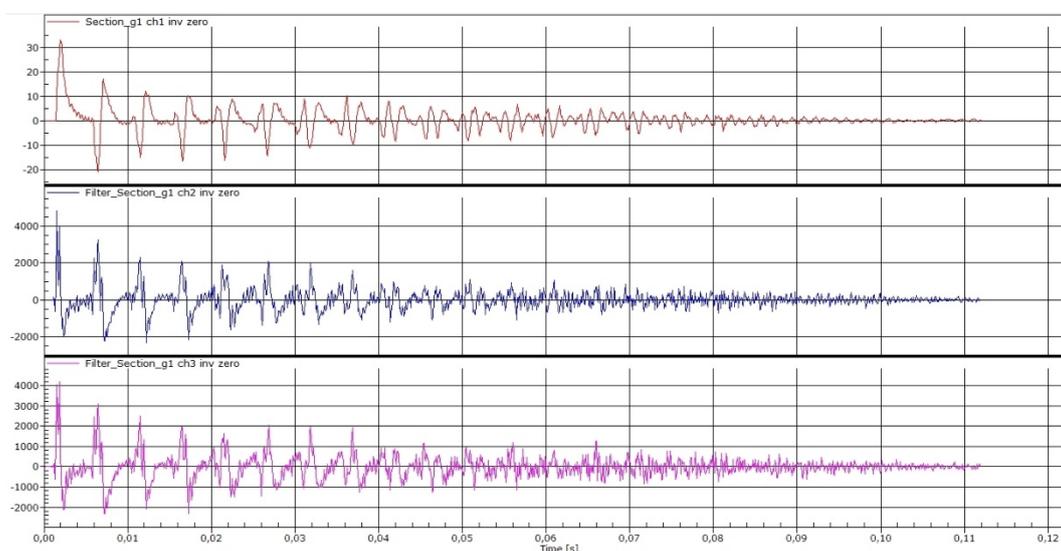


Fonte: capturado do catman®Easy/AP pelo autor.

Inicialmente foram tentados filtros baseados na transformada de Fourier, limitando a banda de frequências para a faixa de 60 Hz a 4.000 Hz, conforme sugerido por Odebrecht (2003), porém verificava-se que em geral isso acarretava em grandes perdas de energia no resultado final, de modo que o critério de comparação do sinal medido da força com  $F = Z \cdot v$  na onda inicial não resultaria em sucesso. Por isso foram tentados outros

tipos de filtragem e os melhores resultados foram obtidos com a aplicação do filtro “Savitzky-Golay smoothing” nos canais de aceleração. O filtro Savitzky-Golay é um filtro digital que pode ser aplicado a um conjunto de dados digitais para a finalidade de “alisamento dos dados”, sem distorcer grandemente o sinal. Isto é conseguido, num processo conhecido como convolução, por sucessivos subconjuntos de montagem de pontos de dados adjacentes com um polinômio de baixo grau pelo método dos mínimos quadrados (SCHAFFER, 2011). A aplicação deste filtro nos sinais de aceleração resultou em melhora na forma dos sinais, Figura 4.17, eliminando parte das interferências, e no atendimento dos critérios propostos.

Figura 4.17 Sinais com as acelerações tratadas pelo filtro Savitzky-Golay para o primeiro golpe instrumentado com a ponteira a 10,9 m de profundidade.



Fonte: capturado do catman®Easy/AP pelo autor.

Finalmente era feito um recorte final dos sinais, e os dados exportados para um arquivo em formato ASCII (texto) possibilitando sua importação por outros programas/sistemas.

Alguns golpes, em algumas profundidades foram completamente descartados mesmo após todo o tratamento, pois não atendiam aos critérios propostos, ou, como no caso dos golpes 2 e 3 do ensaio efetuado a 9,90m de profundidade, foram descartados somente os sinais referentes ao acelerômetro 2, que estava com mal contato e os valores apresentavam-se estourados.

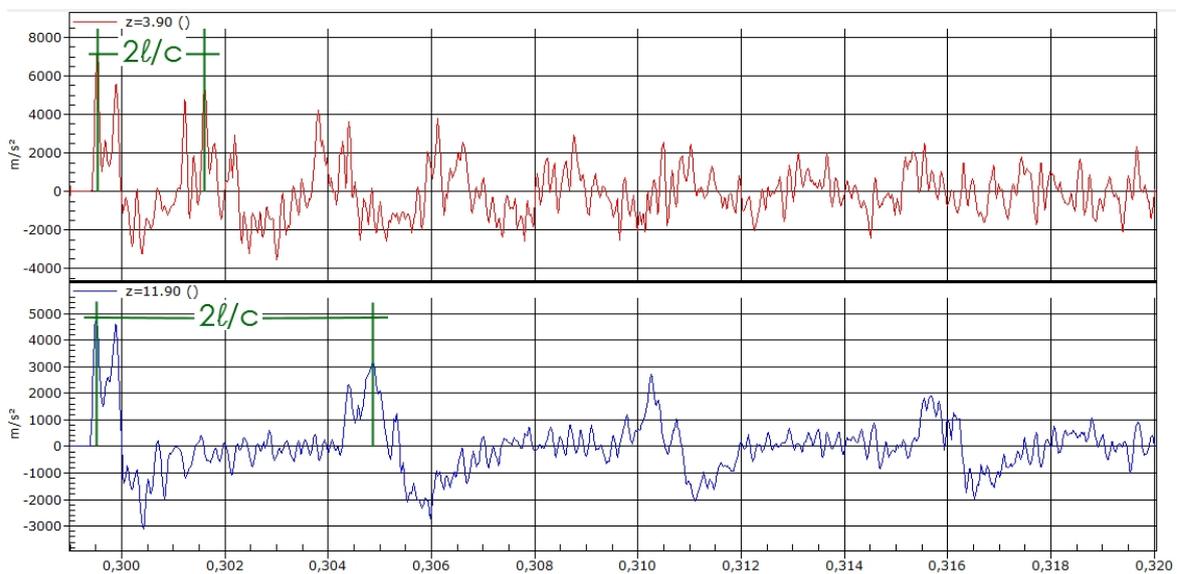
Alguns sinais quando foram processados apresentaram um desvio crescente da linha de zeros, o que exigiu uma correção angular dos sinais de velocidade no software desenvolvido em MatLab®, que é explicada mais adiante.

#### 4.6.2 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DA ONDA E DA IMPEDÂNCIA DAS HASTES.

A determinação da velocidade  $c$  de propagação da onda longitudinal de tensão pode ser determinada experimentalmente a partir dos sinais de força ou de acelerações gravados a cada golpe instrumentado.

Na Figura 4.18 observam-se os sinais de aceleração para um golpe à profundidade de 3,90m ( $z=3.90$ ), usando 4 hastes na composição, e outro golpe à profundidade de 11,90m ( $z=11.90$ ), usando 12 hastes na composição. O intervalo de tempo decorrido entre os picos de aceleração da primeira onda e da segunda onda de tensão é dado por  $\Delta t = 2\ell/c$ , onde  $\ell$  é o comprimento total da composição. Quanto maior  $\ell$ , maior  $\Delta t$ , como mostram os sinais.

Figura 4.18 Determinação do intervalo de tempo equivalente a  $2\ell/c$ .



Fonte: o autor.

O comprimento  $\ell$  é dado pela soma dos comprimentos das hastes com o comprimento da ponteira e mais 15 cm da haste instrumentada, que é a distância entre os strain gauges e o topo da composição de hastes. Na Tabela 4.1, encontramos os comprimentos calculados para as diversas composições a partir de 2 hastes.

Foram analisados os sinais das acelerações já invertidas, de todos os golpes válidos para as composições citadas, descartando os sinais nos quais a identificação dos picos ficou comprometida por excesso de ruídos, ou aquelas nas quais o sinal estava estourado por causa problemas na fixação do acelerômetro no suporte.

Para cada golpe, através do catmanEasy®/AP foram identificados os instantes  $t_1$  e  $t_2$  em que ocorrem os picos de aceleração, respectivamente da primeira e da segunda onda de tensão nos acelerômetros válidos, e em seguida foram registrados na planilha onde também foram calculados os valores de  $\Delta t$  equivalentes.

Tabela 4.1 Comprimento efetivo das composições do DPL com a haste instrumentada.

z (m)	Hastes	$\ell$ (m)
1,9	2	2,265
2,9	3	3,265
3,9	4	4,265
4,9	5	5,265
5,9	6	6,265
6,9	7	7,265
7,9	8	8,265
8,9	9	9,265
9,9	10	10,265
10,9	11	11,265
11,9	12	12,265

Fonte: o autor.

Na Tabela 4.2 estão relacionados os dados referentes à profundidade, o golpe e o acelerômetro considerados, os instantes  $t_1$  e  $t_2$ , e os valores calculados de  $\Delta t$  e  $c$  para cada sinal analisado.

Conhecendo os valores do comprimento  $\ell$  da composição utilizada no golpe, e os intervalos de tempo entre os picos de aceleração, foram calculadas as velocidades  $c$  de propagação de onda em função de cada sinal analisado através da Eq. (4.1), e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.2.

$$c = \frac{\ell}{\Delta t} \quad \text{Eq. (4.1)}$$

Tabela 4.2 Dados utilizados na determinação da velocidade de propagação da onda de tensão

z (m)	Golpe	Acel.	$t_1$ (s)	$t_2$ (s)	$\Delta t$ (s)	$c$ (m/s)
1,9	1	2	0,299490	0,300385	0,000895	5061
1,9	2	1	0,299563	0,300448	0,000885	5119
1,9	2	2	0,299542	0,300448	0,000906	5000
1,9	3	2	2,265344	2,266240	0,000896	5056
2,9	1	1	0,299573	0,300865	0,001292	5054
2,9	1	2	0,299521	0,300875	0,001354	4823
2,9	2	1	0,299573	0,300865	0,001292	5054
2,9	2	2	0,299531	0,300885	0,001354	4823
2,9	3	1	0,299563	0,300865	0,001302	5015
2,9	3	2	0,299552	0,300875	0,001323	4936
2,9	4	1	0,299573	0,300885	0,001312	4977
2,9	4	2	0,299531	0,300885	0,001354	4823
3,9	1	1	0,299542	0,301219	0,001677	5086

z (m)	Golpe	Acel.	t <sub>1</sub> (s)	t <sub>2</sub> (s)	Δt (s)	c (m/s)
3,9	1	2	0,299531	0,301219	0,001688	5053
3,9	2	1	0,299542	0,301208	0,001666	5120
3,9	2	2	0,299510	0,301208	0,001698	5024
3,9	3	1	0,299542	0,301219	0,001677	5086
3,9	3	2	0,299510	0,301208	0,001698	5024
4,9	3	1	0,299531	0,301635	0,002104	5005
4,9	3	2	0,299531	0,301625	0,002094	5029
5,9	1	1	0,299550	0,302000	0,002450	5114
5,9	1	2	0,299510	0,302000	0,002490	5032
5,9	2	1	0,299552	0,302010	0,002458	5098
5,9	2	2	0,299510	0,302010	0,002500	5012
5,9	3	1	0,299552	0,302031	0,002479	5054
5,9	3	2	0,299490	0,302021	0,002531	4951
6,9	1	1	0,299896	0,302677	0,002781	5225
6,9	1	2	0,299792	0,302677	0,002885	5036
6,9	2	1	0,299865	0,302656	0,002791	5206
6,9	2	2	0,299760	0,302656	0,002896	5017
6,9	3	1	0,299542	0,302354	0,002812	5167
6,9	3	2	0,299469	0,302365	0,002896	5017
7,9	1	1	0,299542	0,302833	0,003291	5023
7,9	1	2	0,299542	0,302844	0,003302	5006
7,9	2	1	0,299542	0,302823	0,003281	5038
7,9	2	2	0,299542	0,302833	0,003291	5023
7,9	3	1	0,299542	0,302844	0,003302	5006
7,9	3	2	0,299542	0,302844	0,003302	5006
8,9	1	1	0,299542	0,303177	0,003635	5098
8,9	1	2	0,299490	0,303188	0,003698	5011
8,9	2	1	0,299521	0,303208	0,003687	5026
8,9	2	2	0,299510	0,303208	0,003698	5011
8,9	3	1	0,299531	0,303229	0,003698	5011
8,9	3	2	0,299531	0,303229	0,003698	5011
10,9	1	1	0,299552	0,304000	0,004448	5065
10,9	1	2	0,299521	0,304010	0,004489	5019
10,9	2	1	0,299542	0,304021	0,004479	5030
10,9	2	2	0,299521	0,304010	0,004489	5019
10,9	3	1	0,299542	0,303979	0,004437	5078
10,9	3	2	0,299510	0,304000	0,004490	5018
11,9	1	1	0,299542	0,304406	0,004864	5043
11,9	1	2	0,299521	0,304406	0,004885	5021
11,9	2	1	0,299552	0,304406	0,004854	5054
11,9	2	2	0,299469	0,304385	0,004916	4990
11,9	3	1	0,299531	0,304385	0,004854	5054
11,9	3	2	0,299490	0,304396	0,004906	5000

z (m)	Golpe	Acel.	t <sub>1</sub> (s)	t <sub>2</sub> (s)	Δt (s)	c (m/s)
11,9	4	1	0,299542	0,304406	0,004864	5043
11,9	4	2	0,299510	0,304406	0,004896	5010

Fonte: o autor.

Após o registro de todos os sinais na planilha, foi calculado o valor médio da velocidade de propagação de onda e seu desvio padrão como:

$$c = 5031 \text{ m/s}$$

$$\sigma_c = 71 \text{ m/s}$$

Assumindo que o módulo de elasticidade  $E$  do aço usado no DPL modificado por Nilsson em 2001 é de 200 GPa, e considerando a área transversal  $A_t$  real das hastes (Tabela All.5), de acordo com a Eq. (3.4) a impedância das hastes pode ser calculada como segue

$$Z = \frac{E}{c} \cdot A_t = \frac{200 \text{ GPa}}{5031 \text{ m/s}} \cdot 0,000391 \text{ m}^2$$

logo, temos:

$$Z = 15,5 \text{ kPa.m.s}$$

Os valores assim obtidos para a velocidade de propagação de onda de tensão e da impedância são usados no programa desenvolvido no MatLab®.

#### 4.6.3 PROGRAMA DESENVOLVIDO NO MATLAB®.

O programa elaborado teve por base o software desenvolvido por (MORAIS, 2014) para otimizar as etapas de cálculo de energia, anteriormente feitas em planilhas do MS Excel e, assim solucionar problemas decorrentes de sucessivas exportações de dados, e baixa produtividade quando se usam planilhas para estes cálculos.

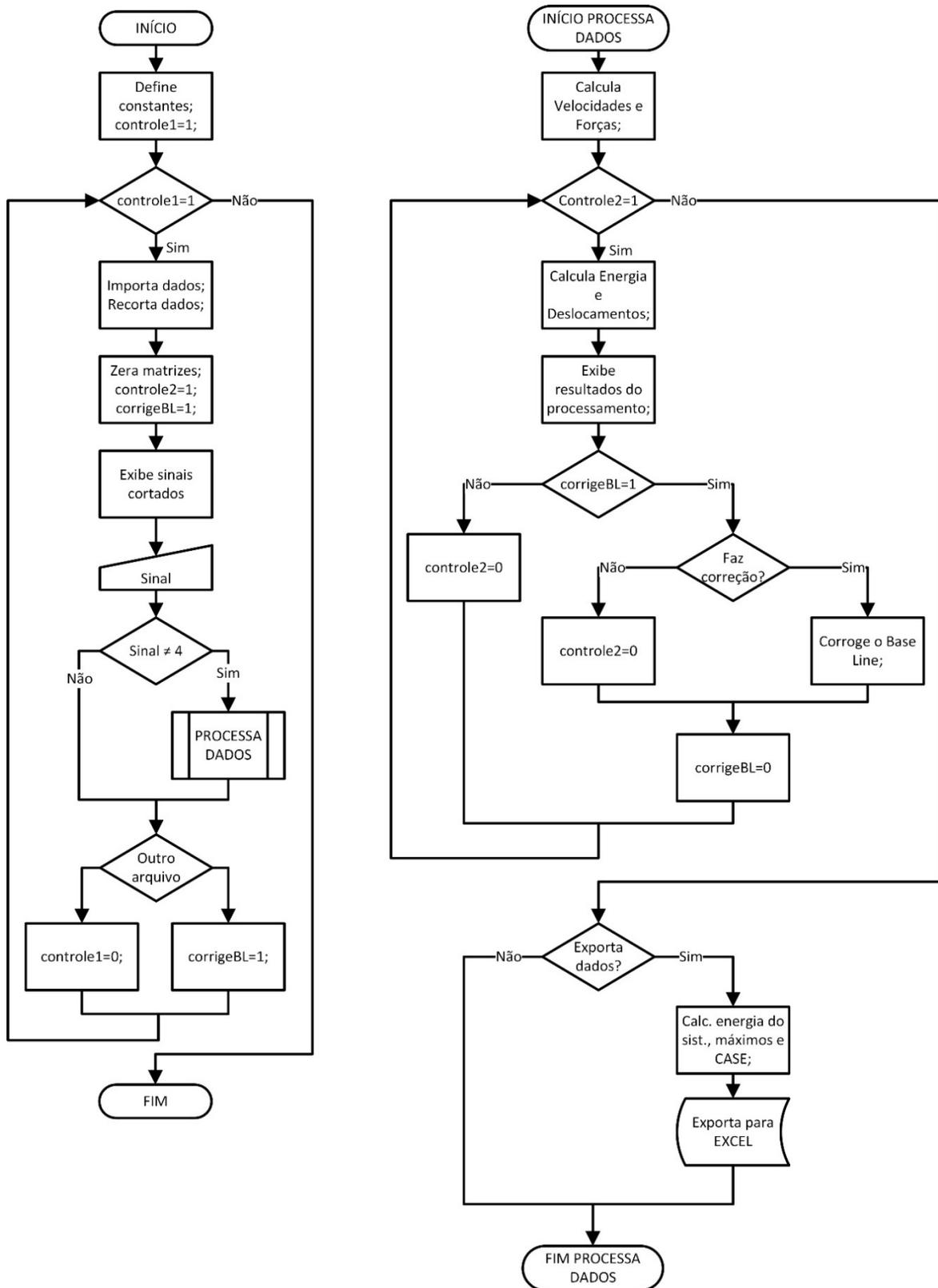
O programa é estruturado em bloco conforme mostrado no fluxograma da Figura 4.19, e utiliza métodos de cálculo numérico para as integrações.

Após algumas definições de constantes utilizadas pelo programa, entre elas os valores de  $Z$  e  $c$  calculados na fase anterior de tratamento de dados, o programa solicita ao usuário que forneça o nome do arquivo de dados a ser importado, a quantidade de hastes do DPL usadas na composição (usada para o cálculo da energia do sistema) e a penetração real da ponteira no solo (em metros).

Com relação ao arquivo de dados a ser importado, o mesmo deve ser em formato texto puro (formato ASCII), onde cada linha corresponde a um registro contendo 3 campos, pela ordem: valor medido pela célula de carga, valor medido pelo acelerômetro 1 e valor medido pelo acelerômetro 2. Este arquivo deve ter sido gerado

pelo catman®Easy/AP e já ter sido submetido aos tratamentos descritos em 4.6.1, o que inclui a correção de baseline de necessária.

Figura 4.19 Fluxograma do funcionamento geral do programa desenvolvido no MatLab®.



Fonte: o autor.

Os valores contidos neste arquivo são gerados utilizando vírgula decimal, o que não é reconhecido pelo MatLab® como separador de decimais, sendo necessário utilizar algum editor de texto puro, como o Notepad++ para substituir todas as vírgulas por pontos no arquivo, sem o que o processamento resulta em erro.

Foi adotada uma estratégia utilizada para a designação dos arquivos de entrada. Essa estratégia consiste em fazer com que os nomes de todos os arquivos sigam o formato "Cut-XXXX-Y.asc", onde XXXX representa a profundidade da ponteira no golpe e Y representa o número do golpe. Logo um arquivo com nome Cut-0590-2 contém os dados do segundo golpe (Y=2) realizado quando a ponteira do DPL estava a 5,90 m de profundidade. Esta estratégia se provou adequada para o controle das planilhas geradas, como será visto adiante.

É feito um corte mais preciso nos dados de entrada que aquele feito manualmente no catman®Easy/AP e os vetores de trabalho são criados com valores zerados, alocando memória necessária.

Em seguida, uma janela gráfica exibindo os sinais lidos e recortados de força e acelerações é exibida. Esta janela gráfica, como todas as demais que serão geradas, podia ser manipulada e gravada em formato de imagem (.bmp, .jpg, etc.).

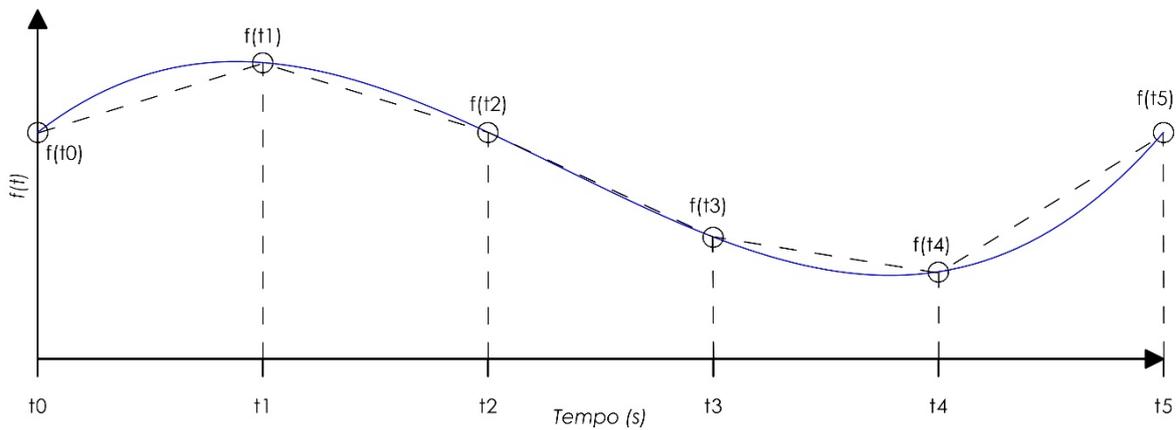
Dependendo da análise que fizer dos gráficos exibidos, o usuário pode selecionar através de um menu se deseja processar o sinal de um dos acelerômetros (Sinal=1 ou Sinal=2), de ambos (Sinal=3) ou de nenhum (Sinal=4). Neste último caso, o arquivo lido é abandonado e o usuário será questionado se deseja ou não processar outro arquivo. Nos demais casos, o programa executa o módulo de processamento dos dados relativos aos sinais de pelo menos um dos acelerômetros. Quando ambos acelerômetros forem selecionados, também é criado e processado um acelerômetro médio.

O módulo de processamento é iniciado com a integração dos sinais dos acelerômetros em função do tempo, obtendo os valores de velocidade  $v$  das partículas em função do tempo. Em seguida é calculada a força em função do tempo pela Eq. (3.13), ou seja:

$$F(t) = Z.v(t)$$

onde os valores de  $v(t)$  são obtidos a partir da aplicação da "Regra dos Trapézios" aos valores da aceleração em função do tempo. Para uma função  $f(t)$ , com intervalos de tempo  $\Delta t = t_i - t_{i-1}$  constantes, como mostrada na Figura 4.20. A integração de  $f(t)$  entre um instante inicial  $t_0$  e final  $t_n$  corresponde à soma das áreas dos trapézios entre estes instantes.

Figura 4.20 Exemplo da regra dos trapézios.



Fonte: o autor.

Logo a integral entre estes instantes pode ser dada por:

$$\int_{t=0}^{t=n} f(t) dt = \sum_{i=1}^n \frac{f(t_{i-1}) + f(t_i)}{2} \cdot (t_i - t_{i-1}) \quad \text{Eq. (4.2)}$$

Esta regra é adequada às integrações realizadas pelo programa, pois o intervalo de tempo  $t_i - t_{i-1}$  é constante e igual ao inverso da frequência de aquisição dos dados pela instrumentação, ou seja,  $\Delta t = t_i - t_{i-1} = 1/96000$  s.

O método dos trapézios é então utilizado para se obter a energia em função do tempo  $EFV(t)$  pelo método descrito pela Eq. (3.15):

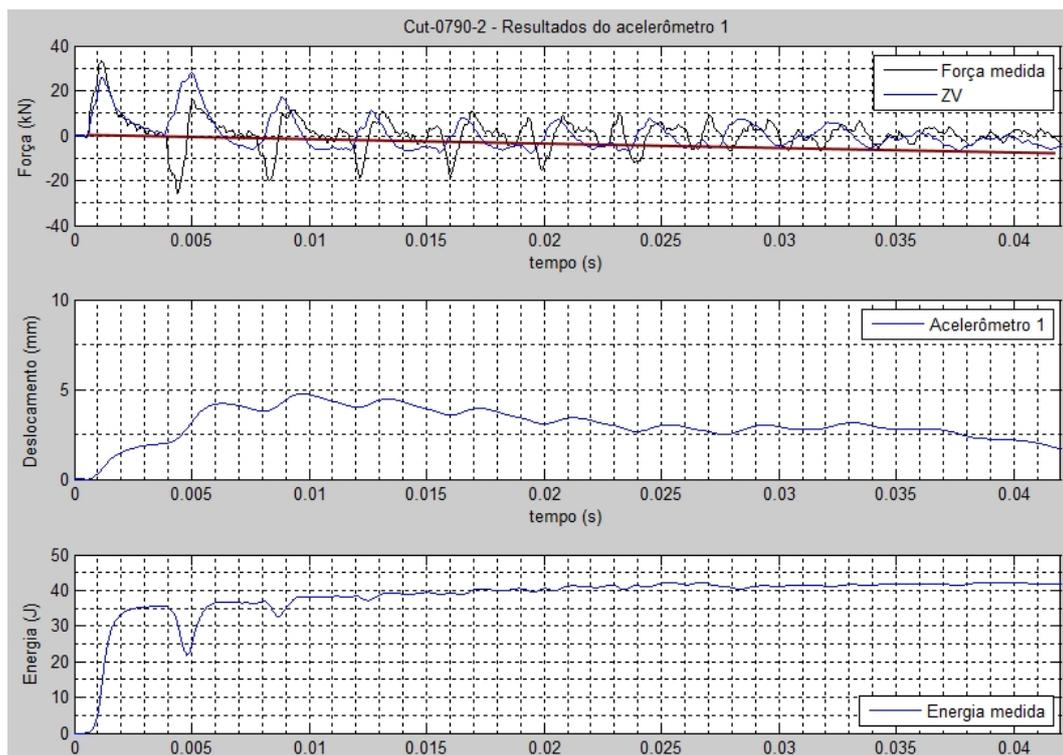
$$EFV(t) = \int_0^t F(t) \cdot v(t) dt$$

O método também é utilizado para obter o deslocamento em função do tempo  $\rho(t)$ , como:

$$\rho(t) = \int_0^t v(t) dt \quad \text{Eq. (4.3)}$$

Os resultados são então apresentados em uma janela contendo os gráficos de força medida e Z.v em função do tempo, deslocamento em função do tempo e energia em função do tempo, como mostrado na Figura 4.21. Nesta figura é possível observar que a linha de base da força calculada por Z.v encontra-se ligeiramente inclinada. Isso ocorre porque as velocidades também estão com sua linha de base inclinada, ocasionadas por interferências diversas no sinal das acelerações. Conseqüentemente os valores de deslocamento não se estabilizam após atingir seu máximo e a integração aparentemente indica que o deslocamento da ponteira está diminuindo com o tempo, não se estabilizando. Por outro lado, o gráfico da energia parece ser mais estável em torno de um valor máximo.

Figura 4.21 Janela de resultados sem correção de tendência por rotação.



Fonte: captura de tela pelo autor.

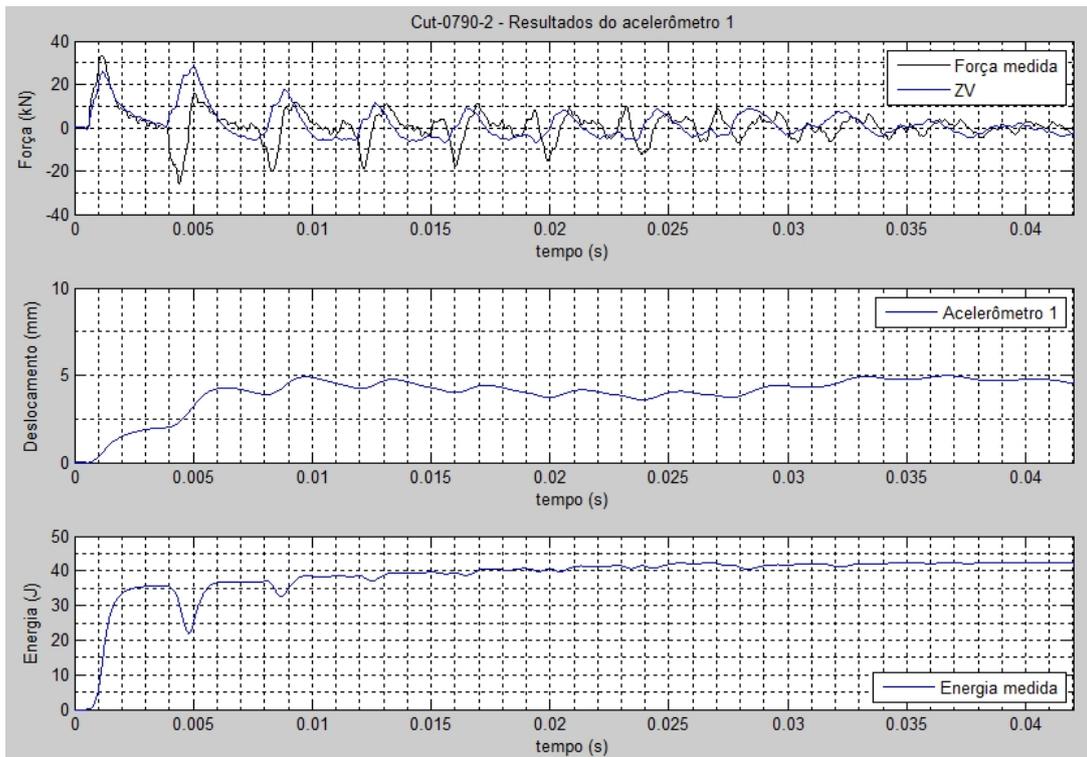
Essa situação pode ser corrigida com uma outra técnica de acerto de baseline, que consiste em calcular a reta de tendência da linha de base das velocidades e subtraí-la, rebatendo as velocidades para cima.

Como pode ser visto na Figura 4.22, a linha de base de Z.v não possui mais a inclinação indesejada, o que implica que no final do golpe a velocidade da ponteira é nula. O deslocamento também se encontra estabilizado em torno de 4,8 mm (o medido para o golpe foi de 5 mm). A coincidência de F medido com Z.v na primeira onda melhorou e, finalmente a energia calculada se estabilizou em torno de 42 J. O golpe pode ser considerado válido.

Por fim, é exibido um menu no qual o usuário escolhe se quer ou não exportar os dados e resultados para um conjunto de Planilhas do MS Excel. Aqui novamente foi adotada uma estratégia baseada no nome do arquivo de entrada de dados. Golpes executados a uma mesma profundidade possuem arquivo de entrada com o nome começando por "Cut-XXXX", portanto todos são agrupados em um mesmo arquivo do MS Excel com este nome, o que racionaliza o número de planilhas de exportação e facilita a localização e a manipulação de dados específicos.

Neste arquivo, os resultados de cada golpe serão exportados para uma aba específica cujo nome é "Golpe\_Y", onde Y é obtido a partir do nome do arquivo de entrada, Figura 4.23. Para cada golpe processado, é gerada uma linha de resultados na aba "Resumo", Figura 4.24, e outra na aba "Case", Figura 4.25.

Figura 4.22 Resultados corrigidos com rebatimento da velocidade.



Fonte: captura de tela pelo autor.

Figura 4.23 Planilha de saída de exportação dos dados de um golpe instrumentado.

Tempo (s)	Força (kN)	Acel 1 (m/s <sup>2</sup> )	Acel 2 (m/s <sup>2</sup> )	Acel M (m/s <sup>2</sup> )	Vel 1 (m/s)	Vel 2 (m/s)	Vel M (m/s)	Desl 1 (mm)	Desl 2 (mm)	Desl M (mm)	F Calc 1 (kN)	F Calc 2 (kN)	F Calc M (kN)	Energ 1 (J)	Energ 2 (J)	Energ M (J)
0	-0,02229	-0,19759	-0,75786	-0,47773	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,04E-05	-0,00505	-0,44559	-0,37178	-0,40869	2,46E-05	8,41E-06	1,65E-05	1,28E-07	1,28E-07	1,28E-07	0,000381	0,00013	0,000256	-6,5E-10	-2,2E-10	-4,3E-10
2,08E-05	-0,01438	-0,36292	-0,17547	-0,2692	4,84E-05	1,99E-05	3,41E-05	5,08E-07	5,08E-07	5,08E-07	0,00075	0,000308	0,000529	-4,9E-09	-1,9E-09	-3,4E-09
3,13E-05	-0,01795	-0,04548	-0,08713	-0,06631	7,42E-05	3,28E-05	5,35E-05	1,15E-06	1,15E-06	1,15E-06	0,00115	0,000508	0,000829	-1,5E-08	-6,5E-09	-1,1E-08
4,17E-05	-0,05384	0,0934	0,12227	0,107835	0,000102	4,73E-05	7,48E-05	2,07E-06	2,07E-06	2,07E-06	0,001587	0,000732	0,00116	-5,1E-08	-2,3E-08	-3,7E-08
5,21E-05	-0,03802	0,07687	0,33494	0,205905	0,000131	6,39E-05	9,76E-05	3,28E-06	3,28E-06	3,28E-06	0,002034	0,000991	0,001513	-1,1E-07	-4,9E-08	-7,7E-08
6,25E-05	0,02132	-0,09839	0,65558	0,278595	0,000159	8,34E-05	0,000121	4,8E-06	4,8E-06	4,8E-06	0,002466	0,001292	0,001879	-1,1E-07	-5,2E-08	-8,3E-08
7,29E-05	0,00136	-0,11823	0,80282	0,342295	0,000186	0,000105	0,000146	6,59E-06	6,59E-06	6,59E-06	0,002882	0,001632	0,002257	-9,5E-08	-4,2E-08	-6,9E-08
8,33E-05	-0,07494	0,09009	0,52471	0,3074	0,000214	0,000126	0,00017	8,67E-06	8,67E-06	8,67E-06	0,003313	0,00196	0,002637	-1,8E-07	-9,1E-08	-1,3E-07
9,38E-05	-0,07701	0,29511	0,13208	0,213595	0,000244	0,000144	0,000194	1,11E-05	1,11E-05	1,11E-05	0,003778	0,002235	0,003006	-3,6E-07	-2E-07	-2,8E-07
0,000104	-0,00288	0,51665	-0,02169	0,24748	0,000276	0,000159	0,000217	1,38E-05	1,38E-05	1,38E-05	0,004276	0,002465	0,003371	-4,6E-07	-2,6E-07	-3,6E-07
0,000115	0,0266	0,48028	0,25314	0,36671	0,000309	0,000175	0,000242	1,68E-05	1,68E-05	1,68E-05	0,00479	0,002706	0,003748	-4,2E-07	-2,4E-07	-3,3E-07
0,000125	-0,02408	0,44391	0,36111	0,40251	0,000342	0,000192	0,000267	2,02E-05	2,02E-05	2,02E-05	0,005298	0,002977	0,004138	-4,2E-07	-2,4E-07	-3,3E-07
0,000135	-0,06175	0,53319	0,10264	0,317915	0,000375	0,000209	0,000292	2,39E-05	2,39E-05	2,39E-05	0,005811	0,003236	0,004523	-5,9E-07	-3,3E-07	-4,6E-07
0,000146	-0,01852	0,2422	-0,10676	0,06772	0,000407	0,000223	0,000315	2,8E-05	2,8E-05	2,8E-05	0,006307	0,003457	0,004882	-7,4E-07	-4,2E-07	-5,8E-07
0,000156	0,00851	-0,10169	-0,36197	-0,23183	0,000436	0,000235	0,000335	3,24E-05	3,24E-05	3,24E-05	0,006751	0,003641	0,005196	-7,6E-07	-4,3E-07	-6E-07
0,000167	0,00898	-0,105	-0,35542	-0,23021	0,000462	0,000245	0,000354	3,71E-05	3,71E-05	3,71E-05	0,007168	0,003804	0,005486	-7,2E-07	-4,1E-07	-5,6E-07
0,000177	-0,01117	0,05703	-0,29653	-0,11975	0,00049	0,000256	0,000373	4,2E-05	4,2E-05	4,2E-05	0,007598	0,003973	0,005785	-7,3E-07	-4,1E-07	-5,7E-07
0,000188	-0,01758	0,17276	-0,43068	-0,12896	0,000519	0,000267	0,000393	4,73E-05	4,73E-05	4,73E-05	0,008049	0,004136	0,006093	-8,1E-07	-4,5E-07	-6,3E-07
0,000198	-0,04678	0,08017	-0,29326	-0,10655	0,000549	0,000277	0,000413	5,29E-05	5,29E-05	5,29E-05	0,008503	0,004299	0,006401	-9,9E-07	-5,4E-07	-7,6E-07
0,000208	-0,07136	0,06364	-0,1951	-0,06573	0,000577	0,000289	0,000433	5,87E-05	5,87E-05	5,87E-05	0,008948	0,004481	0,006715	-1,3E-06	-7,2E-07	-1E-06
0,000219	-0,04028	0,0438	-0,28672	-0,12146	0,000606	0,000301	0,000453	6,49E-05	6,49E-05	6,49E-05	0,00939	0,004664	0,007027	-1,7E-06	-8,9E-07	-1,3E-06
0,000229	-0,01993	-0,11823	-0,21473	-0,16648	0,000633	0,000313	0,000473	7,13E-05	7,13E-05	7,13E-05	0,009818	0,004845	0,007331	-1,9E-06	-9,8E-07	-1,4E-06
0,00024	-0,02964	-0,12153	-0,0904	-0,10597	0,00066	0,000325	0,000493	7,81E-05	7,81E-05	7,81E-05	0,010232	0,005042	0,007637	-2E-06	-1,1E-06	-1,6E-06
0,00025	-0,0318	-0,09508	0,0143	-0,04039	0,000687	0,000339	0,000513	8,51E-05	8,51E-05	8,51E-05	0,010648	0,005257	0,007953	-2,3E-06	-1,2E-06	-1,7E-06
0,00026	-0,01042	-0,14799	0,24333	0,04767	0,000714	0,000355	0,000534	9,24E-05	9,24E-05	9,24E-05	0,011061	0,0055	0,008281	-2,4E-06	-1,2E-06	-1,8E-06
0,000271	0,00333	-0,30009	0,23024	-0,03493	0,000739	0,000372	0,000555	9,99E-05	9,99E-05	9,99E-05	0,011459	0,005759	0,008609	-2,4E-06	-1,3E-06	-1,8E-06

Fonte: captura de tela pelo autor.

Figura 4.24 - Aba de exportação de resumo do golpe.

Prof	Golpe	Forca max	Desloc	E sist	E max 1	E max 2	E max M	Efic 1	Efic 2	Efic M	Fd 1	Fd 2	Fd 3
(m)	n	(kN)	(mm)	(J)	(J)	(J)	(J)	(%)	(%)	(%)	(kN)	(kN)	(kN)
11,9	1	27,04455	4	51,3581	35,59594	34,9579	35,27692	69,30928	68,06696	68,68812	8,898984	8,739476	8,81923
11,9	2	32,65214	4	51,3581	43,39264	43,33304	43,36284	84,49034	84,3743	84,43232	10,84816	10,83326	10,84071
11,9	3	32,91649	3	50,84852	42,24844	43,93704	43,09274	83,08687	86,40771	84,74729	14,08281	14,64568	14,36425
11,9	4	33,19318	3	50,84852	44,5901	45,20774	44,89424	87,69202	88,9067	88,29016	14,86337	15,06925	14,96475

Fonte: captura de tela pelo autor.

Figura 4.25 - Aba de exportação dos resultados do método CASE.

Prof	Golpe	l	t	F(t)	ZV(t)_1	ZV(t)_2	ZV(t)_3	t+dt	F(t+dt)	ZV(t+dt)_1	ZV(t+dt)_2	ZV(t+dt)_3	Rd_1	Rd_2	Rd_3
(m)	n	(m)	(s)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(s)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
11,9	1	12,265	0,00126	27,04455	25,70509	25,89385	25,79947	0,006135	-21,784	18,47747	18,87283	18,67515	9,857903	9,651287	9,754595
11,9	2	12,265	0,001177	32,65214	25,62863	26,52536	26,07699	0,006052	-23,3035	14,91895	15,48565	15,2023	15,384	15,71403	15,54901
11,9	3	12,265	0,001135	32,91649	25,55258	26,41342	25,983	0,00601	-24,1081	14,52176	14,68153	14,60164	15,43503	16,1361	15,78557
11,9	4	12,265	0,001198	33,19318	25,68779	26,57925	26,13352	0,006073	-23,2087	14,60749	14,94456	14,77603	16,07252	16,62691	16,34971

Fonte: captura de tela pelo autor.

Para os resultados exportados na aba "Resumo" o programa calcula a energia potencial do sistema  $EP_s$ , conforme proposto por Odebrecht (2003) na Eq. (3.44), obtém os máximos de energia transferida às hastes (EFV), a eficiência do sistema  $\eta = EFV/EP_s \cdot 100$  e a força dinâmica do golpe  $Fd = EFV/\rho$ .

Para os resultados exportados na aba "CASE", o programa obtém os parâmetros necessários para o cálculo da força dinâmica através da fórmula expedita de CASE, Eq. (3.40), com o instante  $t^*$  escolhido como o tempo do primeiro máximo de velocidade, o que acarreta diretamente em ser o tempo em que ocorre o primeiro máximo de Z.v. Devido ao fato do solo ensaiado ser um solo poroso e não saturado, onde não ocorrem efeitos de damping, não foram utilizadas correções para a determinação do instante  $t^*$ .

Na aba referente ao golpe, encontram-se relacionados os sinais de força e aceleração lidos, as velocidades calculadas, os deslocamentos calculados, as forças calculadas por Z.v, e a energia calculada por EFV.

Após a exportação, o usuário informa se deseja ou não processar outro arquivo.

#### 4.7 VERIFICAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO DINÂMICA.

Para verificar a instrumentação, foi realizado um teste do equipamento no vão de uma escada que liga os dois subsolos do prédio do Departamento de Geotecnia, onde existe um desnível que permitiu um ensaio com uma composição do DPL formada pela cabeça de bater e a haste guia, Figura 4.26(a), 3 hastes normais compondo um sistema com 3,0 m, Figura 4.26(b), e pela ponteira com ângulo de ápice de 60°, Figura 4.26(c).

Figura 4.26 Teste da instrumentação em laboratório.



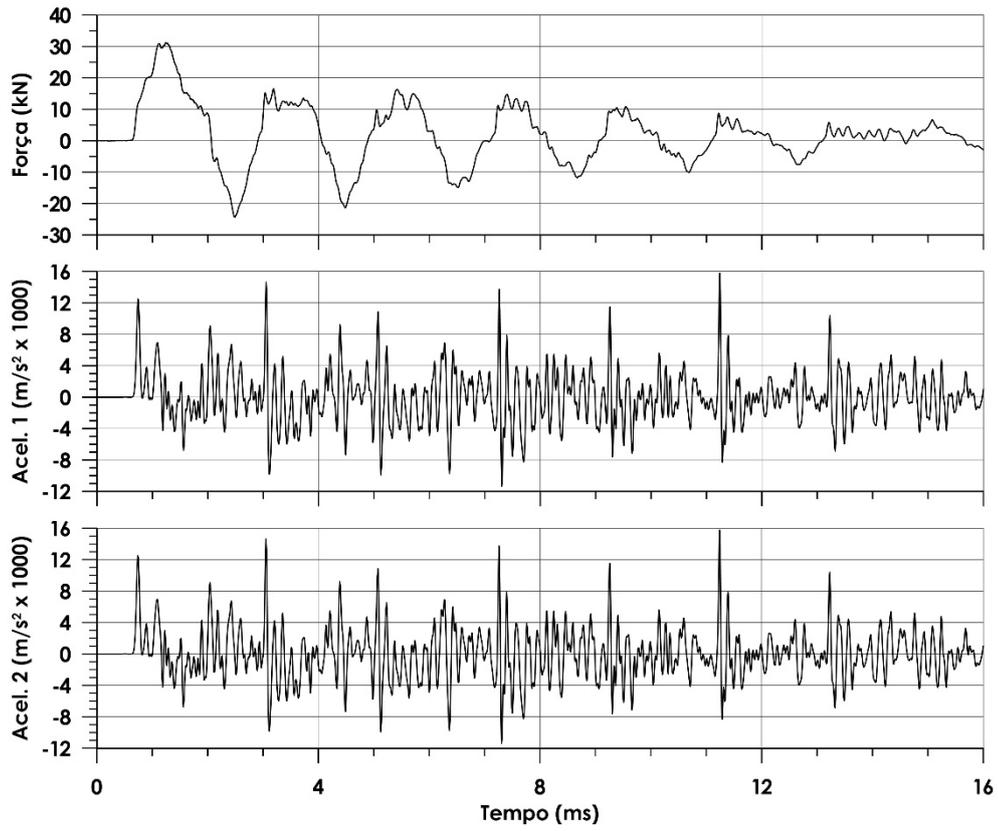
Fonte: arquivos pessoais do autor.

A ponteira do DPL foi apoiada numa amostra de solo da região foi compactada em um molde CBR, de forma a simular a penetração neste solo. Os acelerômetros foram colocados nos suportes, e todo o equipamento ligado.

A haste guia foi devidamente lubrificada com graxa, e a verticalidade do equipamento foi acertada com o auxílio de um nível de bolha comum. Foram dados 3 golpes, com o martelo caindo de uma altura de 0,5 m, conforme o procedimento normal do DPL. Para cada golpe, foram gravados os dados de força registrados pela célula de carga acoplada ao canal 1 do sistema HBM, e dos acelerômetros acoplados aos canais 2 e 3. Os dados brutos registrados pelo software catman®Easy/AP durante os três golpes podem ser observados nas Figura 4.27, Figura 4.28 e Figura 4.29 abaixo.

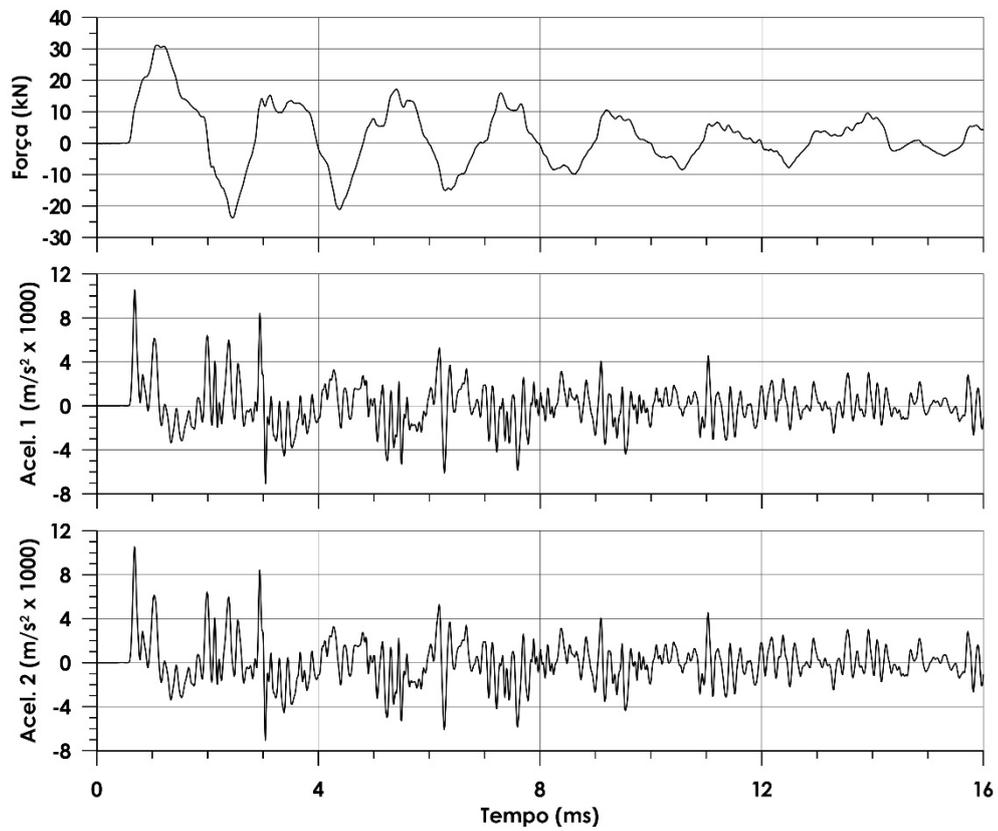
Nos três golpes registrados, é possível observar que a maior força registrada foi da ordem de 31 kN, dentro da faixa de calibração da célula de carga. O maior pico de aceleração registrado, foi da ordem de 15.800 m/s<sup>2</sup> durante o primeiro golpe, o que corresponde a 32% da capacidade máxima de registro dos acelerômetros utilizados.

Figura 4.27 Sinais lidos no primeiro golpe instrumentado.



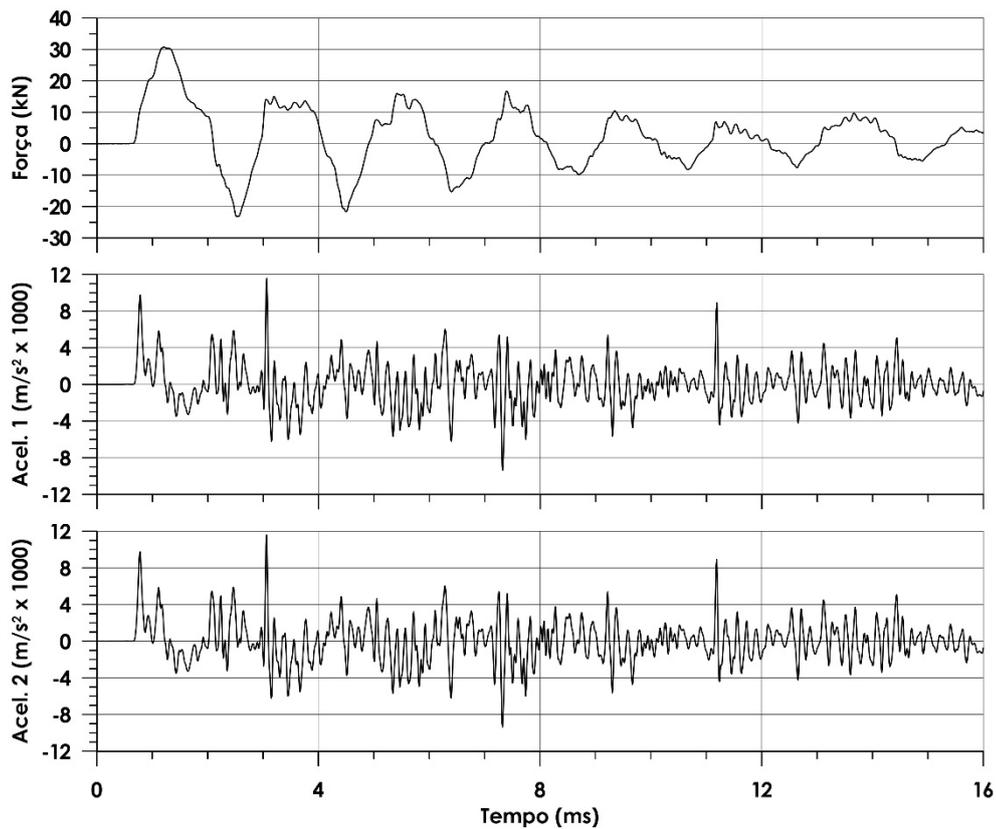
Fonte: o autor.

Figura 4.28 Sinais lidos no segundo golpe instrumentado.



Fonte: o autor.

Figura 4.29 Sinais lidos no terceiro golpe instrumentado.

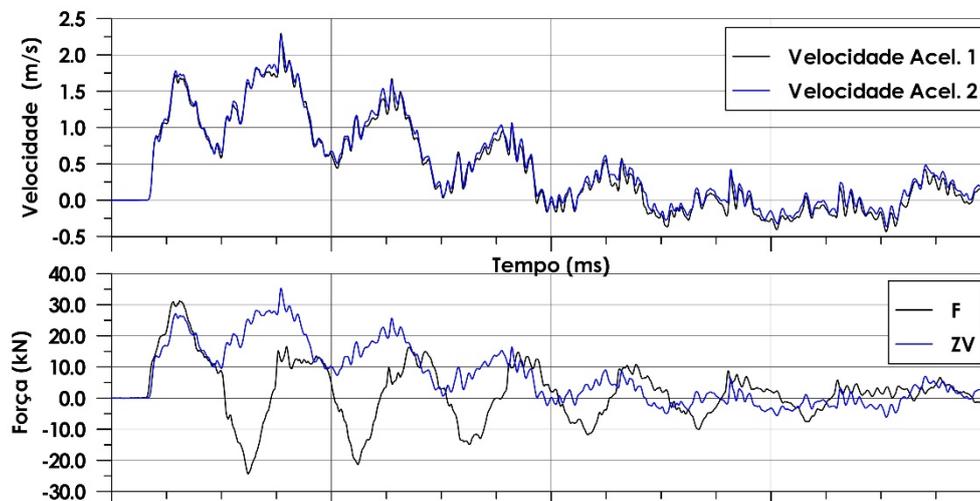


Fonte: o autor.

Nos gráficos da Figura 4.30, Figura 4.31 e Figura 4.32 pode-se ver os resultados as integrações das acelerações em função do tempo, de forma a obter as velocidades relativas aos sinais dos acelerômetros 1 e 2, bem como a força calculada utilizando a média das velocidades obtidas.

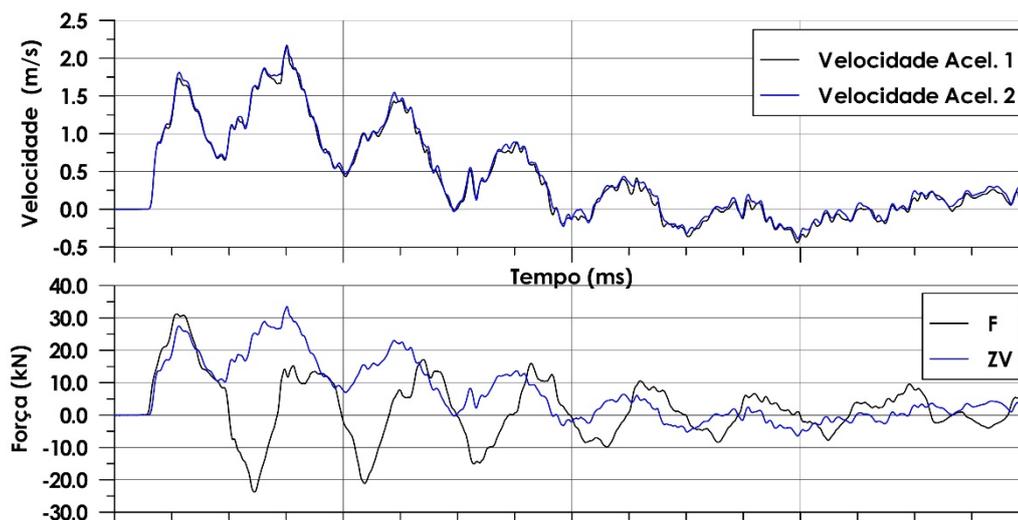
Os gráficos apresentados mostram a repetibilidade dos sinais, conforme as orientações da norma americana ASTM D4633-10:2010.

Figura 4.30 Resultados do processamento dos sinais do primeiro golpe.



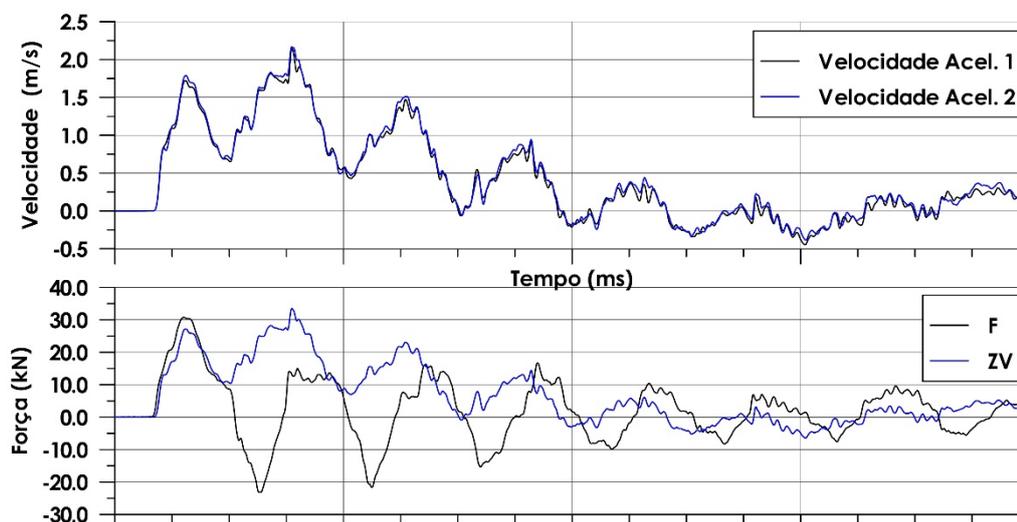
Fonte: o autor.

Figura 4.31 Resultados do processamento dos sinais do segundo golpe



Fonte: o autor.

Figura 4.32 Resultados do processamento dos sinais do terceiro golpe



Fonte: o autor.

## 4.8 PROPOSTA DE NOVA INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO DE TORQUE.

A medida do torque no DPL modificado por Nilsson é de fato necessária à determinação do atrito lateral na ponteira. Entretanto, as Eq. (2.18) e Eq. (2.19) são simplificações que não consideram de forma racional o atrito existente entre o solo e a parte cônica da ponteira quando esta é rotacionada.

Esse atrito não pode ser desprezado e por isso foi desenvolvida uma nova formulação para quantificar o atrito da ponteira do DPL.

### 4.8.1 NOVA EQUAÇÃO PARA O ATRITO LATERAL A PARTIR DO TORQUE.

Considerando as contribuições específicas da parte cilíndrica e da parte cônica da ponteira para o torque medido  $T$ , este pode ser melhor formulado pela Eq. (4.4)

$$T = T_{cil} + T_{cone} \quad \text{Eq. (4.4)}$$

onde  $T_{cil}$  é a contribuição de torque devido à parte cilíndrica da ponteira e  $T_{cone}$  é a contribuição de torque devido à parte cônica da ponteira.

De acordo com Schnaid e Odebrecht (2012), a parcela do torque mobilizado em uma superfície vertical cilíndrica, supondo uma distribuição uniforme de tensões é dada por:

$$T_{cil} = \pi \cdot D_{cil} \cdot h_{cil} \cdot f_s \cdot \frac{D_{cil}}{2} \quad \text{Eq. (4.5)}$$

onde  $D_{cil}$  é o diâmetro do cilindro,  $h_{cil}$  é sua altura e  $f_s$  a tensão cisalhante à qual a superfície cilíndrica está submetida. Considerando que  $\pi \cdot D_{cil} \cdot h_{cil}$  corresponde à área lateral do cilindro  $A_{cil}$ ,  $D_{cil}/2$  corresponde ao raio  $r_0$  do cilindro, a Eq. (4.5) pode ser reescrita como:

$$T_{cil} = A_{cil} \cdot f_s \cdot r_0 \quad \text{Eq. (4.6)}$$

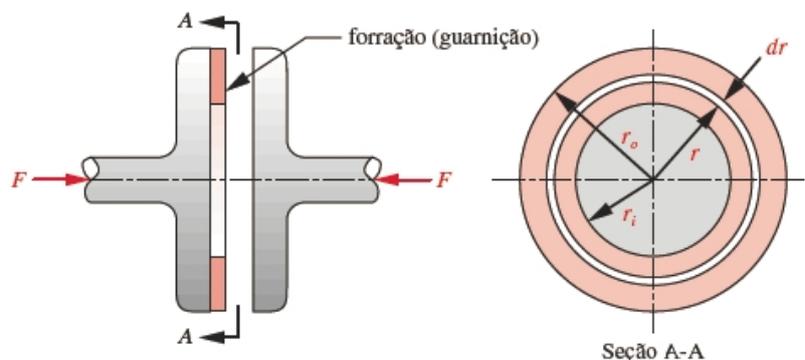
A solução para a contribuição de torque devido à parte cônica da ponteira do DPL vem do estudo de embreagens planas e cônicas da engenharia mecânica. Na Figura 4.33 vemos um modelo de embreagem de disco, plana, com um material de forração entre ambos que ao ser pressionado axialmente por uma força  $F_{ax}$ , irá gerar um atrito capaz de produzir um torque no sistema (NORTON, 2013).

Supondo que a aplicação de  $F_{ax}$  gere uma pressão  $p$  uniforme sobre a superfície da forração, em um anel de área elementar  $2\pi \cdot r \cdot dr$  a força  $dF_{ax}$  pode ser calculada como:

$$dF_{ax} = p \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr \quad \text{Eq. (4.7)}$$

onde  $r$  é o raio do anel elementar submetido à pressão uniforme  $p$ .

Figura 4.33 Modelo de embreagem plana.



Fonte: Norton (2013).

Por sua vez, a força axial  $F_{ax}$  pode ser determinada pela seguinte integração:

$$F_{ax} = \int_{r_i}^{r_o} p \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr = \pi \cdot p \cdot (r_o^2 - r_i^2) \quad \text{Eq. (4.8)}$$

onde  $r_i$  é o raio interno do anel de forração, e  $r_o$  é o raio externo deste mesmo anel. Por sua vez, a contribuição de torque  $dT$  de cada anel elementar é dada por:

$$dT = p \cdot 2\pi \cdot \mu \cdot r^2 \cdot dr \quad \text{Eq. (4.9)}$$

onde  $\mu$  é o coeficiente de atrito entre a superfície metálica da embreagem e a forração. Assim, o torque total  $T$  do anel de embreagem é dado por:

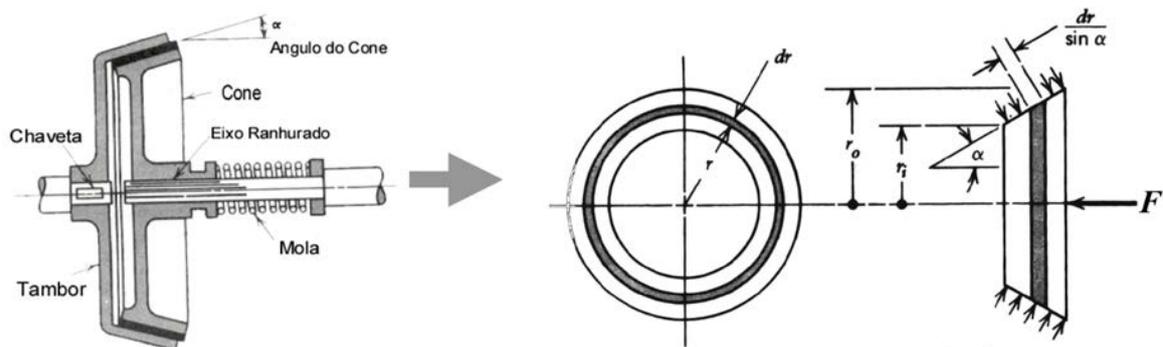
$$T' = \int_{r_i}^{r_o} p \cdot 2\pi \cdot \mu \cdot r^2 \cdot dr = \frac{p \cdot 2\pi \cdot \mu}{3} (r_o^3 - r_i^3) \quad \text{Eq. (4.10)}$$

Isolando a pressão  $p$  na Eq. (4.8), e fazendo a devida substituição na Eq. (4.10), obtemos:

$$T' = \frac{2 \cdot F_{ax} \cdot \mu \cdot (r_o^3 - r_i^3)}{3 \cdot (r_o^2 - r_i^2)} \quad \text{Eq. (4.11)}$$

Santos Jr (2014) apresenta uma formulação para o torque de embreagens cônicas como a mostrada na Figura 4.34. Tais embreagens, apesar do nome, são geometricamente são troncos de cones, com uma base maior de raio  $r_o$ , uma base menor com um raio interno  $r_i$  e um ângulo de ápice igual a  $2 \cdot \alpha$ .

Figura 4.34 Modelo de embreagem cônica usado para determinar o torque de um cone sendo rotacionado no solo.



Fonte: adaptado de Santos Jr (2014).

A partir dos mesmos procedimentos utilizados para se determinar o torque para embreagens planas a partir da força axial aplicada, Santos Jr determina a área de contato com a forração como tendo a espessura real  $dr/\text{sen}(\alpha)$ , e não mais como  $dr$ . Como o valor do ângulo  $\alpha$  é constante, ao substituirmos  $dr$  por  $dr/\text{sen}(\alpha)$  nas integrais das Eq. (4.7), Eq. (4.8), Eq. (4.9) e Eq. (4.10), os resultados continuam válidos, porém divididos por  $\text{sen}(\alpha)$ , de forma que a Eq. (4.11) pode ser reescrita como:

$$T' = \frac{2 \cdot F_{ax} \cdot \mu \cdot (r_0^3 - r_i^3)}{3 \cdot (r_0^2 - r_i^2) \cdot \text{sen}(\alpha)} \quad \text{Eq. (4.12)}$$

Finalmente, cabe notar que:

- Para um cone  $r_i = 0$ , logo  $(r_0^3 - r_i^3) = r_0^3$  e  $(r_0^2 - r_i^2) = r_0^2$ ;
- A força de atrito  $F_{ax} \cdot \mu$  que age na superfície entre o cone e a forração pode ser reescrita em termos do atrito lateral  $f_s$  e da área lateral do cone  $A_{cone}$ , como  $F_{ax} \cdot \mu = f_s \cdot A_{cone}$ .

Logo, para um cone, a Eq. (4.12) pode ser reescrita como:

$$T_{cone} = T' = \frac{2 \cdot f_s \cdot A_{cone} \cdot r_0}{3 \cdot \text{sen}(\alpha)} \quad \text{Eq. (4.13)}$$

Substituindo as Eq. (4.6) e Eq. (4.13) na Eq. (4.4), obtém-se:

$$f_s = \frac{T}{\left[ \frac{2 \cdot A_{cone}}{3 \cdot \text{sen}(\alpha)} + A_{cil} \right] \cdot r_0} \quad \text{Eq. (4.14)}$$

que vem a ser a equação que relaciona o atrito lateral da ponteira do DPL, ou de um DCP qualquer, com o momento medido ao rotacioná-la no solo.

É de extrema importância notar que a força axial  $F_{ax}$  que age sobre a parte cônica da ponteira, é dada pelo peso próprio do sistema, ou seja, pelo peso somado da ponteira, das hastes, da cabeça de bater, da haste-guia e do martelo, podendo desconsiderar o coxim.

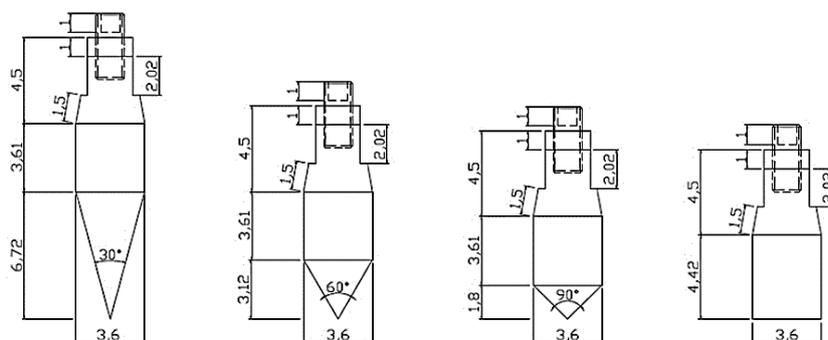
## 5 ENSAIOS COMPLEMENTARES.

O presente estudo teve início com a realização de ensaios laboratoriais e de campo com algumas ponteiros desenvolvidas especificamente para o DPL (Nilsson, 2001). A finalidade era avaliar a influência da geometria de ponta do cone na resistência à penetração e no atrito mobilizado.

Estas investigações são justificadas pelo fato de existirem ponteiros com ângulos de ápice distintos para o DPL. As normas DIN 4094:1990 e ISO 22476-2:2005 preveem uma ponteira com ângulo de ápice de 90°, o mesmo ângulo da ponteira que acompanha o DPL modificado por Nilsson em 2001. No entanto existem equipamentos DPL em uso, baseados na norma alemã DIN 4094:1964 que fazem uso de ponteiros com ângulo de ápice de 60° (ALVES FILHO, 2010), o mesmo das ponteiros cônicas usadas nos ensaios CPT.

Foram fabricadas três ponteiros utilizando o mesmo aço das hastes do DPL, cujos desenhos geométricos encontram-se na Figura 5.1, juntamente com o desenho da ponteira de 90°. Estas novas ponteiros possuem ângulos de ápice de 30°, 60° e 180°, isto é, esta última é apenas a parte cilíndrica da ponteira normal. Todas possuem a mesma geométrica da parte cilíndrica e da parte superior onde é rosqueada a haste do DPL.

Figura 5.1 Projeto geométrico das ponteiros do DPL.



Fonte: arquivos pessoais do autor.

As principais características destas ponteiros estão relacionadas na Tabela 5.1 e as mesmas podem ser vistas na Figura 5.2. Outras características físicas e geométricas, em especial da ponteira com ápice de 60°, podem ser encontradas no Anexo II.

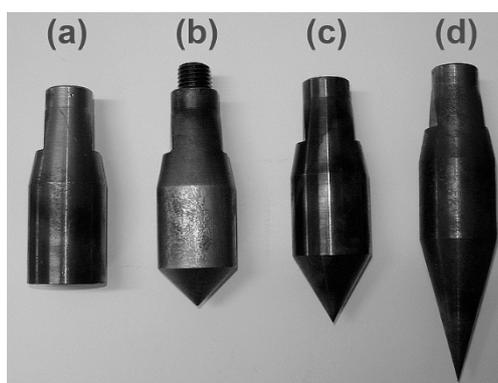
A área projetada da base dos cones de todos os modelos de ponteiros é de 10 cm<sup>2</sup> e a altura da parte cilíndrica é igual ao diâmetro da base do cone, garantindo que todas tenham a mesma área lateral da parte cilíndrica, 40,83 cm<sup>2</sup>. Entretanto, as áreas da parte cônica são diferentes, devido aos ângulos de ápice diferentes.

Tabela 5.1 Características das ponteiras.

	Massa (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Área do Cone (cm <sup>2</sup> )	Área Lateral (cm <sup>2</sup> )
30°	628,9	22,4	38,00	40,83
60°	545,0	10,1	17,64	40,83
90°	555,0	6,0	10,18	40,83
180°	522,6	0,0	0,00	40,83

Fonte: o autor.

Figura 5.2 Ponteiras do DPL com diferentes ângulos de 180° (a), 90° (b), 60° (c) e 30° (d).



Fonte: arquivos pessoais do autor.

## 5.1 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DAS PONTEIRAS EM LABORATÓRIO.

Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG-UNESP), onde foi utilizada uma prensa triaxial com anel de carga de 50 kN.

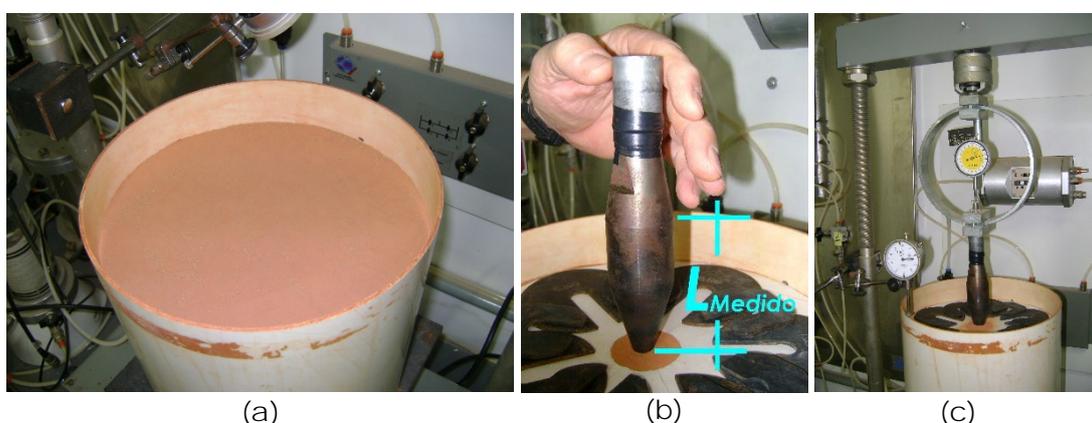
Foi preparada uma amostra de solo de acordo com a NBR 6457:1986. O material da amostra é o mesmo utilizado por Paes Junior (2013), proveniente de uma jazida localizada na Serra da Quebra Cangalha, situada na porção leste/sudeste do estado de São Paulo. Trata-se de um solo residual maduro de biotita-gnaiss, de coloração avermelhada, classificado como um silte de baixa plasticidade pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (PAES JUNIOR, 2013)

Após ter sido preparada de acordo com a norma e estando na condição de umidade higroscópica, esta amostra de solo foi depositada em um recipiente cilíndrico de PVC, com diâmetro interno de 24,5 cm e altura de 25,14 cm, fechado por uma tampa de PVC na parte inferior. A montagem da amostra de solo no cilindro de PVC foi feita lançando o solo, em sete camadas de 3,0 cm de espessura, cada uma delas com massa de 2235 g e compactada através de quedas sucessivas de um soquete de madeira com massa de 140 g, caindo de uma altura aproximada de 1,0 cm, até completar uma altura de 21,0 cm de solo no interior do cilindro, Figura 5.3(a). Procurou-se garantir que o solo

compactado tivesse o peso específico médio de  $14 \text{ kN/m}^3$ . A caracterização desta amostra de solo encontra-se na Tabela 5.2.

As ponteiros foram fixadas a uma haste metálica de 2 cm, posicionadas e soltas na superfície do solo preparado. Nesse instante, foram medidas as penetrações iniciais devidas ao peso próprio das mesmas, como sendo a distância entre a superfície da amostra de solo e o final da parte cilíndrica, como destacado na Figura 5.3(b). Em seguida, este arranjo foi fixado ao anel de carga da prensa triaxial, Figura 5.3(c). Iniciando o ensaio iniciava com uma velocidade de penetração constante de  $2,5 \text{ mm/min}$ . Durante o ensaio eram registrados o deslocamento vertical e a reação no anel de carga.

Figura 5.3 Ensaio "quasi-estáticos" de penetração das ponteiros em laboratório.



Fonte: arquivos pessoais do autor.

Quando a penetração da ponteira atingia o valor igual ao segmento de haste, o ensaio era interrompido e um novo segmento de haste era adicionado dando continuidade ao ensaio.

Tabela 5.2 Principais características do solo utilizado em laboratório.

	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	e	$\eta$ (%)	S (%)
Solo	45	24	33	14	1,08	50	4

Fonte: o autor.

O ensaio era finalizado quando toda a ponteira se encontrava totalmente cravada no solo preparado.

Foram realizados 2 ensaios com a ponteira de  $180^\circ$ , 2 ensaios com a ponteira de  $90^\circ$ , 2 ensaios com a ponteira de  $60^\circ$  e 3 ensaios com a ponteira de ângulo de ápice de  $30^\circ$ . Foi necessário um terceiro ensaio para a ponteira de  $30^\circ$  para confirmar a penetração da mesma devido ao peso próprio.

Como não havia solo suficiente para a realização de todos os ensaios sem reaproveitamento, o solo do interior do cilindro de PVC era cuidadosamente retirado e passava por todo o processo de preparação já descrito. Durante a retirada do solo do

interior do cilindro de PVC sempre era observada a formação de uma cunha de solo compactado abaixo da ponteira.

## 5.2 TESTE DO DPL EM CAMPO.

Os ensaios "in situ", para comparar o comportamento dinâmico das ponteiras, foram realizados em patamar de um talude localizado na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. No local existe um muro a aproximadamente 5 m da beira da crista deste talude.

Foram realizadas duas baterias de testes, a primeira visando compreender o comportamento dinâmico em si, e a segunda bateria visando compreender o efeito do peso do equipamento nas medidas de torque do DPL.

### 5.2.1 ENSAIO DE COMPORTAMENTO DINÂMICO DAS PONTEIRAS.

Os ensaios foram realizados em linhas paralelas ao muro, com os furos distanciados de 1,5 m entre si, e limitados a 3 m de profundidade. O esquema da localização dos ensaios pode ser visto na Figura 5.4.

Figura 5.4 Local do ensaio "in situ".



Fonte: arquivos pessoais do autor.

Para a determinação da umidade do solo, foi realizado um furo a trado, com 5 cm de diâmetro, que permitiu a coleta de amostras do solo a cada 20 cm, até a profundidade de 1,8 m. Este furo permitiu constatar que até 0,8 m de profundidade, existiam raízes e pedregulhos isolados, que poderiam interferir no experimento. Abaixo de 1,2 m de profundidade, aparecia um colúvio maduro de coloração amarelada, típico da região.

Para cada ensaio, um pré-furo foi executado com um trado de 5 cm de diâmetro, Figura 5.5(a), até uma profundidade suficiente para o posicionamento da ponteira já conectada à primeira haste. Isso permitia a fixação e nivelamento de uma plataforma circular metálica na superfície do terreno, que era utilizada como referencial

para a contagem do número de golpes necessários para a penetração de 10 cm da ponteira no solo  $N_{10}$  e a penetração de certos golpes. A referência inicial era o friso ente a ponteira e a primeira haste que deveriam estar alinhados com a superfície superior da plataforma, Figura 5.5(b).

Figura 5.5 Procedimentos iniciais do ensaio.



(a)

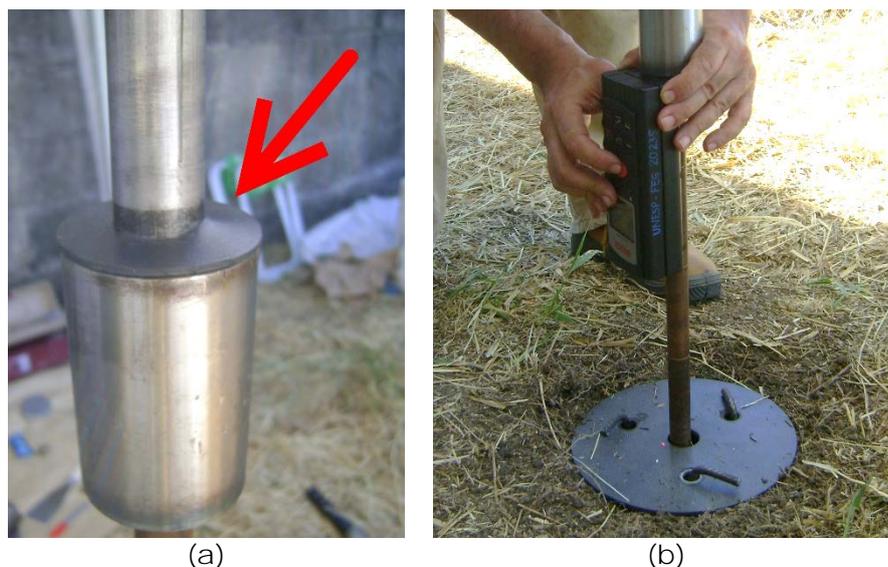
(b)

Os coxins utilizados nestes ensaios eram recortados de mantas de borracha natural vulcanizada, com 3 mm de espessura, Figura 5.6(a) que precisaram ser trocados ao final de cada ensaio, pois ao sofrer os impactos do martelo, eram gradativamente esmagados até perderem sua função de amortecedor. Testes anteriores mostraram que os coxins de madeira Pinus quebravam-se com certa facilidade.

Os ensaios foram executados considerando duas sequências de valores  $N_{10}$ . Na primeira sequência, foi contado o número de golpes até a penetração aproximada de 10 cm e registrado seu valor. Na segunda, além do número de golpes, também foram medidos os deslocamentos ( $l_f - l_i$ ) dos últimos golpes para completar os 10 cm. Esta penetração era determinada pela diferença de altura entre o referencial e a cabeça de bater antes ( $l_i$ ) e depois ( $l_f$ ) do golpe, medidos com o auxílio de uma trena à laser, posicionada abaixo da cabeça de bater, Figura 5.6(b).

Após as duas sequências de  $N_{10}$ , totalizando uma penetração de 20 cm, a parte superior formada pela cabeça de bater, martelo, coxim e haste-guia era desrosqueada do sistema, tomando o cuidado para que esta operação não rotacionasse a haste com a ponteira, permitindo que fosse realizado o ensaio de torque.

Figura 5.6 Detalhes do ensaio.



Fonte: arquivos pessoais do autor.

Em seguida, o sistema era remontado e uma nova sequência de duas penetrações de 10 cm eram executadas, repetindo assim o ciclo anterior, até alcançar a profundidade de 3 m, estabelecida como limite. Sempre que necessário, uma nova haste era adicionada ao sistema

Não foi encontrado o nível de água em nenhuma das sondagens executadas, e não chovia na região há mais de 20 dias.

### 5.2.2 ENSAIO DE TORQUE DAS PONTEIRAS.

Os ensaios de torque foram realizados a cada 20 cm de penetração da ponteira no solo, correspondente a duas sequências de  $N_{10}$ , sempre após a retirada do martelo com o conjunto de cabeça de bater e haste-guia, de modo similar ao descrito no item 2.3.2.

O torquímetro que acompanha o DPL (Nilsson, 2001) vem limitado a medidas nominais de 70 N.m e possui resolução de 2 N.m, estando em conformidade com a NBR 6789:2009.

Após ser acoplado no topo da haste através de um soquete apropriado era verificado se o ponteiro estava sobre o zero da escala, Figura 5.7. Sempre que foi necessário, o zero era ajustado no relógio do torquímetro. Como o torquímetro utilizado possuía um ponteiro de arraste para a determinação do torque máximo, este sempre era colocado na posição zero antes do início do ensaio.

Figura 5.7 Torquímetro posicionado para o início das medidas de torque máximo e residual.



Fonte: arquivos pessoais do autor.

Em seguida, o torquímetro era girado lentamente no sentido horário, mesma direção de aperto das conexões das hastes, até que os valores de torque máximo e residual ficassem estabelecidos de forma clara, possibilitando seu registro na planilha de dados.

### 5.2.3 INFLUÊNCIA DO PESO DO EQUIPAMENTO.

No ensaio de torque, o valor medido representa a soma da reação da luva e do cone da ponteira e, essa por sua vez, é influenciada pelo peso do equipamento. Por isso, foi executado um novo ensaio no talude do Campus da FEG para estudar a influência do peso do sistema no valor do torque para diferentes profundidades. Foi realizado um único procedimento de ensaio utilizando a ponteira com ângulo de ápice de  $60^\circ$ , com o DPL posicionado entre as fileiras 1 e 2, e as colunas dos furos de  $30^\circ$  e  $60^\circ$ , mostradas anteriormente na Figura 5.4.

O primeiro ensaio de torque foi executado conforme recomendação de Nilsson (2001) com a retirada do martelo. Após esta primeira medida, o torquímetro foi retirado, permitindo o reposicionamento do martelo sobre o coxim de forma a aumentar a massa do equipamento. O torquímetro foi recolocado no topo da haste-guia e executado o segundo ensaio.

O procedimento foi repetido uma terceira e uma quarta vez, acrescentando a cada repetição uma massa extra de 10 kg fornecida por pesos de halteres colocados sobre o martelo. Assim, para cada profundidade, tem-se medidas do valor de torque para quatro pesos diferentes atuando sobre o cone da ponteira, isso é, de torque máximo e residual para o DPL sem o martelo, com o martelo, com o martelo e mais 10 kg e com o martelo e mais 20 kg. Na Figura 5.8 ilustra a configuração final do equipamento após as últimas medidas de torque.

Figura 5.8 DPL com martelo e massas de halteres sobrepostas.



Fonte: arquivos pessoais do autor.

O procedimento de ensaio descrito acima foi repetido até a profundidade de 5,90 m, com o uso de seis hastes.

### 5.3 RESULTADOS PRELIMINARES.

A campanha de ensaios complementares teve resultado em grandes avanços para este trabalho. Permitiu compreender melhor o comportamento de diferentes ponteiros para o DPL e determinar a importância do atrito lateral residual para o presente estudo.

#### 5.3.1 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE PONTA.

Ao serem soltas, como mostrado na Figura 5.3(b), as ponteiros apresentam uma cravação inicial no solo contido no cilindro de PVC devido ao peso próprio. Assim, no início da aplicação da força pela prensa Triaxial, os ápices dos cones encontravam-se em profundidades diferentes. Na Tabela 5.3 encontram-se relacionadas as alturas da parte cônica  $L_{Cone}$  e cilíndrica  $L_{Cil}$  de cada ponteiro, o comprimento da ponteiro medido fora do solo  $L_{Med}$  conforme mostrado na Figura 5.3(b), e o comprimento cravado  $L_{Crav}$  calculado como  $L_{Crav} = L_{Cone} + L_{Cil} - L_{Med}$ . Observa-se que quanto menor o ângulo de ápice da ponteiro, mais profundo a mesma penetra, até encontrar um equilíbrio entre a resistência oferecida pelo solo e o seu peso próprio.

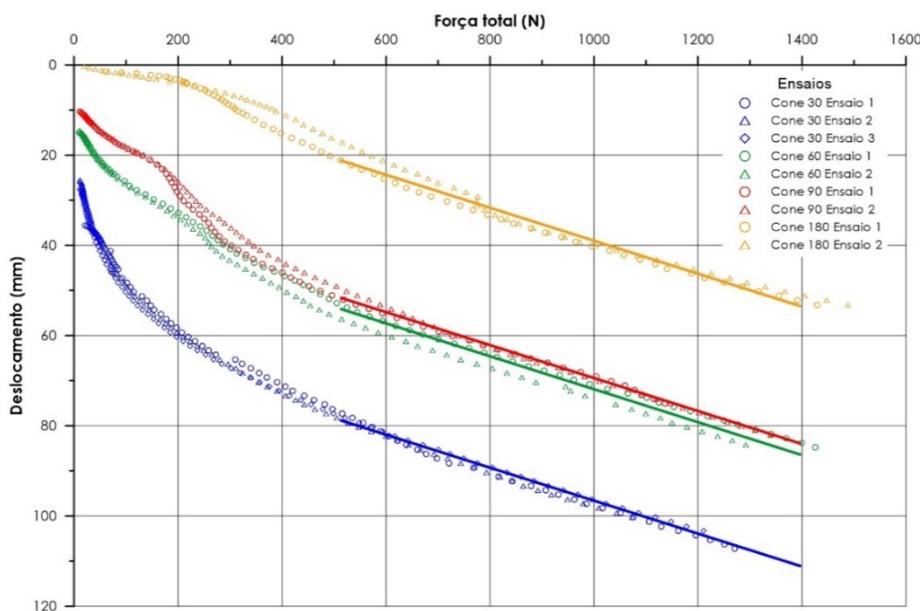
Tabela 5.3 Cravação inicial das ponteiros nos ensaios, devido ao peso próprio.

Cone	Ensaio	L <sub>Cone</sub> (mm)	L <sub>Cil</sub> (mm)	L <sub>Med</sub> (mm)	L <sub>Crav</sub> (mm)
30°	1	67,2	36,1	68,0	35,3
	2			78,0	25,3
	3			76,0	27,3
60°	1	31,2	36,1	52,5	14,8
	2			53,0	14,3
90°	1	18,0	36,1	44,0	10,1
	2			44,0	10,1
180°	1	0,0	44,2	43,0	1,2
	2			44,0	0,2

Fonte: o autor.

No gráfico da Figura 5.9 estão plotados os resultados experimentais dos ensaios de penetração realizados no laboratório para as quatro ponteiros testadas. As curvas iniciam-se em profundidades diferentes devido a cravação pelo peso próprio.

Figura 5.9 Deslocamento das ponteiros em função da força em ensaio "quasi-estático".



Fonte: o autor.

Os comportamentos das ponteiros com ângulos de ápice de 60° e 90° são semelhantes e praticamente se sobrepõem em alguns ensaios, exceto para a fase inicial de aplicação de força, quando esta é inferior a 300 N. Esta semelhança permite assumir que podemos usar a ponteira com ápice de 60° no lugar da ponteira com ápice de 90° nos ensaios do DPL, e desta forma manter uma geometria de ponta igual às das ponteiros do CPT.

A ponteira com ângulo de ápice de 30° exigiu menor aumento de força para maior incremento de penetração da parte cônica, enquanto a ponteira de 180° foi a que

exigiu maior incremento de força para a penetração inicial. Este ganho de resistência pode ser associado à formação de uma cunha de solo compactado abaixo da ponteira.

Observa-se que após a penetração das partes cônicas das ponteiras no solo, o incremento de força dá-se unicamente pelo aumento do atrito lateral da parte cilíndrica destas na medida em que maior superfície lateral é empurrada para dentro da amostra de solo. A contribuição da parte cônica torna-se constante e equivale à resistência de ponta oferecida pelo solo à ponteira. Essa constatação é caracterizada pela taxa de incremento de carga em função do deslocamento ser semelhante para as quatro ponteiras, fato que pode ser notado pelo aparente paralelismo entre as curvas que ocorre a partir da aplicação de uma força de 500 N, como pode ser evidenciado no gráfico da Figura 5.9.

Após a realização dos ensaios sempre foi verificada a formação de uma cunha de solo compactada (cunha ativa) em contato com a ponteira, independente do ângulo de ápice desta. Observou-se que as cunhas formadas abaixo da ponteira de 180° eram um pouco maiores e mais densificadas, Figura 5.10, enquanto que as formadas abaixo da ponteira de 30° eram pouco espessas e mais friáveis, e rompiam nas tentativas de retirada. As cunhas formadas abaixo das ponteiras com ângulos de ápice de 60°, 90° e 180° podiam ser retiradas e manipuladas.

*Figura 5.10* Cunha de solo compactado formada abaixo da ponteira com ângulo de ápice de 180°.



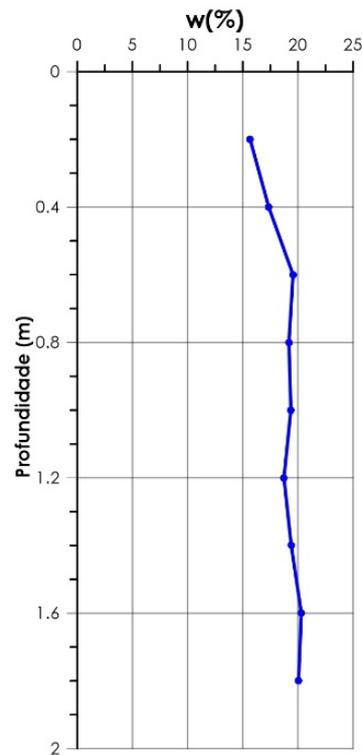
*Fonte: arquivos pessoais do autor.*

### **5.3.2 REGISTRO E INTERPRETAÇÃO DO DPL.**

Para as análises a seguir, deve ser considerado o fato de que até a profundidade aproximada de 80 cm existiam raízes e pedregulhos isolados, que podem influenciar as medições e conseqüentemente dificultar a análise dos resultados, bem como o fato de que os valores de umidade do solo permanecem constantes em torno de 20% a partir de 60 cm de profundidade, Figura 5.11. Menores valores de umidade são encontrados no solo

mais superficial, o que pode ser explicado por ressecamento e retirada de água por parte da vegetação.

Figura 5.11 Umidade do solo em função da profundidade.



Fonte: o autor.

Assim serão considerados principalmente os dados de penetração abaixo de 80 cm profundidade

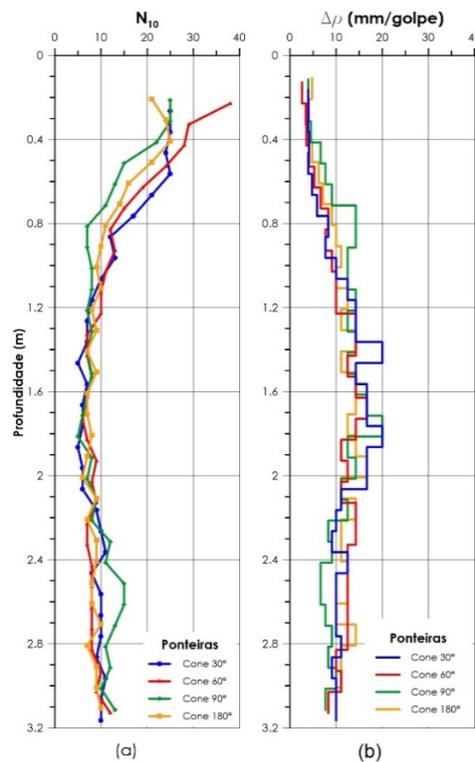
### 5.3.2.1 INDICE $N_{10}$ .

No gráfico da Figura 5.12(a) é possível observar que não existem diferenças significativas com relação ao  $N_{10}$  para as diferentes ponteiros, principalmente abaixo da profundidade de 80 cm. De forma similar, no gráfico da Figura 5.12(b) é possível observar que principalmente abaixo a profundidade de 1,00 m, os valores da penetração média por golpe a cada 10 cm ( $\Delta\rho$ ) são muito parecidos para as diferentes ponteiros.

As áreas projetadas das ponteiros são iguais, portanto é pertinente supor que a resistência de ponta será a mesma para todas. As áreas laterais das partes cilíndricas das ponteiros também são iguais, assim pode-se supor que as ponteiros tenham também a mesma resistência lateral na área cilíndrica quando cravadas dinamicamente.

A ponteira de 180° apesar de não possuir um cone metálico real em sua parte inferior, forma uma cunha de solo abaixo de sua base, o que explica que esta ponteira tenha basicamente a mesma resistência à penetração que as demais.

Figura 5.12  $N_{10}$  e penetração por golpe nos ensaios da linha 3.



Fonte: o autor.

Observa-se também que nas camadas mais superficiais do subsolo, o comportamento de  $N_{10}$  é basicamente o mesmo e as discrepâncias encontradas podem ser explicadas justamente pela heterogeneidade existente.

### 5.3.2.2 TORQUE MÁXIMO E TORQUE RESIDUAL.

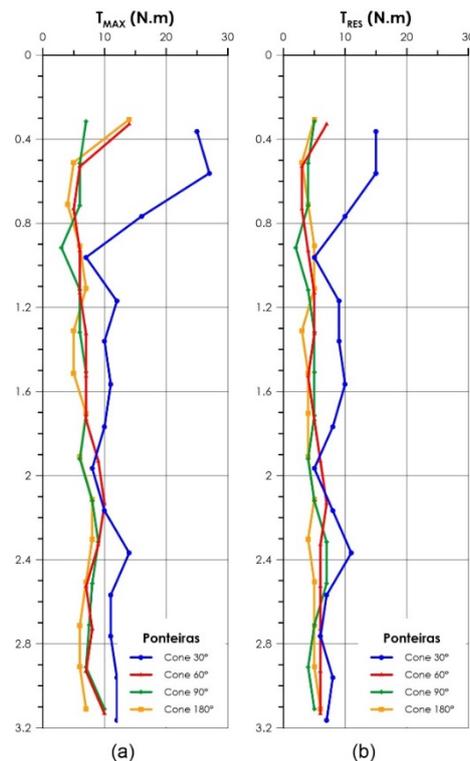
No gráfico da Figura 5.13(a) observa-se que o valor do torque máximo medido se diferencia em função do ângulo de ápice da ponteira ensaiada. Na maioria dos casos, os menores valores de torque são obtidos pela ponteira de 180°, e os maiores pela ponteira de 30°, enquanto as ponteiras de 60° e de 90° possuem comportamentos similares.

Considerando a área lateral total das ponteiras, dada pela soma da área da parte cônica com a área lateral da parte cilíndrica fica evidente que a ponteira de 180° possui menor área lateral e, portanto, ao ser rotacionada exigirá um torque menor, enquanto a ponteira de 30°, por ter maior área lateral, exigirá maior torque.

Já o gráfico da Figura 5.13(b) relaciona o valor do torque residual medido em função da profundidade e novamente é observado que o ângulo de ápice das ponteiras exercem influência nos resultados.

Novamente, os maiores valores do torque residual são obtidos para a ponteira com ângulo de ápice de 30°, o que é explicado pelo fato da ponteira ter maior área lateral total que as demais. Na maioria dos casos, os menores valores do torque residual são obtidos pela ponteira de 180°, pois a mesma possui a menor área lateral.

Figura 5.13 Comportamento de (a) torque máximo e (b) torque residual das ponteiras em função da profundidade nos ensaios da linha 3.



Fonte: o autor.

Chama a atenção o fato de que os comportamentos das ponteiras de 60° e 90° serem muito similares e próximos aos valores obtidos pela ponteira de 180°.

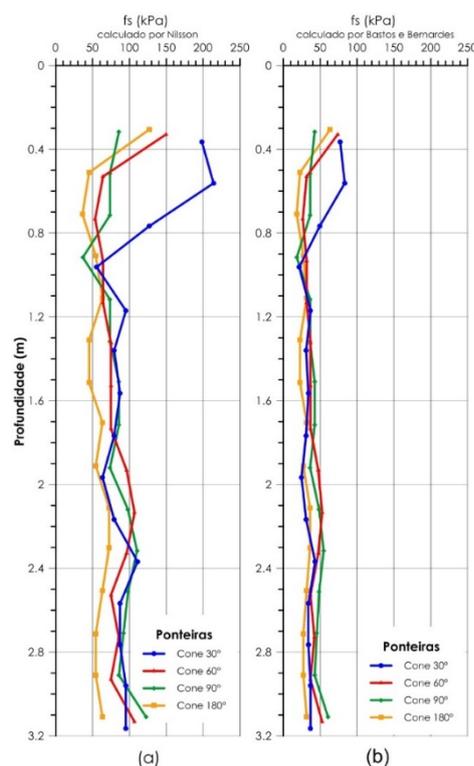
### 5.3.2.3 O ATRITO LATERAL E SEU COMPORTAMENTO.

Na Figura 5.14 observam-se os gráficos das tensões cisalhantes calculadas através da Eq. (2.18) de Nilsson (2008) e da Eq. (4.14) de Bastos *et al.* (2014), em ambos os casos considerando as diferentes áreas laterais das ponteiras.

Nota-se na Figura 5.14(a) que os valores de tensão cisalhante calculados pela Eq. (2.18) de Nilsson (2008) variam claramente numa faixa entre 50 kPa e 100 kPa, principalmente abaixo da profundidade de 80 cm.

Já na Figura 5.14(b) onde os valores das tensões cisalhantes foram calculados através da Eq. (4.14) de Bastos *et al.* (2014), percebe-se que as curvas são equivalentes em função da profundidade, principalmente abaixo de 80 cm, com uma variabilidade numa faixa muito estreita de valores que cresce ligeiramente com a profundidade. A variabilidade observada pode ser explicada pela própria heterogeneidade do solo no local onde foram feitos os ensaios, pois apesar de ter uma uniformidade aparente, as tensões confinantes, e a própria variabilidade granulométrica do solo modificam os valores de resistência medidos.

Figura 5.14 Tensões cisalhantes calculadas pela formulação de (a) Nilsson (2008) e de (b) Bastos et al. (2014).



Fonte: o autor.

Nota-se que para uma profundidade maior que 80 cm, obtém-se um valor médio representativo da tensão cisalhante entre o solo e a ponteira metálica de 38,5 kPa. Os valores médios representativos para a ponteira de 180°, são os menores (30,5 kPa). Já os valores médios representativos para as ponteiras de 60° (41,4 kPa) e de 90° (41,9 kPa) podendo ser considerados equivalentes.

Também chama a atenção o fato de que para a ponteira cônica de 30°, a tensão de cisalhamento calculada pela Eq. (4.14) corresponde a 38,9% da tensão de cisalhamento calculada pela Eq. (2.18). Esta relação para a ponteira cônica de 60° é de 49,3%, para a ponteira cônica de 90° é de 49,5% e, para a ponteira de 180° é de 50,0%.

Pode-se verificar que quanto menor o ângulo de ápice da parte cônica da ponteira, maior é a dispersão entre os valores obtidos pelas duas formulações

### 5.3.3 INFLUÊNCIA DO PESO DO SISTEMA NA NOVA EQUAÇÃO.

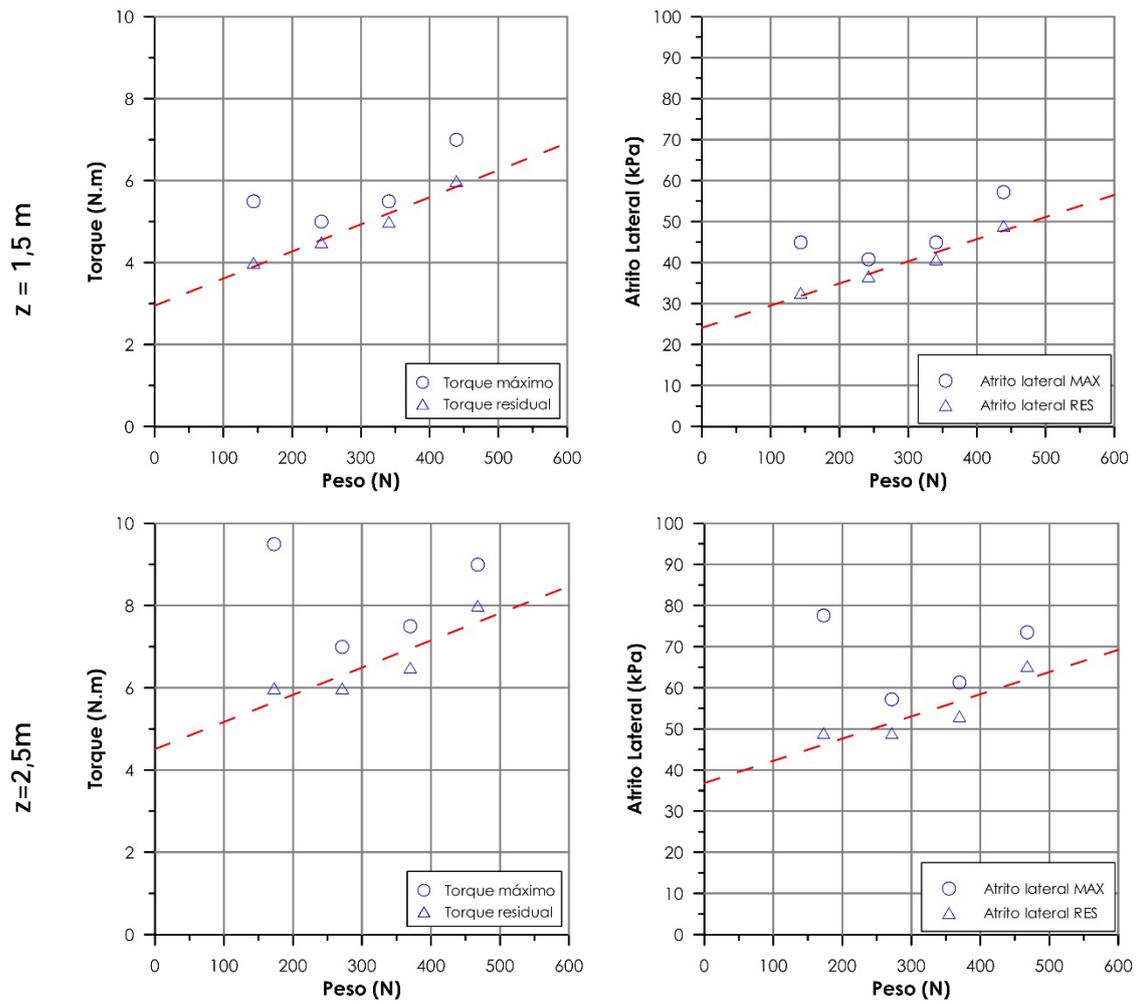
No desenvolvimento da Eq. (4.14), fica evidente que o atrito lateral do cone da ponteira é diretamente influenciado pela força axial aplicada ao sistema, que determina a parcela de torque devido à parte cônica da ponteira, Eq. (4.12) e Eq. (4.13). No caso do DPL, esta força axial aplicada à ponteira é o peso próprio de todo o sistema no momento da medida do torque.

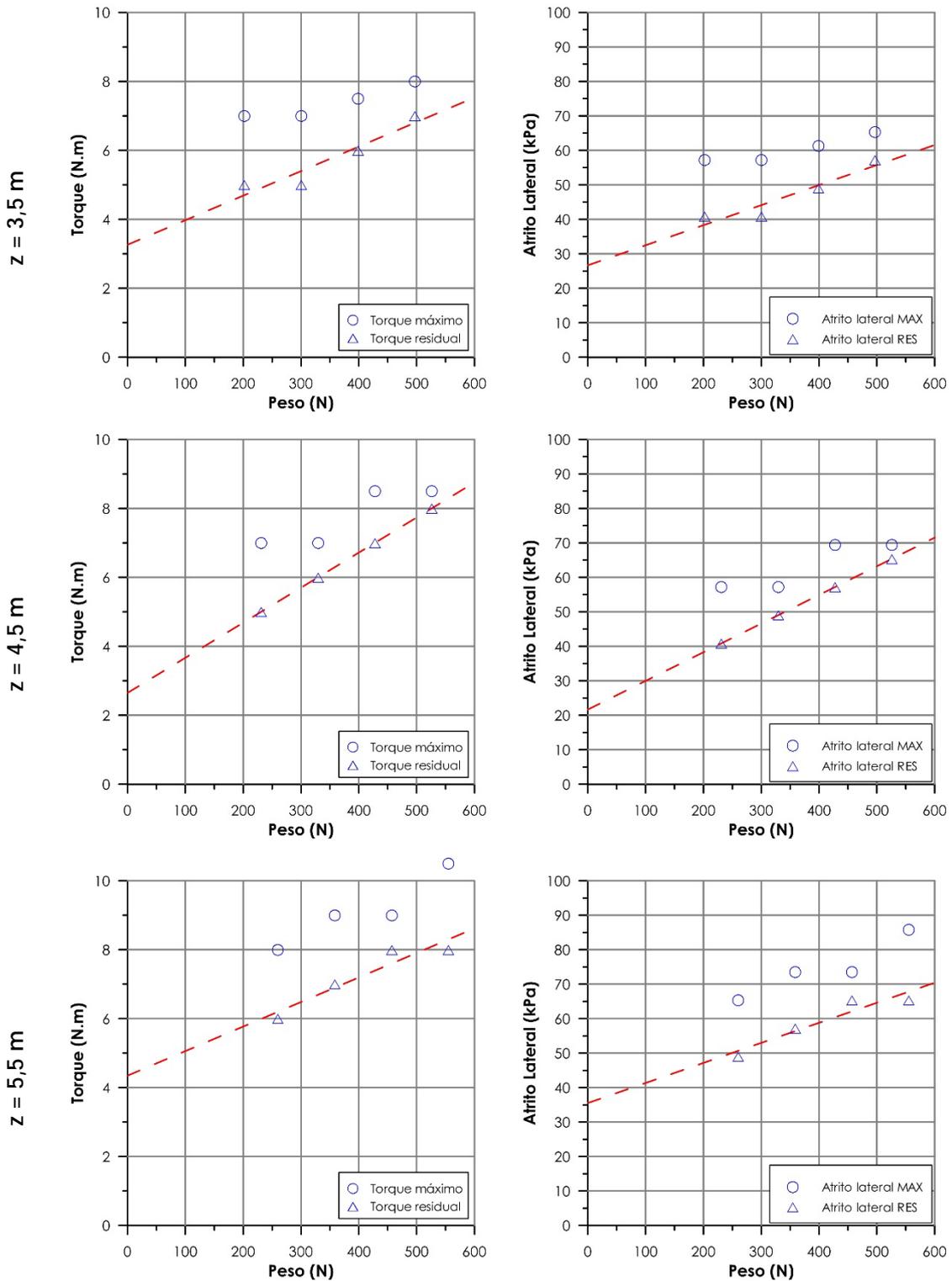
Assim, é de se esperar que para uma determinada composição de hastes do sistema, variações de massa como a presença ou não do martelo no momento da medida

do torque, podem alterar o valor medido e consequentemente alterar o valor do atrito lateral calculado.

Nos gráficos da Figura 5.15 pode-se observar o comportamento dos valores medidos do torque máximo e residual para uma composição básica do DPL com 2, 3, 4, 5 e 6 hastes, registrados às profundidades de 1,50 m, 2,50 m, 3,50 m, 4,50 m e 5,50 m, em função dos pesos aplicados à ponteira, conforme os procedimentos explicados na seção 5.2.3, além dos valores de atrito lateral correspondentes calculados através da Eq. (4.14).

Figura 5.15 Gráficos de torque e atrito lateral em função do peso da composição para diversas profundidades.





Fonte: o autor.

As irregularidades observadas nas medidas do torque máximo têm a ver com o tempo necessário para preparar o DPL para o ensaio de torque após o último golpe instrumentado. Neste tempo o solo descansa adere à ponteira, o que implica no aumento do torque necessário para iniciar o giro do torquímetro.

Outros fatores podem contribuir, como por exemplo a manipulação do DPL para a retirada do conjunto formado pela cabeça de bater, haste-guia e martelo. Essas movimentações podem provocar movimentações na ponteira, soltando-a do solo a seu redor, ou mesmo empurrando-a para baixo, aumentando a contribuição da parte cônica ao torque.

Entretanto quando se mede o torque residual, o sistema é mantido girando constantemente de forma que o torque é estável, o que implica necessariamente em um atrito lateral estável.

Com relação ao comportamento do atrito lateral residual, calculado pela Eq. (4.14), a partir dos valores dos torques residuais, percebe-se que o comportamento é linear em todas as profundidades. O peso próprio do DPL claramente influencia a medida do torque residual em todas as profundidades e, ao aumenta-lo, também aumenta o atrito lateral.

Considerando que o torque residual medido é a soma do torque devido à parte cilíndrica da ponteira com o torque devido à parte cônica da ponteira, que depende do peso próprio do DPL, pode-se afirmar que o intercepto entre a linha de tendência do torque residual com o eixo vertical fornece o torque devido à parte cilíndrica, e que a inclinação da reta é um fator de atrito dependente do peso do sistema.

Da mesma forma, nos gráficos do atrito lateral passa a ser possível distinguir a parcela de atrito devido à parte cilíndrica da ponteira, e contribuição devida à parte cônica, através da inclinação da reta que passa a representar um fator de atrito em função do peso do sistema.

Logo, o torque residual  $T_{RES}$  medido pode ser escrito como

$$T_{RES} = T_{cilindro} + T_{cone}(W) \quad \text{Eq. (5.1)}$$

onde  $W$  é o peso próprio do sistema,  $T_{cilindro}$  é o torque da parte cilíndrica, que é constante, e  $T_{cone}(W)$  é o torque do cone, que é função do peso.

Analogamente, tem-se:

$$f_{S-RES} = f_{S-cilindro} + f_{S-cone}(W) \quad \text{Eq. (5.2)}$$

onde  $f_{S-RES}$  é o atrito lateral calculado a partir do torque residual,  $f_{S-cilindro}$  é o atrito lateral constante da parte cilíndrica da ponteira e  $f_{S-cone}(W)$  é o atrito lateral da parte cônica que é função do peso do sistema.

#### 5.3.4 CONSIDERAÇÕES.

Nos ensaios realizados no laboratório, verificou-se uma maior penetração inicial devido ao peso próprio da ponteira de menor ângulo e foi observado um menor incremento de carga para penetrar o cone na amostra. Para maiores profundidades a relação carga deslocamento foi praticamente constante para as quatro ponteiras analisadas. Os valores encontrados para as ponteiras de 60° e de 90° foram equivalentes.

Os ensaios executados no campo indicaram pouca variação no longo dos três primeiros metros de profundidade, o que pode ser explicado pelo fato das ponteiras terem a mesma área projetada de ponta.

Por outro lado, os valores de torque máximo e do torque residual medidos aumentam com a diminuição do ângulo do cone devido ao aumento da área lateral. Porém, observou-se que para as ponteiras de 60° e de 90° a diferença em ambos os casos não foi significativa.

As tensões cisalhantes quando calculadas pela Eq. (4.14) proposta por Bastos *et al.* (2014), utilizando os valores de torque máximo, são significativamente menores que os valores obtidos quando se utiliza a Eq. (2.18) de Nilsson (2008). É notável que, ao utilizar a Eq. (4.14), não há diferença significativa dos valores de tensão cisalhante para as ponteiras cônicas de 60° e de 90°, o que sugere que a ponteira cônica de 90° pode ser substituída pela ponteira cônica de 60° sem prejuízo de resultados.

Cabe ressaltar que o ensaio sobre a influência do peso do sistema sobre a medida do torque evidenciou a necessidade de se manter o martelo posicionado sobre o coxim após o último golpe antes de se medir o torque, de forma a apenas acoplar o torquímetro sobre a haste-guia e em seguida efetuar as medidas. Assim não ocorrerão variações de peso no sistema, e as manipulações do equipamento serão mínimas. Finalmente, os resultados experimentais validam a Eq. (4.14) na medida em que mostra que variações do peso do sistema (força axial aplicada no DPL), alteram os valores de torque medidos, e conseqüentemente os valores do atrito lateral calculados, necessários para a classificação do solo.

## 6 CAMPANHA DE ENSAIOS DE CAMPO EM BAURU.

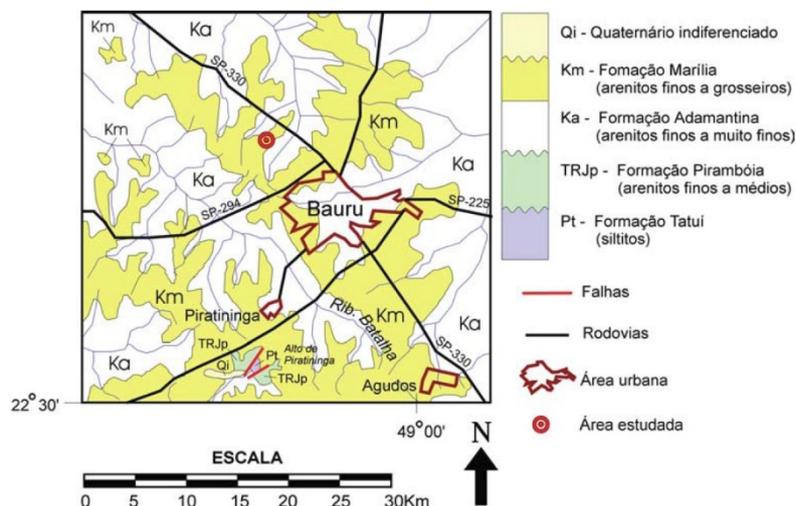
Uma campanha de ensaios de campo foi realizada nas dependências do Campus da Faculdade de Engenharia de Bauru, UNESP, com a finalidade de comparar os resultados do DPL com os resultados dos ensaios de CPT mecânico e elétrico, para um mesmo perfil geotécnico e com as mesmas condições de unidade. Todos os ensaios foram executados no mesmo dia e ocorreram em um período de forte estiagem na região.

### 6.1 GEOLOGIA DE BAURU E REGIÃO.

Segundo Ferreira *et al.* (1996), a região de Bauru/SP está localizada no Planalto Ocidental Paulista, com predominância da cobertura sedimentar do Grupo Bauru, originados do cretáceo superior. Corresponde a um ciclo de deposição mesozoica fluvial, podendo ainda ter ocorrências localizadas de sedimentos cenozoicos e aluviões quaternários. Da base para o topo, o Grupo Bauru é subdividido nas formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília.

Conforme Cavalcante *et al.* (2007), o município de Bauru apresenta em suas áreas mais baixas a formação Adamantina, e nas cotas acima de 540m predomina a formação Marília. Na Figura 6.1 podemos ver a distribuição dessas formações pela região do município de Bauru.

Figura 6.1 Mapa geológico da região de Bauru.



Fonte: Lago *et al.* (2006).

A formação Adamantina (cretáceo médio ao superior), é constituída por arenitos de granulação média a fina, siltitos arenosos micáceos, arenitos micáceos, argilitos e arenitos conglomeráticos, e raros arenitos com nódulos carbonáticos. É distribuída por toda a área do Grupo Bauru, com espessura variável em função da topografia, mas inferior a 200 m. Tem origem em sedimentos depositados por rios meandrantés com extensas

planícies de inundação, onde nos canais dos rios ocorreram as deposições de arenitos, e nas planícies de inundação houve deposição de siltitos (FERREIRA *et al.*, 1996).

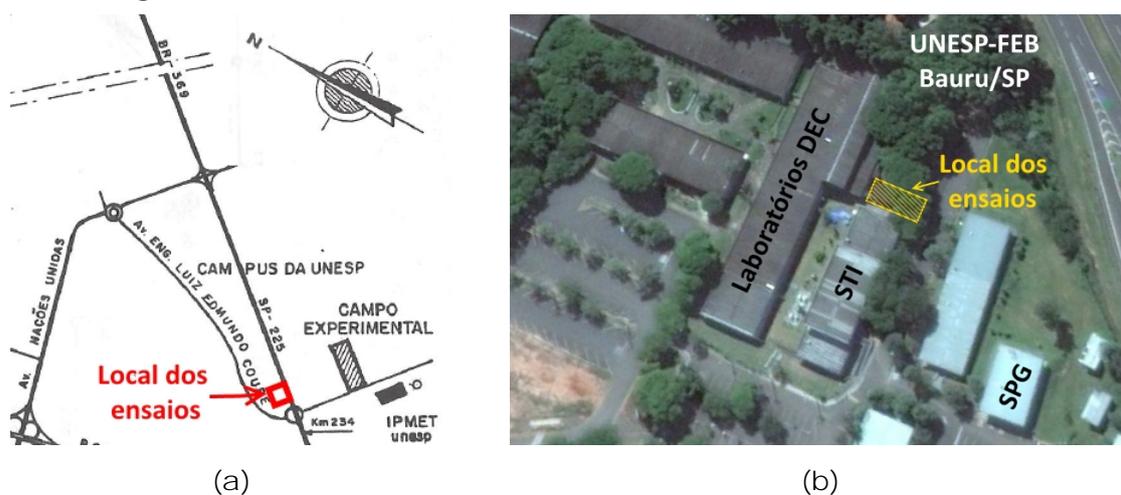
A formação Marília (cretáceo superior) é constituída por arenitos, lamitos e conglomerados de seixos de composição variada, intercalados entre si. Aflora por toda a região, ocupando geralmente as cotas superiores a 540 m, apresentando-se bastante lixiviado, e originando um solo avermelhado com espessuras máximas da ordem de 80 a 90 m (FERREIRA *et al.*, 1996).

No Campo Experimental de Fundações da FEB há predomínio das rochas da formação Marília, que foram submetidas a processos de morfogênese e pedogênese. Assim o perfil estratigráfico deve refletir características de rochas sedimentares, com alternância em camadas, e transformações desses materiais pelos processos citados (CAVALCANTE *et al.*, 2007).

## 6.2 ASPECTOS GEOTÉCNICOS.

As caracterizações apresentadas por Ferreira *et al.* (1996), Giacheti *et al.* (2006) e Cavalcante *et al.* (2007) referem-se ao Campo Experimental de Fundações da FEB, atualmente desativado, localizado originalmente próximo ao Instituto de Pesquisas Meteorológicas da UNESP de Bauru (IPMet), Figura 6.2(a) e não ao local onde foram realizados os experimentos dentro do Campus da UNESP de Bauru, mostrado na Figura 6.2(b). No entanto, considerando a proximidade dos dois locais, e a formação geológica da região, pode-se esperar que o local de realização dos ensaios dentro do Campus da UNESP de Bauru tenha características geológicas e geotécnicas semelhantes ao Campo Experimental de Fundações da FEB.

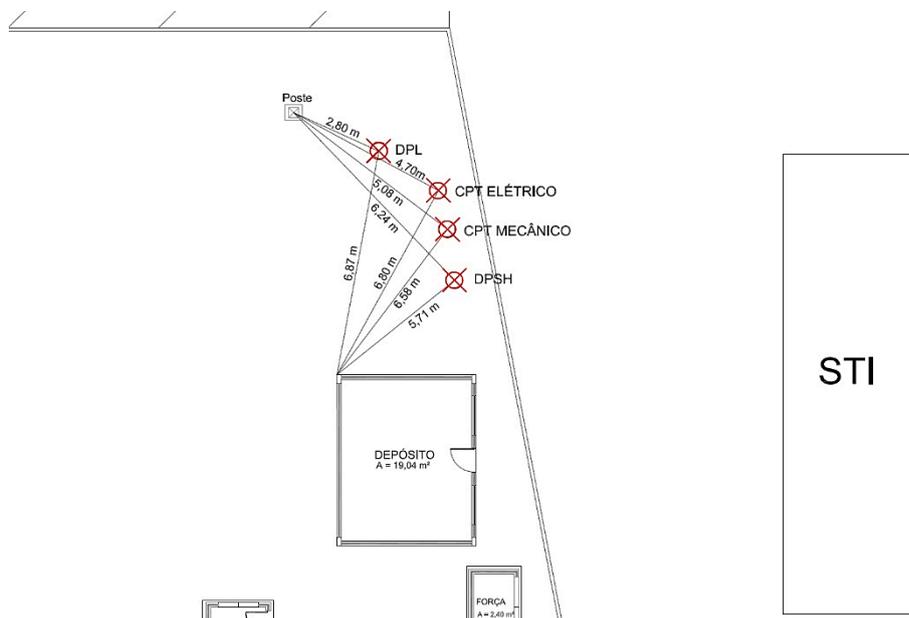
Figura 6.2 Localização dos ensaios.



Fonte: (a) adaptado de Ferreira *et al.* (1996) e (b) captura do Google Earth adaptada pelo autor.

A Figura 6.3 mostra a localização dos ensaios realizados no Campus da UNESP de Bauru, tendo por referência o prédio do Serviço Técnico de Informática (STI).

Figura 6.3 Localização dos ensaios realizados.



Fonte: o autor.

De acordo com Giacheti *et al.* (2006), o perfil geotécnico do Campo Experimental da FEB-UNESP é formado por uma camada de areia fina, pouco argilosa, de coloração avermelhada e não saturada até 20 m de profundidade. A classificação unificada dessa camada é SM-SC, enquanto a classificação MCT indica comportamento de solo laterítico (LA) até a profundidade de 13 m, a partir da qual o comportamento passa a ser não laterítico (NA). Até a profundidade de 16 m, o solo pode ser classificado como uma areia média argilosa, e a partir dos 16 m é classificado como uma areia fina a média argilosa.

Segundo informações orais obtidas no dia do ensaio, o nível freático encontrava-se há cerca de 40m de profundidade.

### 6.3 ENSAIOS REALIZADOS.

Foram realizados ensaios DPSH, CPT mecânico, CPT elétrico e DPL com instrumentação dinâmica, sendo que o ensaio DPSH não será considerado para o presente trabalho.

Os ensaios DPSH, CPT mecânico e CPT elétrico foram realizados com auxílio do equipamento TG63-150, fabricado pela empresa italiana Pagani Geotechnical Equipamento, Figura 6.4, de propriedade da FEB-UNESP. Trata-se de uma plataforma motorizada, com deslocamento por esteiras, configurado para realizar ensaios estáticos e dinâmicos.

De acordo com as informações do fabricante, esse equipamento pode operar em terrenos inclinados e sua torre tem sistemas de ajustes e estabilizadores hidráulicos que garantem a verticalidade da torre, além de um sistema de ancoragem por dois trados helicoidais motorizados, o que reduz o tempo de posicionamento do equipamento.

Figura 6.4 Equipamento Pagani TG63-150.



Fonte: Pagani GE Inc.

Configurado com um martelo de 63,5 kg, para uma altura de queda de 75 cm, está em conformidade com a norma ISO 22476-2:2005 para a realização de ensaios tipo DPSH-B. Mas também permite a configuração com martelos de 30 kg ou 50 kg, com altura de queda de 50 cm, para a realização de ensaios tipo DPH e DPM.

Seu principal uso é servir como uma plataforma que oferece um sistema de reação para a realização de ensaios estáticos, tais como o CPT e o CPTu. A coleta e registro dos dados pode ser feita através de sistemas de aquisição manual ou digital.

### 6.3.1 CPT MECÂNICO.

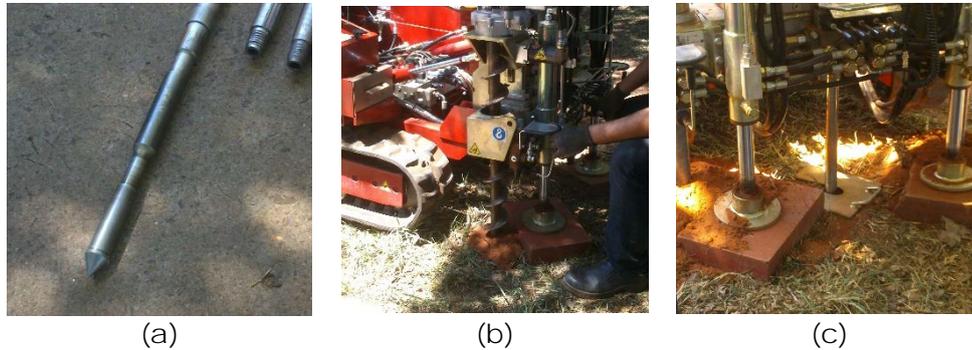
O ensaio de CPT mecânico foi realizado usando um cone mecânico de Begemann, com 10 cm<sup>2</sup> de área projetada da ponteira e ângulo de ápice típico de 60°, Figura 6.5(a), com o qual foram realizadas medidas de resistência de ponta  $q_c$  e atrito lateral  $f_s$  a cada 20 cm de penetração “quase-estática” no solo.

Após devida ancoragem da plataforma TG63-150 através de hastes helicoidais e da verticalização de sua torre, Figura 6.5(b), foi feito um pré-furo de 40 cm com auxílio de um trado helicoidal. A ponteira mecânica totalmente recolhida foi acoplada a uma primeira haste, e devidamente posicionada abaixo do pré-furo, Figura 6.5(c), de forma a possibilitar a início da coleta de dados.

O ensaio foi realizado de acordo com os procedimentos normatizados na NBR 12069 MB-3406:1991, sob velocidade constante de 20 mm/s para a cravação da ponteira

no solo. A cada avanço da ponteira mecânica em 20 cm no solo, os dados referente às medidas de  $q_c$  e  $q_c + f_s$ , eram lidos no painel de controle da plataforma TG63-150, e devidamente anotados manualmente em uma planilha apropriada.

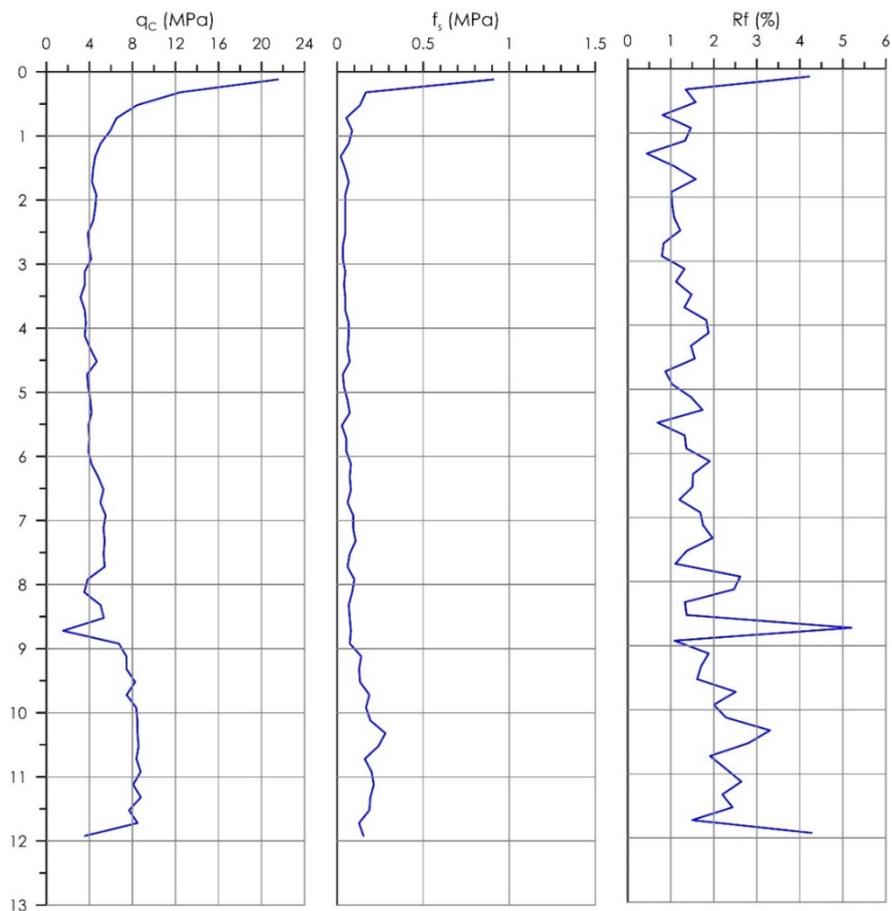
Figura 6.5 Ensaio de cone mecânico.



Fonte: arquivos pessoais do autor.

Sempre que necessário, uma nova haste era acrescentada ao sistema, de forma que o ensaio foi realizado até a profundidade de 12,6 m e os dados obtidos encontram-se nos gráficos da Figura 6.6.

Figura 6.6 Dados obtidos através do CPT mecânico na campanha de ensaios de Bauru.

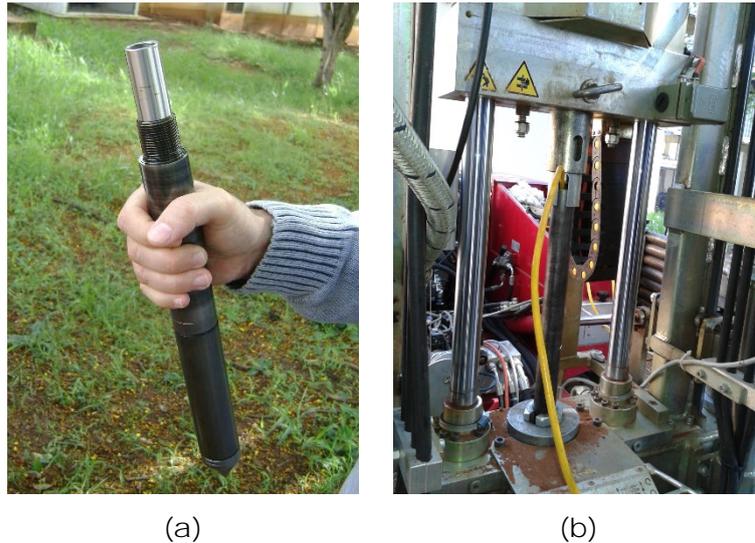


Fonte: o autor.

### 6.3.2 CPT ELÉTRICO.

O ensaio de CPT elétrico foi realizado com uma ponteira apresentando ângulo de ápice de  $60^\circ$ , diâmetro aproximado da base do cone medindo 3,57 cm, o que resulta em uma área de base (área projetada) de aproximadamente  $10\text{cm}^2$  e, uma luva cilíndrica de mesmo diâmetro da base do cone, com área lateral de  $150\text{cm}^2$ , conforme especificada na NBR 12069 MB-3406:1991, Figura 6.7(a).

Figura 6.7 Ensaio de cone elétrico.



Fonte: arquivos pessoais do autor.

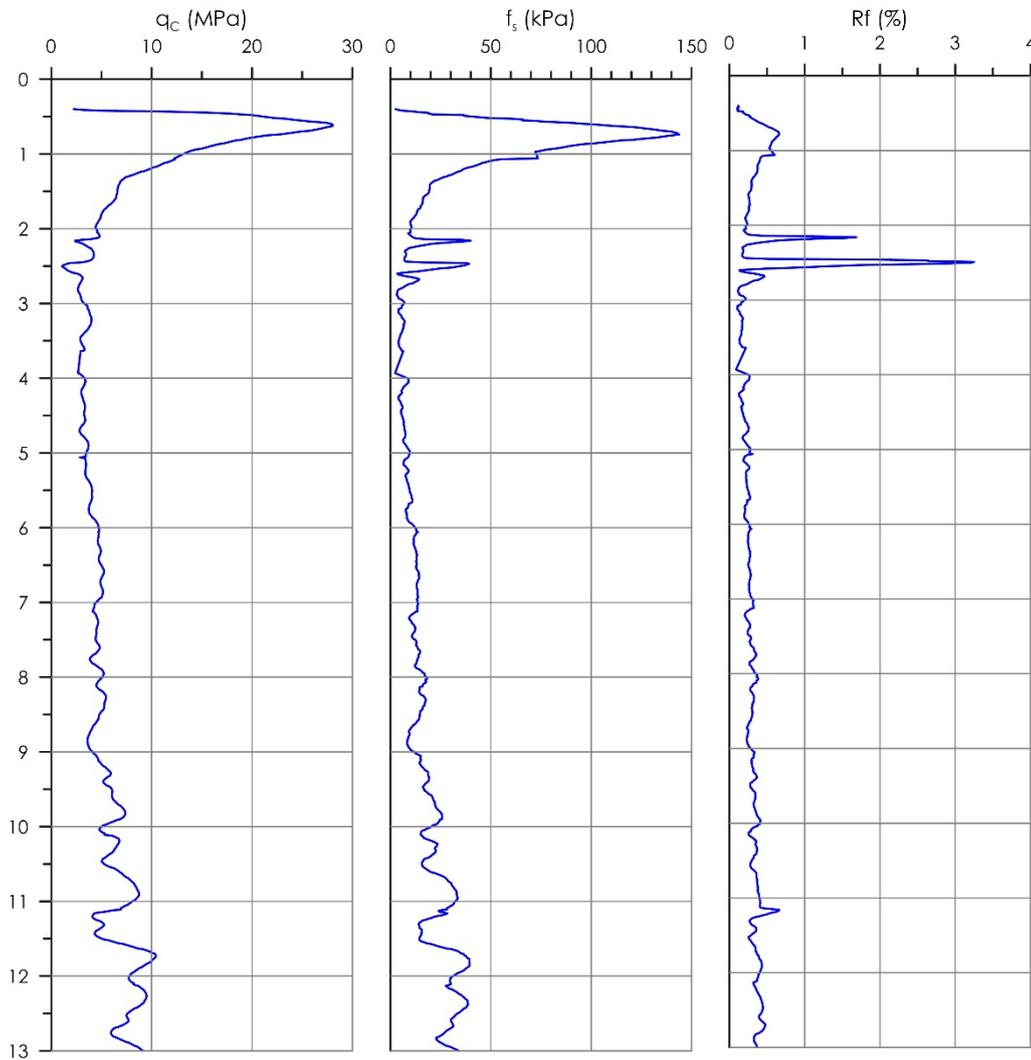
Foi realizada a ancoragem da plataforma TG63-150 no solo, através de hastes helicoidais, seguida da verticalização de sua torre e a acoplagem do sistema automático de aquisição de dados, responsável por registrar e armazenar eletronicamente os valores de resistência de ponta  $q_c$  e atrito lateral  $f_s$  medidos pela ponteira através de suas células de carga. Também foi feito um pré-furo de 30 cm com auxílio de um trado helicoidal, permitindo o posterior posicionamento do cone elétrico em seu fundo.

A ponteira foi então conectada a um cabo apropriado, que passa pelo interior de um conjunto de hastes metálicas, e em seguida foi acoplada à primeira haste do sistema, e esta foi devidamente posicionada na plataforma TG63-150, Figura 6.7(b), responsável pela cravação do cone no solo. Após terem sido feitas todas as conexões elétricas necessárias, o cone foi posicionado no fundo do pré-furo, e teve início a coleta de dados.

A cravação do cone foi feita a uma velocidade de 20 mm/s, e os valores da resistência de ponta  $q_c$  e do atrito lateral  $f_s$  foram registradas e armazenados para cada centímetro de penetração, até atingir a profundidade de 13,09 m a partir da superfície do terreno. Sempre que necessário, uma nova haste era acrescentada ao sistema.

Os dados obtidos pelo CPT elétrico encontram-se representados nos gráficos da Figura 6.8.

Figura 6.8 Dados obtidos através do CPT elétrico na campanha de ensaios de Bauru.



Fonte: o autor.

### 6.3.3 DPL.

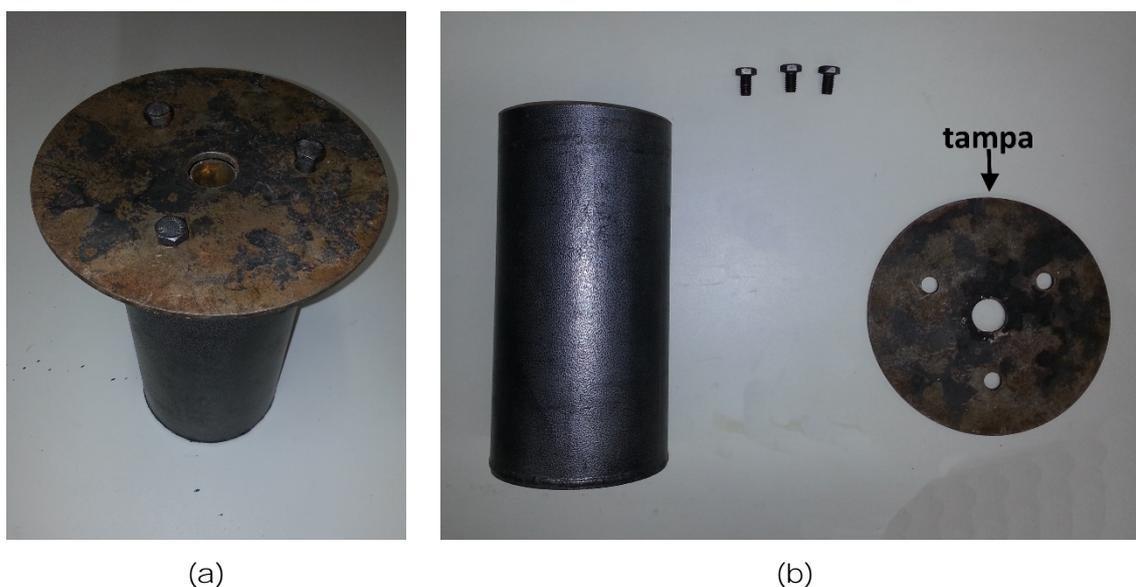
Considerando a semelhança dos valores medidos para a ponteira de 90° e para a ponteira de 60° nos ensaios preliminares, foi decidido realizar em campo os ensaios de DPL com a ponteira de 60°, por ser igual a utilizada no ensaio CPT, permitindo assim, a comparação direta dos resultados DPL com os resultados CPT.

Para a presente campanha de ensaios, optou-se pelo uso do coxim de poliuretano, na espessura de 4 mm, por apresentar maior resistência e durabilidade, não sendo necessária sua substituição ao longo do ensaio. Isso também garante a repetibilidade dos ensaios uma vez que não variando a rigidez do coxim, a onda de compressão transmitida ao sistema, para diferentes ensaios, são semelhantes.

### 6.3.3.1 ENSAIO COM INSTRUMENTAÇÃO NO TOPO DA COMPOSIÇÃO DE HASTES

O ensaio geralmente é iniciado fazendo um pré-furo de 40cm de profundidade por 15 cm de diâmetro, de forma que uma haste com a ponteira com ápice de 90° passe pelo furo central da plataforma niveladora, Figura 6.9(a), e este conjunto seja ajustado ao pré-furo. No entanto para o ensaio instrumentado foi feito um pré-furo com 5 cm de diâmetro e 12 cm de profundidade. A tampa da plataforma de nivelamento foi desaparafusada de sua parte cilíndrica, Figura 6.9(b), e uma haste acoplada à ponteira com ápice de 60° passasse por seu furo central.

Figura 6.9 Plataforma niveladora do DPL.



Fonte: arquivos pessoais do autor.

A ponteira foi inserida no pré-furo e a tampa da plataforma foi ajustada e fixada no solo por barras de aço em "L", de forma a conexão da ponteira com a haste estivesse nivelada com a face superior da tampa. Esta disposição, permitiu estabelecer uma referência para a contagem do número de golpes  $N_0$  necessários para cravar a ponteira a cada 10 cm no solo, e também para a leitura da penetração dos golpes instrumentados utilizando uma trena laser com precisão de 0,1 mm.

No topo da haste foi parafusado o conjunto formado pela cabeça de bater e haste guia. Também foi colocado um coxim de poliuretano sobre a cabeça de bater e em seguida o martelo foi repousado sobre o coxim.

Para ajudar a garantir uma altura de queda constante do martelo, com energia potencial teórica de 50 J por golpe, foi empregada uma braçadeira metálica fixada sobre firmemente sobre uma borracha posicionada na superfície da haste guia, na marca de 50 cm, limitando o curso do martelo. Todo o conjunto foi verticalizado com o auxílio de um nível de bolha comum, Figura 6.10(a).

O conjunto foi cravado até a profundidade de 90 cm, contabilizando o número de golpes  $N_{10}$  dados para a cravação de 10 cm da ponteira no solo, sempre que uma linha de referência da haste alcançava a plataforma de referência.

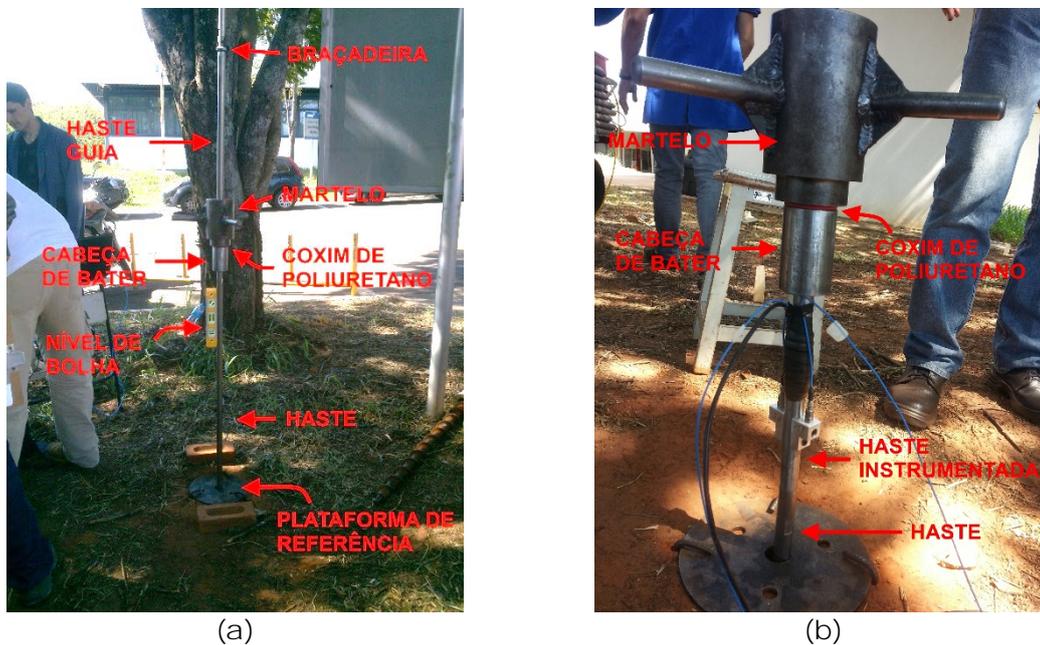
Ao atingir a marca de 90 cm, o conjunto formado pela cabeça de bater com a haste guia e o martelo foi cuidadosamente solto do sistema com o auxílio de chaves adequadas, tomando o cuidado de não rotacionar a haste com a ponteira cravada no solo, e de evitar eventuais balanços do conjunto.

A haste instrumentada foi parafusada sobre a haste cravada no solo, e sobre ela foi parafusada a cabeça de bater com a haste guia e o martelo, Figura 6.10(b), sempre com o uso de chaves adequadas e tomando o cuidado de não rotacionar a haste cravada no solo, bem como não provocar eventuais balanços nas hastes.

Os cabos da haste instrumentada estavam devidamente conectados ao sistema de aquisição de dados HMB MX 410, que por sua vez estava conectado a um notebook executando o software de aquisição e tratamento de dados catman®Easy/AP.

Foram executados três golpes do martelo sobre a cabeça de bater. A cada golpe foi verificado se os sinais da célula de carga e dos acelerômetros foram devidamente registrados, para em seguida serem gravados em disco. Caso houvesse necessidade, um quarto golpe era desferido.

Figura 6.10 Ensaio DPL com instrumentação no topo da composição de hastes.



Fonte: arquivos pessoais do autor.

A cada golpe também era medida com uma trena laser a penetração da ponteira no solo, determinada pela diferença de altura entre a plataforma de referência e a cabeça de bater, antes e depois do golpe com medição de energia.

Para a realização do ensaio de torque, o conjunto de cabeça de bater, haste guia e martelo foi solto do sistema, permitindo a retirada da haste instrumentada.

Quando o conjunto de cabeça de bater, haste guia e martelo estava novamente parafusado sobre a haste cravada no solo, o torquímetro foi acoplado à extremidade superior da haste guia e foram realizadas as medidas de torque máximo e torque residual.

Os dados referentes a  $N_{10}$  e aos torques máximo e residual, foram devidamente anotados em planilha específica para o ensaio.

Em seguida, o sistema foi remontado com a colocação de uma nova haste entre a cabeça de bater e a haste cravada no solo, e uma nova sequência de contagem de golpes era iniciada, registrando-se  $N_{10}$  ao longo da cravação de mais 1 m do penetrômetro no solo, quando se repetia a sequência de aquisição de dados anteriormente descrita para os golpes instrumentados e torques.

O ensaio prosseguiu até a profundidade de 11,9 m, quando foi feita a última aquisição de dados. Os dados coletados relativos ao  $N_{10}$  encontram-se relacionados na Tabela AIII. 2, os relativos às medidas de torque na Tabela AIII. 5 e, os relativos aos deslocamentos medidos nos golpes instrumentados na Tabela AIII. 3.

#### **6.3.4 ENSAIOS PARA DIFERENTES COXINS.**

Após a obtenção da última sequência  $N_{10}$ , a instrumentação foi colocada novamente entre a cabeça de bater e a composição de hastes e ponteira cravada no solo, para verificar a influência dos diferentes coxins no amortecimento da onda transmitida para as hastes.

Foram realizados 2 golpes instrumentados e com medidas de deslocamentos, com o coxim de borracha de poliuretano com espessura de 4 mm, outros 2 golpes com o coxim de borracha comum com 3 mm de espessura, e outros 2 golpes com o coxim quadrado de madeira. Os valores obtidos para os deslocamentos medidos encontram-se na Tabela AIII.4.

O coxim de poliuretano usado na cravação do DPL até a profundidade de 11,9 m não apresentou sinais de desgaste ou de esmagamento.

### **6.4 RESULTADOS**

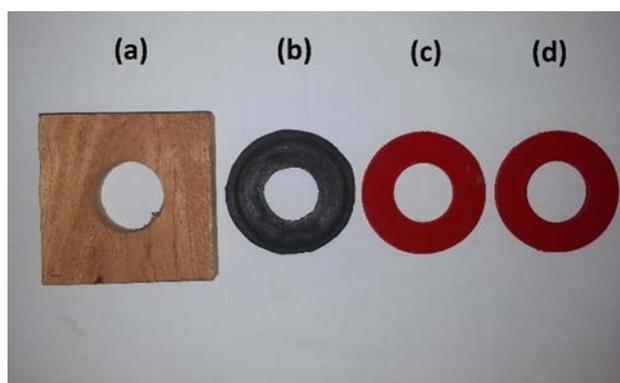
Os ensaios realizados em Bauru forneceram dados importantes que permitiram avaliar os coxins testados, o comportamento do DPL sob o ponto de vista dinâmico principalmente no que se refere à energia transmitida ao sistema e à força mobilizada. O principal resultado, no entanto, foi mostrar que através da aplicação de conceitos de

energia ao DPL, é possível utilizá-lo para classificar o solo ensaiado através do ábaco de Robertson *et al.* (1986) mostrado na Figura 2.8.

#### 6.4.1 EFEITO DE COXIM

Para entender o comportamento do DPL modificado por Nilson com relação ao coxim, foram avaliados empiricamente e ensaiados dinamicamente os quatro tipos de coxins apresentados na Figura 6.11.

Figura 6.11 Modelos de coxins para o DPL: (a) em madeira de Pinus, (b) em borracha comum de 3 mm, (c) em borracha de poliuretano de 3 mm e (d) em borracha de poliuretano de 4 mm.



Fonte: arquivos pessoais do autor.

Com relação à durabilidade, o coxim de madeira Pinus, Figura 6.11(a), mostrou-se frágil nos testes preliminares, quebrando e necessitando ser trocado com frequência durante os testes para aprendizado do uso do equipamento. Este fato motivou a busca por outros materiais que pudessem substituir a o uso da madeira como coxim no DPL.

Na campanha de ensaios preliminares, foram usados coxins de manta de borracha preta comum, Figura 6.11(b), com 3 mm de espessura. Estes também se mostraram inadequados, pois ao longo da cravação eram gradativamente esmagados, perdendo sua função de amortecimento e, também necessitando ser trocados a cada 3 ou 4 m de cravação do DPL.

Durante os ensaios com instrumentação dinâmica realizados em Bauru, foi utilizado um único coxim de borracha de Poliuretano com 4 mm de espessura, Figura 6.11(d), que se mostrou resistente aos impactos do martelo durante a cravação do DPL por 12 m de profundidade, sem sofrer qualquer tipo de dano aparente.

Outro coxim confeccionado em borracha de Poliuretano com 3 mm de espessura, Figura 6.11(c), foi utilizado apenas em dois golpes para ter o registro de seu comportamento dinâmico, permitindo uma primeira avaliação da influência da espessura do material no desempenho do coxim.

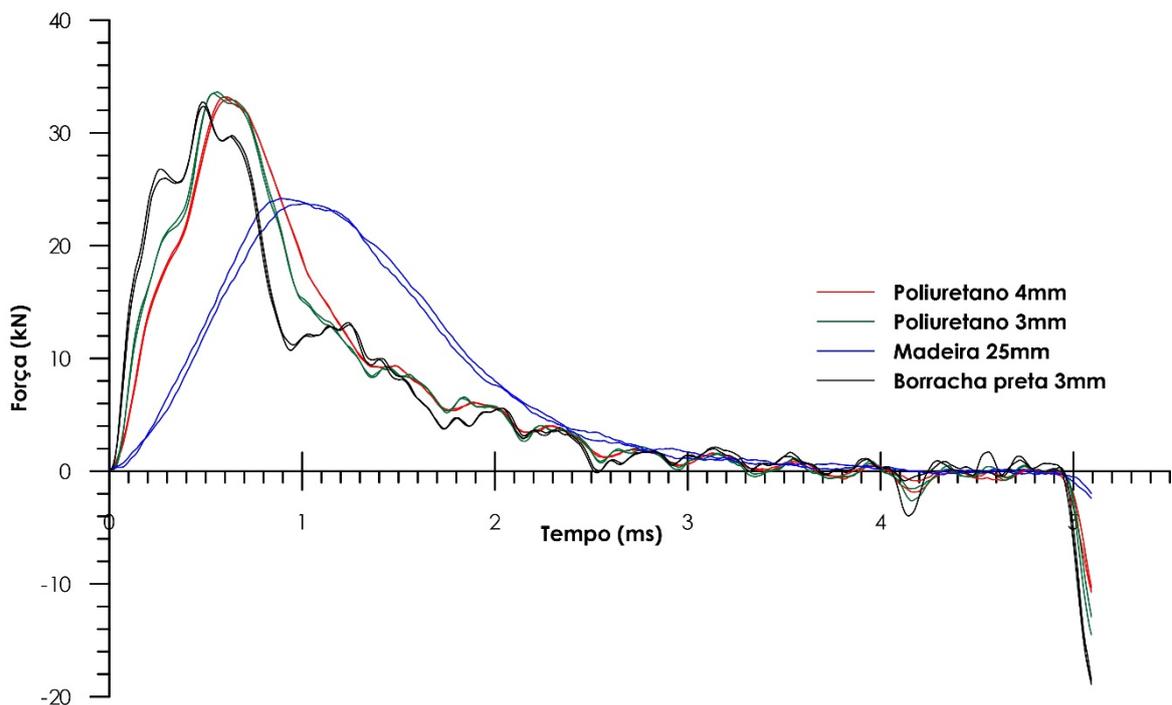
Os ensaios para analisar o comportamento dinâmico dos coxins foram realizados quando a ponteira estava a 11,9 m de profundidade. Para esta análise foram considerados

os dois últimos golpes do ensaio dinâmico com o coxim de Poliuretano de 4 mm, e os golpes realizados especificamente para ensaiar os demais coxins, dois para cada tipo.

De acordo com a Tabela 4.1, o comprimento de haste equivalente à distância entre a instrumentação dinâmica e o ápice da ponteira é  $\ell = 12,265 \text{ m}$ . Considerando a velocidade de propagação de onda calculada como  $c = 5031 \text{ m/s}$ , a onda após ser refletida no ápice da ponteira deve retornar à posição da instrumentação no tempo  $2\ell/c \approx 4,9 \text{ ms}$ .

No gráfico da Figura 6.12, podemos observar que para todos os golpes, independentemente do tipo de coxim utilizado, para  $t \approx 4,9 \text{ ms}$  a onda refletida como sendo de tração atinge novamente a instrumentação, o que é caracterizado pelo fato dos sinais de força se tornarem abruptamente negativos. Comparando os sinais medidos de força, com os do gráfico da Figura 2.14, pode-se constatar que o coxim de madeira é o que apresenta a menor rigidez, enquanto que o coxim de manta de borracha preta teria a maior. Por sua vez, os coxins de poliuretano possuem rigidez muito próximas.

Figura 6.12 Força medida em função do tempo para a primeira onda de tensão usando diferentes tipos de coxins.

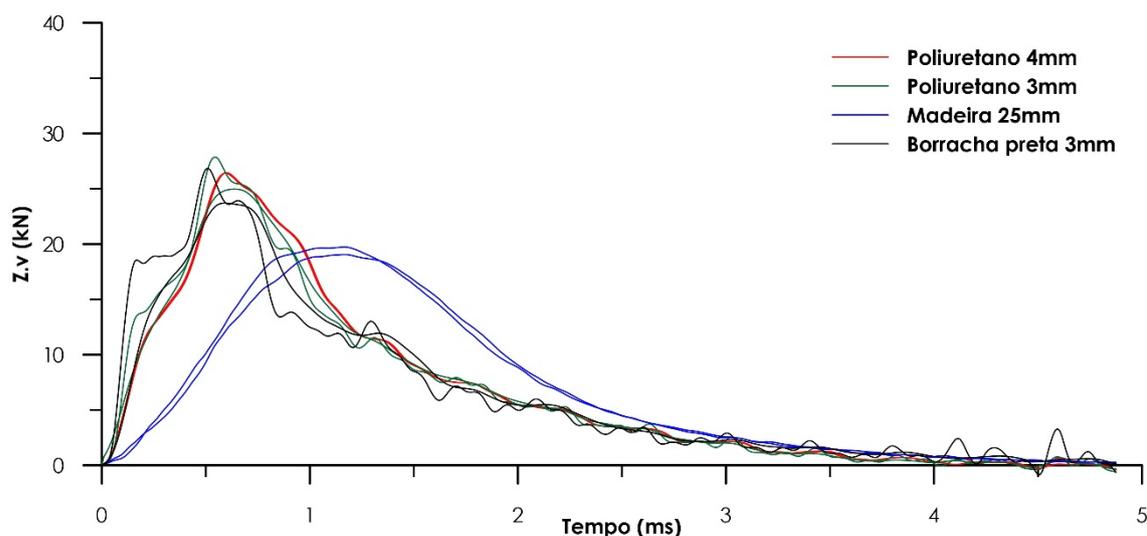


Fonte: o autor.

No gráfico da Figura 6.13, observamos o comportamento da força calculada por  $F = Z \cdot v$  em função do tempo, com os dados limitados ao instante  $t = 2\ell/c \approx 4,9 \text{ ms}$ .

Como esperado, o coxim de madeira apresenta a menor rigidez, enquanto que os coxins de borracha preta e de borracha de poliuretano apresentam rigidez maior que da madeira, não sendo possível identificar claramente qual destes possui a maior rigidez.

Figura 6.13  $F=Z.v$  em função do tempo para a primeira onda de tensão usando diferentes tipos de coxins.



Fonte: o autor.

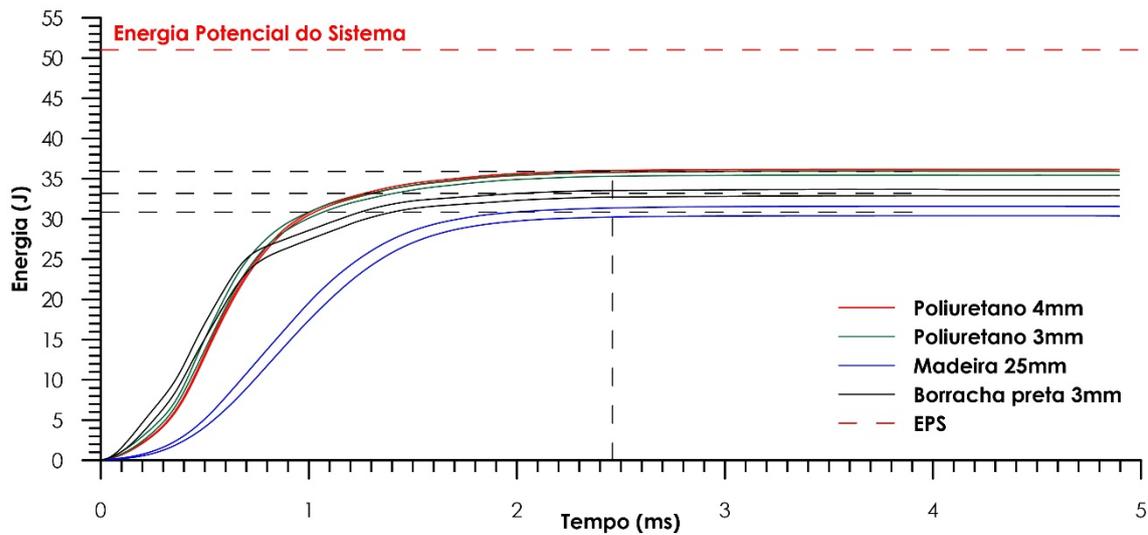
A forma da onda inicial interfere diretamente em como o coxim transmite a energia do impacto do martelo ao conjunto de hastes. Um coxim com baixa rigidez terá um pico de força menor que um coxim de maior rigidez, e transmitirá a energia de forma mais gradativa às hastes. Coxins com maior rigidez transmitirão forças maiores em espaços de tempo mais curtos, isto é, aplicarão um pulso de tensão de compressão maior às hastes em curto espaço de tempo (GONÇALVES *et al.*, 2007). Como as hastes do DPL são feitas em aço resistente e a energia do impacto é relativamente baixa, este pulso maior não deverá ser capaz de provocar danos às hastes.

No gráfico da Figura 6.14 pode-se observar o comportamento de energia calculada por EFV no intervalo de tempo  $2\ell/c \approx 4,9$  ms, em comparação com a energia potencial do sistema média ( $EP_{S-MEDIO} = 51$  J) para todos os golpes nos diferentes coxins.

No instante  $\ell/c \approx 2,45$  ms a onda de compressão atinge o ápice da ponteira e é refletida para o topo como uma onda de tração, interrompendo o mecanismo de transferência de energia que permanece estável até a onda de tração atingir novamente o topo da composição, quando o martelo perde momentaneamente o contato com a cabeça de bater. Neste instante o coxim de madeira transferiu aproximadamente 31 J às hastes (60,7% de  $EP_{S-MEDIO}$ ), o coxim de borracha preta comum transferiu 33 J às hastes (64,7% de  $EP_{S-MEDIO}$ ) enquanto que os coxins de borracha de poliuretano transmitiram 36 J às hastes (70,6% de  $EP_{S-MEDIO}$ ).

Após o instante  $2\ell/c \approx 4,9$  ms o martelo volta a ter contato com a cabeça de bater, e mais energia é transferida às hastes, prosseguindo com a penetração da ponteira no solo.

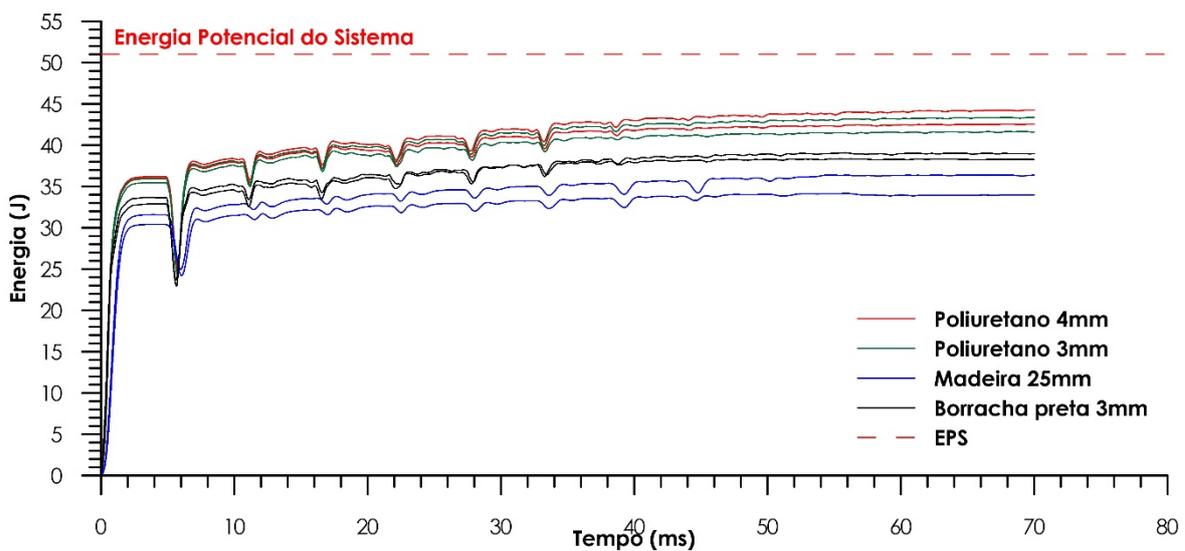
Figura 6.14 EFV em função do tempo para a primeira onda de tensão usando diferentes tipos de coxins.



Fonte: o autor.

No gráfico da Figura 6.15, pode ser observado o comportamento da energia durante os golpes instrumentados para os diferentes coxins testados. Percebe-se que o coxim de madeira de Pinus é o que transmite menos energia às hastes, levando o DPL a ter a pior eficiência em relação à  $EP_{S-MEDIO}$ . Os coxins de borracha de Poliuretano são os que transmitem a maior quantidade de energia às hastes, tornando o DPL mais eficiente em relação à  $EP_{S-MEDIO}$ . Quanto às espessuras dos coxins de Poliuretano, percebe-se que, ao contrário do esperado, o coxim de 4 mm transmite mais energia às hastes que o de 3 mm.

Figura 6.15 EFV em função do tempo para os golpes usando diferentes tipos de coxins.



Fonte: o autor.

Considerando que o coxim de madeira de Pinus é o que menos transmite energia do golpe às hastes, e que juntamente com o coxim de manta de borracha preta

comum são os menos resistentes aos golpes do martelo, estes devem ser evitados, pois seu uso implica na necessidade de frequente substituições dos coxins durante a realização dos ensaios do DPL.

Já o coxim de borracha de Poliuretano com 4 mm de espessura foi o que apresentou melhor resistência aos golpes, não necessitando de substituição ao longo da cravação do DPL por 12 m, o que indica menor necessidade de reposição deste componente durante a realização dos ensaios. Considerando ainda que foi o que melhor transferiu a energia dos golpes às hastes, este modelo de coxim mostrou-se mais adequado para o uso no DPL que os demais.

#### 6.4.2 ENERGIA TRANSMITIDA AO SISTEMA NO ENSAIO DE CAMPO.

A programa desenvolvido no MatLab® gerava uma planilha para cada profundidade, contendo uma aba com o resumo do processamento dos golpes. Na Tabela 6.1 encontram-se consolidados os dados de 11 das 12 planilhas geradas, e que serão consideradas para o presente estudo. A planilha referente ao ensaio dinâmico realizado à profundidade de 0,9 m foi excluída das análises por causa de interferências externas nos sinais que foram registradas pela instrumentação.

Na Tabela 6.1 encontram-se os dados relativos aos resultados da transferência de energias para as hastes. Os registros estão organizados pela profundidade base  $z$  dos ensaios e o número do golpe processado. Para cada golpe registrado o programa calculou a energia potencial do sistema  $EP_s$  e a energia dos golpes pelo método EFV, registrando os valores máximos de energia transferida para as hastes obtidos a partir dos acelerômetros 1 ( $EFV_1$ ) e 2 ( $EFV_2$ ), e para a média dos acelerômetros ( $EFV_M$ ). Também foram calculadas e registradas as eficiências equivalentes  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  e  $\eta_M$ , em relação à  $EP_s$ .

Fora estas informações consolidadas das planilhas geradas pelo programa, foi calculada a profundidade corrigida  $z_{corr}$  dos golpes, obtida pela soma da profundidade base com as penetrações dos golpes.

Numa primeira análise dos dados consolidados, percebemos que o primeiro golpe na profundidade base de 8,9 m teve uma eficiência de energia acima de 100%, o que indica problemas com o registro dos dados, apesar das verificações realizadas. Estes dados foram descartados das análises.

Também é possível constatar que até a profundidade base de 3,9 m, os resultados obtidos para o primeiro golpe são condizentes com os resultados obtidos para os segundos e terceiros golpes na profundidade. Porém, a partir de 4,9 m, os resultados obtidos ou são muito acima ou muito abaixo dos demais golpes para a profundidade.

Tabela 6.1 Resultados de energia e eficiência para as profundidades de 1,9 m a 11,9 m.

z (m)	Golpe n	$z_{corr}$ (m)	$EP_S$ (J)	$EFV_1$ (J)	$EFV_2$ (J)	$EFV_M$ (J)	$\eta_1$ (%)	$\eta_2$ (%)	$\eta_M$ (%)
1,9	1	1,905	50,41	34,96	35,23	35,06	69,3	69,9	69,6
	2	1,911	50,63	35,19	35,56	35,37	69,5	70,2	69,9
	3	1,916	50,41	35,88	35,35	35,61	71,2	70,1	70,6
2,9	1	2,904	50,31	34,05	34,34	34,19	67,7	68,3	68,0
	2	2,910	50,81	34,46	35,41	34,94	67,8	69,7	68,8
	3	2,914	50,31	34,62	35,57	35,10	68,8	70,7	69,8
	4	2,919	50,56	34,77	35,30	35,03	68,8	69,8	69,3
3,9	1	3,907	51,26	36,71	35,62	36,16	71,6	69,5	70,6
	2	3,913	50,98	37,82	36,92	37,36	74,2	72,4	73,3
	3	3,919	50,98	37,02	36,91	36,93	72,6	72,4	72,4
4,9	1	4,906	51,16	<b>48,78</b>	<b>49,96</b>	<b>49,37</b>	<b>95,4</b>	<b>97,7</b>	<b>96,5</b>
	2	4,912	51,16	41,18	41,90	41,54	80,5	81,9	81,2
	3	4,918	51,16	39,00	39,30	39,11	76,2	76,8	76,5
5,9	1	5,905	51,00	<b>34,18</b>	<b>34,97</b>	<b>34,57</b>	<b>67,0</b>	<b>68,6</b>	<b>67,8</b>
	2	5,909	50,66	37,74	38,61	38,17	74,5	76,2	75,3
	3	5,913	50,66	37,11	38,23	37,66	73,3	75,5	74,3
6,9	1	6,906	51,50	<b>36,00</b>	<b>36,55</b>	<b>36,28</b>	<b>69,9</b>	<b>71,0</b>	<b>70,4</b>
	2	6,912	51,50	43,90	45,05	44,48	85,2	87,5	86,4
	3	6,917	51,14	44,19	46,12	45,07	86,4	90,2	88,1
7,9	1	7,904	50,89	<b>36,47</b>	<b>38,05</b>	<b>37,26</b>	<b>71,7</b>	<b>74,8</b>	<b>73,2</b>
	2	7,909	51,29	43,53	44,32	43,93	84,9	86,4	85,6
	3	7,913	50,89	41,69	43,34	42,51	81,9	85,2	83,5
8,9	1	8,905	51,43	<b>56,77</b>	<b>58,34</b>	<b>57,55</b>	<b>110,4</b>	<b>113,4</b>	<b>111,9</b>
	2	8,909	51,01	44,58	45,43	45,01	87,4	89,1	88,2
	3	8,914	51,43	42,42	45,29	43,85	82,5	88,1	85,3
9,9	1	9,904	51,13	<b>34,64</b>	<b>34,38</b>	<b>34,51</b>	<b>67,8</b>	<b>67,3</b>	<b>67,5</b>
	2	9,907	50,67	36,91			72,8		
	3	9,911	51,13	37,68			73,7		
10,9	1	10,904	51,24	<b>46,20</b>	<b>47,36</b>	<b>46,78</b>	<b>90,2</b>	<b>92,4</b>	<b>91,3</b>
	2	10,907	50,76	41,91	42,69	42,30	82,6	84,1	83,3
	3	10,91	50,76	42,19	43,86	43,01	83,1	86,4	84,7
11,9	1	11,904	51,36	<b>35,60</b>	<b>34,96</b>	<b>35,28</b>	<b>69,3</b>	<b>68,1</b>	<b>68,7</b>
	2	11,908	51,36	43,39	43,33	43,36	84,5	84,4	84,4
	3	11,911	50,85	42,25	43,94	43,09	83,1	86,4	84,7
	4	11,914	50,85	44,59	45,21	44,89	87,7	88,9	88,3

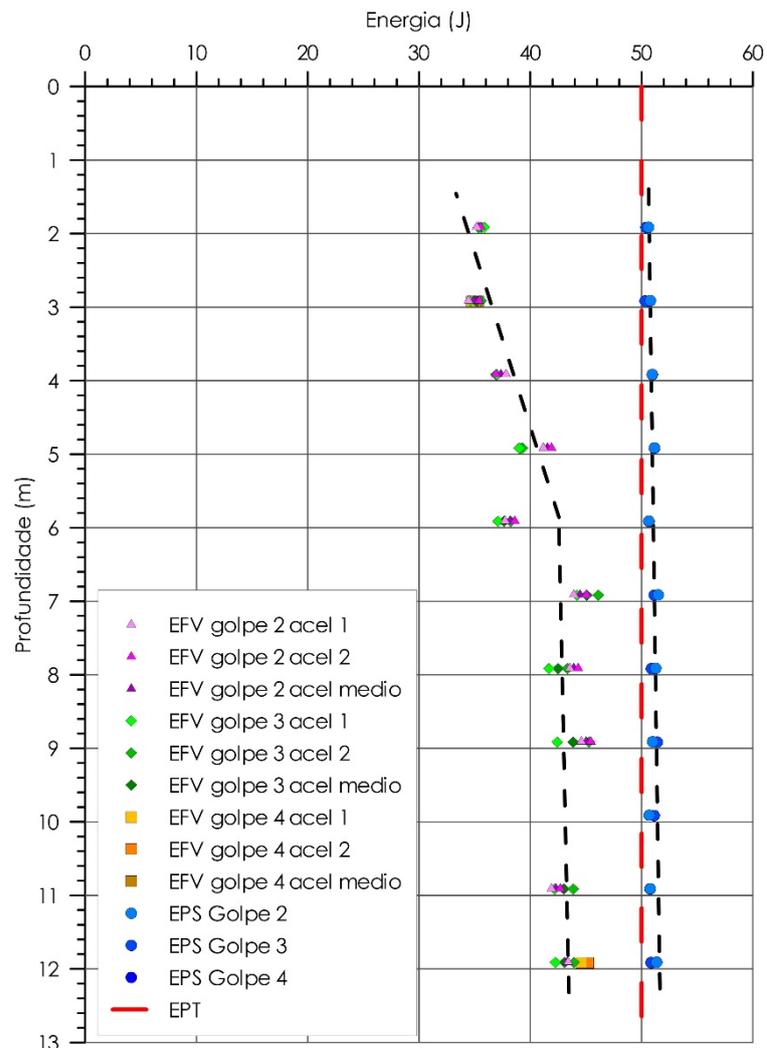
Fonte: arquivos pessoais do autor.

Essa discrepância nos valores pode estar relacionada ao fato de que antes de ser desferido o primeiro golpe do martelo em dada profundidade, o DPL precisou ser

manipulado para a colocação da haste instrumentada. Esta manipulação consistiu na retirada do conjunto de cabeça de bater, haste-guia e martelo, que precisaram ser soltos com auxílio de chave inglesa, seguido da colocação da haste instrumentada, que precisou ser rosqueada e posteriormente apertada com as chaves, e a recolocação do conjunto retirado, rosqueando-o e apertando-o com as chaves. Estas manobras podem ter flexionado as hastes, ou mesmo rotacionado-as, mudando a posição da ponteira ou ainda descolando-a do solo circuncidante, alterando as medidas de força e aceleração necessárias para a cravação do DPL. Em virtude disso, todos os primeiros golpes foram desprezados, mesmo os realizados às profundidades iniciais.

No gráfico da Figura 6.16 foram plotados os valores da energia potencial teórica, da energia potencial do sistema e os valores de energia obtidos para os dois acelerômetros e o valor médio deles, em função da profundidade corrigida dos golpes.

Figura 6.16 EFV e EPs obtidos em função da profundidade corrigida.



Fonte: o autor.

Considera-se que a energia potencial teórica  $EP_t$  é constante e igual 50J ao longo de toda a profundidade. Percebe-se pelo gráfico da Figura 6.16 que os valores da

energia potencial do sistema  $EP_s$  aumentam de valor com a profundidade, e tendem a ter um comportamento linear, se afastando ligeiramente da curva de  $EP_t$ . Como os valores de penetração permanente são sempre da ordem de milímetros (de 3 a 7 mm), o acréscimo de energia do sistema se dá essencialmente pelo acréscimo de massa representado pela inserção de novas hastes.

Os resultados da energia transmitida às hastes em função da profundidade apresentam dois comportamentos distintos. Até a profundidade de 5,9 m há um crescimento da energia calculada, com um comportamento linear.

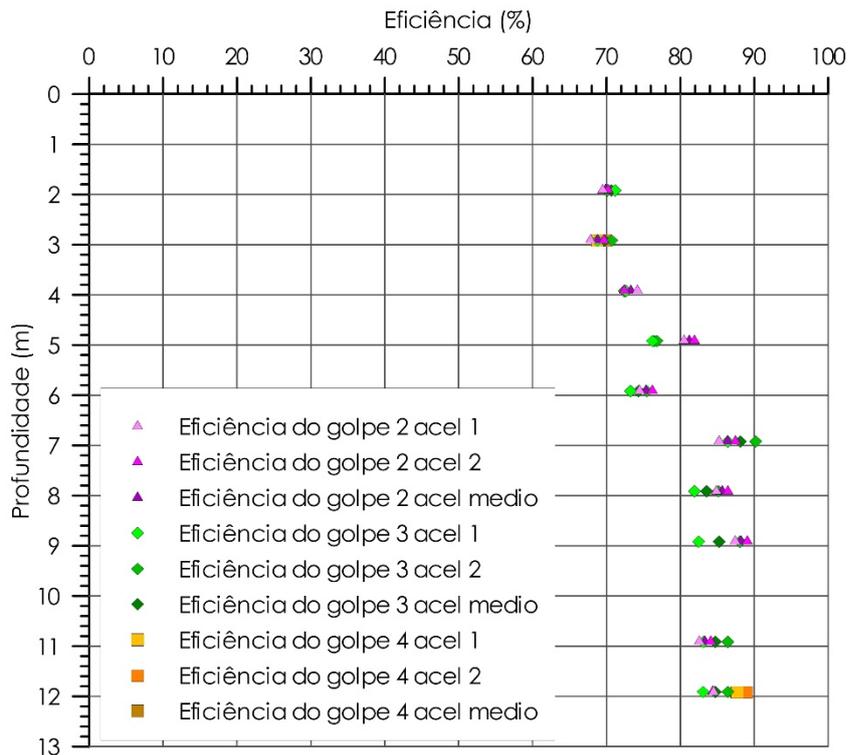
Isso pode ser explicado pelo fato de que quanto menor o comprimento da composição das hastes, a onda refletida chega mais rápido às hastes, interrompendo o processo de transferência de energia para o sistema. Também contribui para isso a presença da haste guia que provoca ondas adicionais com sinais contrários, e o aumento da impedância da ponteira.

Os resultados para profundidades iguais ou superiores a 5,9 m, os valores de  $EFV$  oscilam em torno de uma curva paralela à da energia potencial do sistema, indicando que a distância entre a curva de  $EFV$  e de  $EP_t$  permanece constante com o aumento da profundidade. Ou seja, a perda de energia no sistema aparenta ser constante e não depender do número de hastes do DPL a partir de uma dada profundidade.

Isso pode ser explicado pelo fato de que a partir de 5,9 m praticamente toda a onda de impacto já foi transmitida ao sistema.

O gráfico da Figura 6.17, que relaciona as eficiências em função da profundidade corrigida, corrobora a interpretação de que a partir da profundidade de 5,9 m a eficiência do sistema parece ser constante e em torno do valor médio de 83,6%.

Figura 6.17 Eficiência do sistema em função da profundidade corrigida.



Fonte: o autor.

Na profundidade de 9,90m existem sinais apenas do acelerômetro 1 para os golpes 2 e 3, pois os sinais do acelerômetro 2 foram prejudicados pelo fato dele estar solto no momento do impacto, o que impossibilitou inclusive de calcular um valor médio das acelerações para estes golpes.

### 6.4.3 FORÇA DINÂMICA MOBILIZADA.

Lukiantchuki (2012) mostra com base nos trabalhos de Odebrecht (2003) e Schnaid *et al.* (2009) que o trabalho  $W_s$  realizado para cravar o amostrador do SPT no solo corresponde à energia  $E_{amostrador}$  que o atinge, de acordo com a Eq. (6.1):

$$E_{amostrador} = W_s = Fd \cdot \rho \tag{Eq. (6.1)}$$

onde  $Fd$  é a força dinâmica de reação do solo e  $\rho$  é a penetração do amostrador no solo. Para determinar a força dinâmica de reação do solo à cravação do amostrador, tem-se:

$$Fd = \frac{E_{amostrador}}{\rho} \tag{Eq. (6.2)}$$

Lukiantchuki (2012) utiliza a proposta de Odebrecht (2003) para quantificar a energia que atinge o amostrador do SPT, como sendo uma parcela da energia potencial do sistema, de forma que analogamente no DPL podemos reescrever a Eq. (6.2) como:

$$Fd = \frac{\eta \cdot EP_s}{\rho} \quad \text{Eq. (6.3)}$$

onde  $\eta$  é um fator de eficiência. Até o impacto do martelo com a cabeça de bater, parte da energia potencial do sistema é dissipada de forma não conservativa, de modo que a energia calculada pelo método EFV no topo da composição pode ser definida como  $EFV = \eta_1 \cdot EP_s$ , onde  $\eta_1$  é a eficiência da energia transmitida às hastes pelo impacto do martelo. Em tese, até atingir o amostrador, parte dessa energia deve sofrer novo processo de dissipação não conservativa, de forma que  $E_{amostrador} = \eta_2 \cdot EFV$ . Assim tem-se que  $E_{amostrador} = \eta_2 \cdot \eta_1 \cdot EP_s$ , e que  $\eta = \eta_2 \cdot \eta_1$ .

Sancio e Bray (2005) afirma que para hastes curtas, com até 14m de comprimento, não são observadas diferenças significativas entre a energia  $EFV$  medida no topo da composição e a energia que efetivamente chega ao amostrador, podendo-se desprezar as perdas de energia, assim  $\eta_2 = 1$ .

Logo, assumindo que para o DPL os mesmos princípios podem ser válidos, a força dinâmica de reação à cravação da ponteira no solo pode ser determinada através da

$$Fd = \frac{EFV}{\rho} \quad \text{Eq. (6.4)}$$

Na Tabela 6.2 encontram-se consolidados valores de penetração permanente medida  $\rho$  os valores de energia transferida às hastes e os valores de força dinâmica calculados através da Eq. (6.4), registrados nas abas Resumo planilhas de saída do programa desenvolvido no MatLab®. Os valores de força dinâmica foram obtidos através da Eq. (6.4), sempre considerando a penetração permanente medida. Como na análise anterior, os registros relativos ao primeiro golpe foram excluídos.

Tabela 6.2 Resultados de força dinâmica para as profundidades de 1,9m a 11,9m.

z (m)	Golpe n	$z_{corr}$ (m)	$\rho$ (mm)	$EFV_1$ (J)	$EFV_2$ (J)	$EFV_M$ (J)	$Fd_1$ (kN)	$Fd_2$ (kN)	$Fd_M$ (kN)
1,9	2	1,911	6	35,19	35,56	35,37	5,86	5,93	<b>5,90</b>
	3	1,916	5	35,88	35,35	35,61	7,18	7,07	<b>7,12</b>
2,9	2	2,910	6	34,46	35,41	34,94	5,74	5,90	<b>5,82</b>
	3	2,914	<b>4</b>	34,62	35,57	<b>35,10</b>	8,65	8,89	<b>8,77</b>
	4	2,919	<b>5</b>	34,77	35,30	<b>35,03</b>	6,95	7,06	<b>7,01</b>
3,9	2	3,913	6	37,82	36,92	37,36	6,30	6,15	<b>6,23</b>
	3	3,919	6	37,02	36,91	36,93	6,17	6,15	<b>6,16</b>
4,9	2	4,912	6	41,18	41,90	41,54	6,86	6,98	<b>6,92</b>
	3	4,918	6	39,00	39,30	39,11	6,50	6,55	<b>6,52</b>
5,9	2	5,909	4	37,74	38,61	38,17	9,43	9,65	<b>9,54</b>

z (m)	Golpe n	$z_{corr}$ (m)	$\rho$ (mm)	$EFV_1$ (J)	$EFV_2$ (J)	$EFV_M$ (J)	$Fd_1$ (kN)	$Fd_2$ (kN)	$Fd_M$ (kN)
	3	5,913	4	37,11	38,23	37,66	9,28	9,56	<b>9,41</b>
6,9	2	6,912	6	43,90	45,05	44,48	7,32	7,51	<b>7,41</b>
	3	6,917	5	44,19	46,12	45,07	8,84	9,22	<b>9,01</b>
7,9	2	7,909	5	43,53	44,32	43,93	8,71	8,86	<b>8,79</b>
	3	7,913	4	41,69	43,34	42,51	10,42	10,84	<b>10,63</b>
8,9	2	8,909	4	44,58	45,43	45,01	11,15	11,36	<b>11,25</b>
	3	8,914	5	42,42	45,29	43,85	8,48	9,06	<b>8,77</b>
9,9	2	9,907	3	36,91			12,30		
	3	9,911	4	37,68			9,42		
10,9	2	10,907	3	41,91	42,69	42,30	13,97	14,23	<b>14,10</b>
	3	10,91	3	42,19	43,86	43,01	14,06	14,62	<b>14,34</b>
11,9	2	11,908	4	43,39	43,33	43,36	10,85	10,83	<b>10,84</b>
	3	11,911	3	42,25	43,94	43,09	14,08	14,65	<b>14,36</b>
	4	11,914	3	44,59	45,21	44,89	14,86	15,07	<b>14,96</b>

Fonte: o autor.

Nas planilhas geradas pelo programa desenvolvido no MatLab® também foram criadas abas com os resultados dos cálculos da força dinâmica (ou resistência dinâmica) através da aplicação da Eq. (3.40) do método CASE. Como o solo de Bauru é basicamente um solo formado por areia fina pouco argilosa (GIACHETI *et al.*, 2006), o instante  $t^*$  não necessitou da correção dada pela Eq. (3.41), e corresponde ao momento em que ocorre o primeiro máximo de  $F = Z \cdot v$  dos sinais analisados.

Na Tabela 6.3 encontram-se consolidados os resultados da aplicação do método CASE, gravados nas abas "CASE" das diversas planilhas, já excluindo os registros anteriormente discutidos.

Tabela 6.3 Resultados de força dinâmica para as profundidades de 1,9m a 11,9m, obtidos pelo método CASE.

z (m)	Golpe n	$z_{corr}$ (m)	$\ell$ (m)	t (ms)	$\Delta t = 2 \cdot \ell / c$ (ms)	$t + \Delta t$ (ms)	$Fd_1$ (kN)	$Fd_2$ (kN)	$Fd_M$ (kN)
1,9	2	1,911	2,265	0,740	0,896	1,635	6,26	6,23	6,24
	3	1,916	2,265	1,250	0,896	2,146	6,14	6,50	6,32
2,9	2	2,910	3,265	1,240	1,292	2,531	9,41	9,53	9,47
	3	2,914	3,265	1,198	1,292	2,490	11,22	11,30	11,26
	4	2,919	3,265	1,240	1,292	2,531	9,59	9,35	9,47
3,9	2	3,913	4,265	1,167	1,688	2,854	7,85	7,50	7,68
	3	3,919	4,265	1,167	1,688	2,854	8,90	8,81	8,85
4,9	2	4,912	5,265	1,344	2,083	3,427	10,06	9,55	9,81
	3	4,918	5,265	1,365	2,083	3,448	9,16	9,00	9,08
5,9	2	5,909	6,265	1,354	2,490	3,844	10,67	11,55	11,11
	3	5,913	6,265	1,146	2,490	3,635	11,20	12,23	11,71
6,9	2	6,912	7,265	1,281	2,885	4,167	10,20	10,96	10,58

z (m)	Golpe n	$z_{corr}$ (m)	$\ell$ (m)	t (ms)	$\Delta t = 2 \cdot \ell / c$ (ms)	$t + \Delta t$ (ms)	$Fd_1$ (kN)	$Fd_2$ (kN)	$Fd_M$ (kN)
7,9	3	6,917	7,265	1,156	2,885	4,042	10,18	11,35	10,76
	2	7,909	8,265	1,188	3,281	4,469	11,42	11,29	11,36
8,9	3	7,913	8,265	1,135	3,281	4,417	11,54	11,58	11,56
	2	8,909	9,265	1,229	3,677	4,906	13,40	13,30	13,35
9,9	3	8,914	9,265	1,354	3,677	5,031	12,40	13,13	12,76
	2	9,907	10,265	1,177	4,073	5,250	20,53		
10,9	3	9,911	10,265	1,188	4,073	5,260	19,08		
	2	10,907	11,265	1,406	4,469	5,875	13,32	13,73	13,53
11,9	3	10,91	11,265	1,167	4,469	5,635	13,71	14,87	14,29
	2	11,908	12,265	1,177	4,875	6,052	15,38	15,71	15,55
	3	11,911	12,265	1,135	4,875	6,010	15,44	16,14	15,79
	4	11,914	12,265	1,198	4,875	6,073	16,07	16,63	16,35

Fonte: o autor.

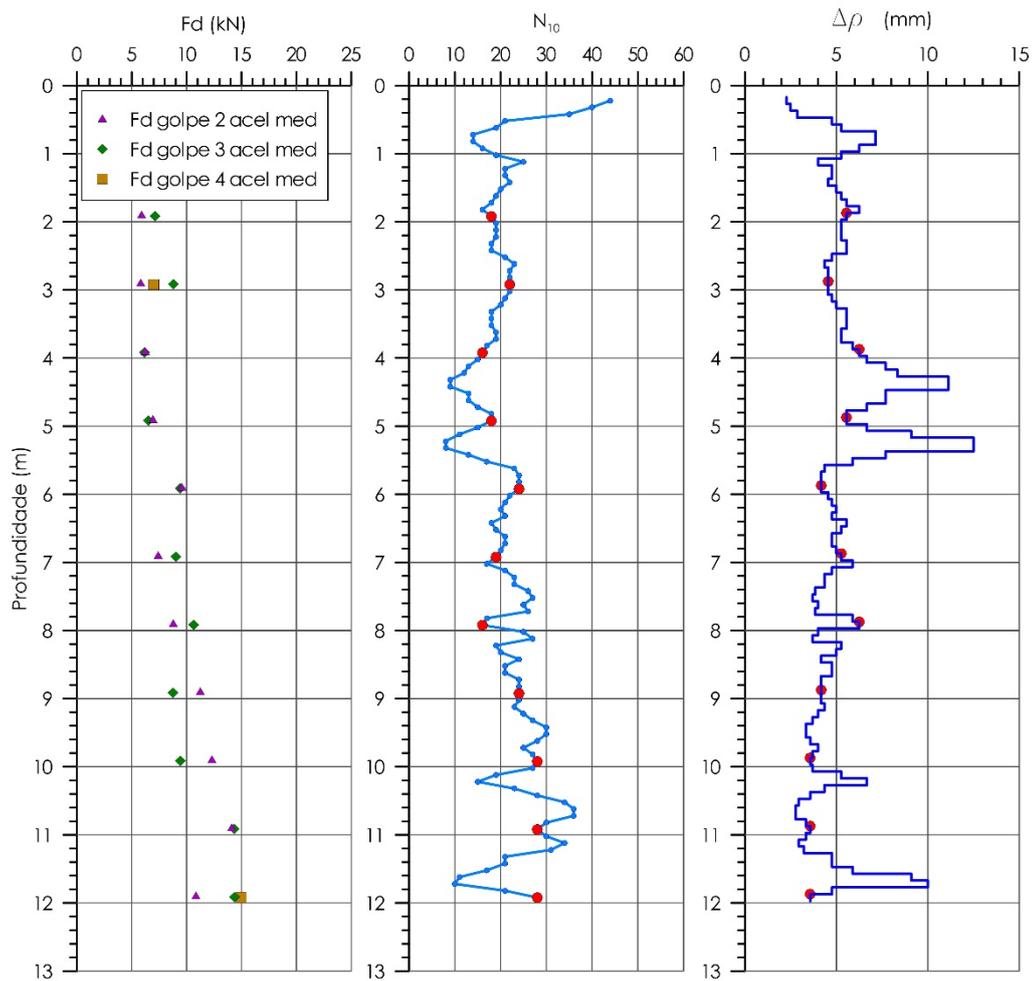
A força dinâmica  $Fd$  calculada pela Eq. (6.4) é muito sensível às variações da penetração permanente  $\rho$  da ponteira no solo, pois são grandezas inversamente proporcionais. Assim, é de se esperar que os resultados experimentais mostrem que o aumento da penetração permanente implique na diminuição da força dinâmica e vice-versa. Este fato pode ser observado nos golpes 3 e 4 realizados na profundidade base de 2,9 m. Para estes golpes, a energia EFV para a média dos acelerômetros  $EFV_M$  é praticamente a mesma para os dois golpes, porém o aumento da penetração permanente em 1 mm resultou na diminuição de 1,76 kN na força dinâmica para a média dos dois acelerômetros  $Fd_M$ .

A Figura 6.18 mostra os gráficos da força dinâmica para a média dos acelerômetros, do  $N_{10}$  e da penetração permanente média obtido pela Eq. (2.22) em função da profundidade. Fica claro que em uma dada profundidade base, se os golpes têm diferentes penetrações permanentes  $\rho$  medidas, os valores de  $Fd$  para cada golpe são bem distintos. Mas, quando a penetração permanente é a mesma a variação de  $Fd$  é insignificante, como ocorre nas profundidades de 3,9 m, 4,9 m, 5,9 m. e 10,9 m.

O comportamento de  $Fd$  para a média dos acelerômetros cresce com a profundidade de forma muito semelhante ao aumento de  $N_{10}$  para as mesmas profundidades, que encontram-se destacadas no gráfico.

Já os valores da penetração permanente média, obtidos para profundidades equivalentes, mostram um comportamento condizente com o inverso do comportamento de  $Fd$  e  $N_{10}$ , decaindo com a profundidade.

Figura 6.18 Força dinâmica,  $N_{10}$  e penetração permanente média ao longo da profundidade de ensaio.

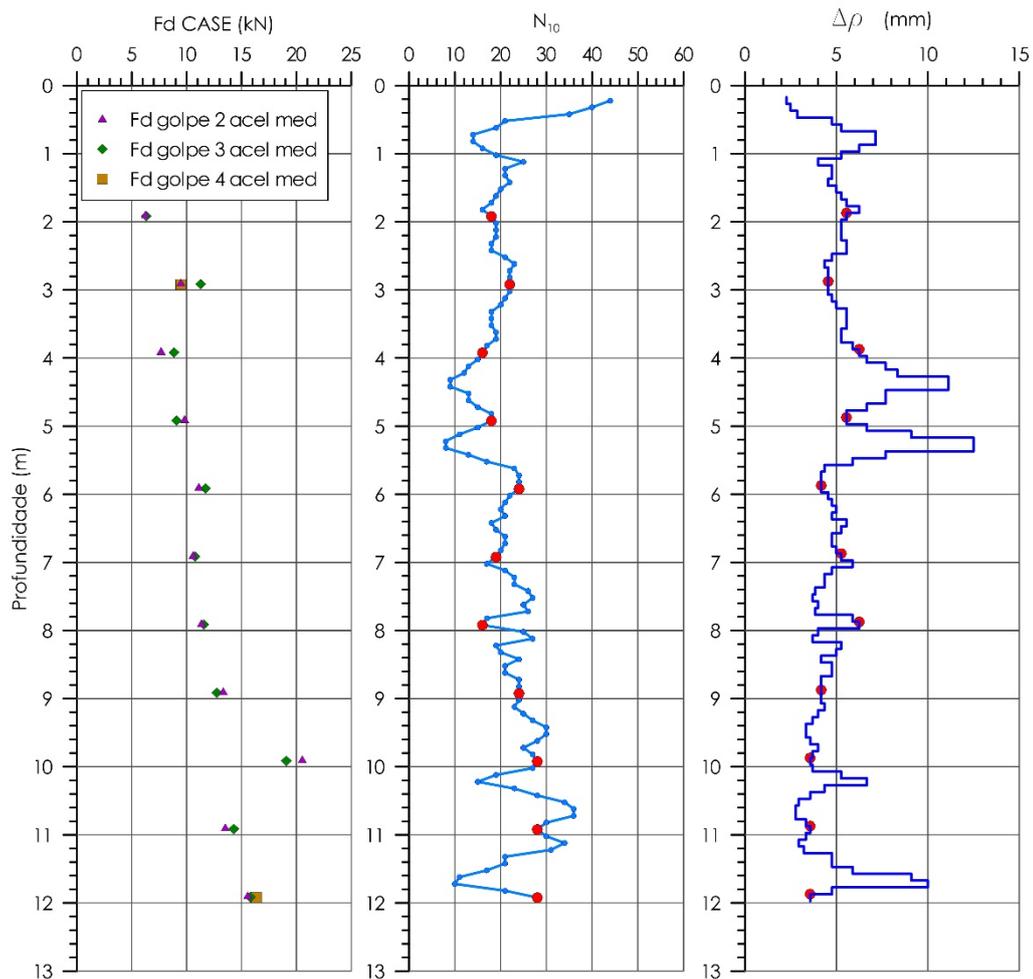


Fonte: o autor.

Há um aparente paralelismo entre os valores de  $F_d$  e os valores de  $N_{10}$  para as mesmas profundidades, mesmo que ao longo de cada metro de penetração, o comportamento de  $N_{10}$  varie muito.

Na Figura 6.19 encontramos os gráficos da força dinâmica calculada pelo método CASE através da Eq. (3.40) para a média dos acelerômetros, do  $N_{10}$  e da penetração permanente média calculada pela Eq. (2.22).

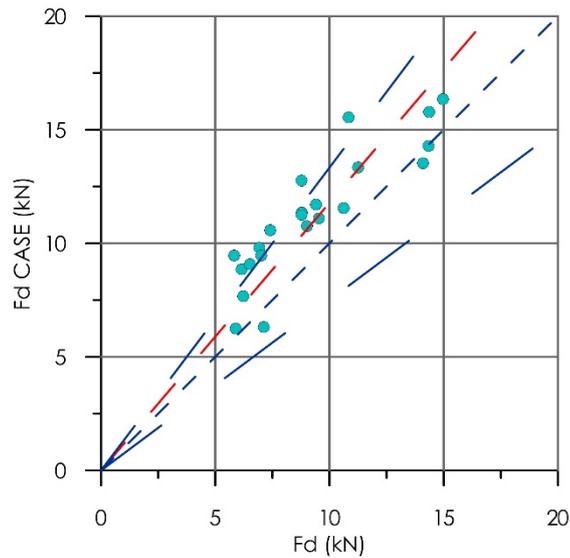
Figura 6.19 Força dinâmica pelo método CASE,  $N_{10}$  e penetração permanente média ao longo da profundidade de ensaio.



De modo geral, os resultados obtidos pelo método CASE para o valor médio dos acelerômetros aumenta com a profundidade, e não há grandes diferenças de valores obtidos para golpes consecutivos dados à mesma profundidade base, pois para este método, a influência da penetração permanente não existe.

Os valores obtidos pelo método CASE de modo geral são até 25% superiores aos valores da força dinâmica obtidos pela aplicação da Eq. (6.4), como pode ser observado no gráfico da Figura 6.20.

Figura 6.20 Comparação entre a força dinâmica obtida pelo método CASE e a obtida pela por pela energia.



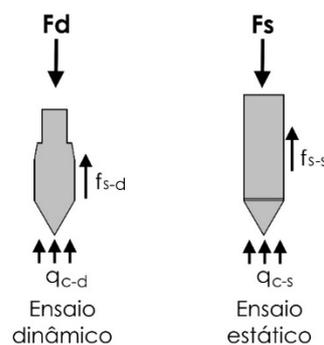
Fonte: o autor.

#### 6.4.4 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO.

Normalmente, ensaios dinâmicos e estáticos realizados simultaneamente em um mesmo solo, requerem valores diferentes de força estática e de força dinâmica para o avanço das ponteiros, o que implica necessariamente valores de resistência de ponta  $q_c$  e de atrito lateral  $f_s$  distintos entre os ensaios (Figura 6.21). Segundo Lukiantchuki (2012), os solos típicos da região de Bauru e de grande parte do interior do estado de São Paulo apresentam um comportamento que pode ser caracterizado como de solos porosos, colapsíveis e muitas vezes não saturados. Como apontado por Giacheti *et al.* (2006), o solo da região dos ensaios é formado por uma camada de areia fina, pouco argilosa e, conforme relatos, não saturada até 40m de profundidade.

Nestas situações, segundo Lukiantchuki (2012), os valores de força estática e de força dinâmica podem ser considerados iguais, desprezando-se os efeitos de viscosidade e de forças inerciais do solo.

Figura 6.21 Forças que atuam em ponteiros de ensaios dinâmico e em ensaios estáticos.



Fonte: o autor.

Nas situações em que a força dinâmica é igual à força estática, pode-se escrever:

$$Fd = Fs = q_c \cdot A_p + f_s \cdot A_l \quad \text{Eq. (6.5)}$$

onde, no caso do DPL,  $q_c$  é a resistência de ponta do DPL,  $A_p$  é a área de projetada da ponteira,  $f_s$  é o atrito lateral na parte cilíndrica da ponteira e  $A_l$  é a área da superfície lateral da ponteira do DPL.

#### 6.4.4.1 OBTENÇÃO DA RESISTÊNCIA DE PONTA E DO ATRITO LATERAL UTILIZANDO A FORÇA DINÂMICA.

Nilsson (2008) obtém a resistência de ponta  $q_c$  a partir da Eq. (2.20) que utiliza um valor da força dinâmica calculada pela fórmula dinâmica de Hiley, Eq. (2.23), e a Eq. (2.18) para obter o atrito lateral  $f_s$ .

Ao substituir a força dinâmica calculada pela fórmula de Hiley pela força dinâmica obtida através dos métodos dinâmicos, Eq. (6.4), e passando a utilizar a formulação proposta para o cálculo do atrito lateral, Eq. (4.14), chega-se a:

$$q'_c = \frac{Fd}{A_p} - f'_s \quad \text{Eq. (6.6)}$$

onde  $f'_s$  é o atrito lateral obtido pela Eq. (4.14) levando em consideração o torque medido,  $q'_c$  é a resistência de ponta obtida e  $Fd$  é a força dinâmica.

A força dinâmica conforme obtida na Eq. (6.4) considera a energia de um único golpe e a sua penetração permanente medida, que pode conter incertezas relativas ao posicionamento da trena a laser, o ponto para onde está apontada, etc. Para reduzir estas incertezas, a força dinâmica passou a ser calculada pela Eq. (6.7):

$$Fd = \frac{EFV_{MED}}{\Delta\rho} \quad \text{Eq. (6.7)}$$

onde  $EFV_{MED}$  é a energia média calculada para os golpes válidos à mesma profundidade e  $\Delta\rho$  é a penetração permanente média obtida a partir de  $N_{10}$  segundo a Eq. (2.22). Desta forma a Eq. (6.6) passa a ser escrita como:

$$q'_c = \frac{EFV_{MED}}{\Delta\rho \cdot A_p} - f'_s \quad \text{Eq. (6.8)}$$

#### 6.4.4.2 DETERMINAÇÃO DO ATRITO LATERAL.

Na Tabela AIII.1 do anexo III encontram-se relacionados os valores de torque máximo  $T_{Max}$  e torque residual  $T_{Res}$  medidos para o DPL durante os ensaios em Bauru para

as diversas profundidades. Os valores foram medidos a cada metro de profundidade, conforme explicado em 6.3.3.1.

A partir dos valores de torque máximo  $T_{MAX}$ , para cada profundidade foram calculados os valores de atrito lateral  $f_{s-TN}$  pela Eq. (2.18) de Nilsson (2008), considerando a área lateral total da ponteira com ápice de 60°. Através da Eq. (4.14) proposta neste trabalho, foram calculados os valores do atrito lateral  $f_{s-MAX}^*$  a partir dos valores de torque máximo  $T_{MAX}$  e do atrito lateral  $f_{s-RES}^*$  a partir dos valores do torque residual  $T_{RES}$ . Os resultados obtidos encontram-se relacionados na Tabela 6.4, abaixo.

Tabela 6.4 Atrito lateral calculado por Nilsson (2008) e Bastos et al. (2014)

z (m)	$T_{MAX}$ (Nm)	$T_{RES}$ (Nm)	$f_{s-TN}$		$f_{s-MAX}^*$		$f_{s-RES}^*$	
			(kPa)	(MPa)	(kPa)	(MPa)	(kPa)	(MPa)
1,90	3,0	3,0	30,64	0,0306	24,51	0,0245	24,51	0,0245
2,90	4,0	3,0	40,85	0,0409	32,69	0,0327	24,51	0,0245
3,90	4,0	4,0	40,85	0,0409	32,69	0,0327	32,69	0,0327
4,90	5,5	5,0	56,17	0,0562	44,94	0,0449	40,86	0,0409
5,90	6,0	5,0	61,28	0,0613	49,03	0,0490	40,86	0,0409
6,90	6,0	5,0	61,28	0,0613	49,03	0,0490	40,86	0,0409
7,90	6,5	6,0	66,38	0,0664	53,12	0,0531	49,03	0,0490
8,90	8,0	6,0	81,70	0,0817	65,37	0,0654	49,03	0,0490
9,90	8,0	7,0	81,70	0,0817	65,37	0,0654	57,20	0,0572
10,90	10,0	8,0	102,13	0,1021	81,72	0,0817	65,37	0,0654
11,90	10,0	8,0	102,13	0,1021	81,72	0,0817	65,37	0,0654

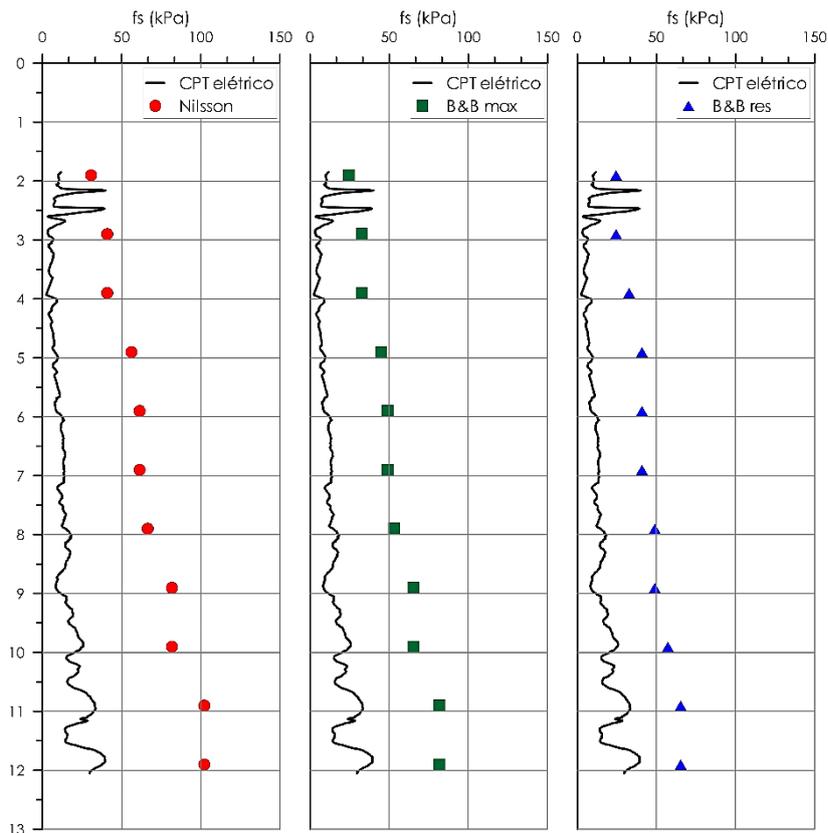
Fonte: o autor.

Nos gráficos da Figura 6.22, podemos observar os valores de atrito lateral calculados comparados ao atrito lateral medido pelo CPT elétrico realizado no mesmo dia.

Observa-se que o atrito lateral  $f_{s-TN}$  obtido pela Eq. (2.18) apresenta os valores mais altos em relação ao atrito lateral medido pelo CPT, enquanto que o atrito lateral  $f_{s-RES}^*$  apresentou os melhores resultados comparativamente.

Os valores de atrito lateral obtidos através das medidas de torque são maiores que os obtidos pelos ensaios de CPT. Uma possível razão para isso é o fato de que ao se medir o torque no DPL, toda a ponteira é rotacionada, o que significa que tanto a superfície da parte cilíndrica, quanto da parte cônica, contribui para o valor do atrito lateral, enquanto que no CPT a medida do atrito é feita somente pelo deslocamento vertical das luvas, e não existe contribuição da ponta cônica.

Figura 6.22 Comparativo do atrito lateral obtido por Nilsson (2008) e a formulação proposta com o atrito lateral medido pelo CPT Elétrico



Fonte: o autor

Quando se faz o ensaio de torque no DPL, entre o instante do último golpe antes do ensaio, e o instante do início das medidas com o torquímetro existe um intervalo de tempo no qual o solo se acomoda ao redor da ponteira e começa a aderir sobre sua superfície, aumentando o valor do torque necessário para iniciar o giro. Assim tem-se duas medidas feitas pelo torquímetro, o torque máximo, quando a força aplicada é suficiente para descolar a superfície da ponteira do solo que a circunda, e o torque residual, que é medido enquanto a ponteira já está em movimento rotacional. No CPT a medida do atrito lateral é feita de modo contínuo, de forma que não há tempo para que o solo possa aderir à luva da ponteira. Assim, o atrito lateral calculado a partir do torque residual, quando a ponteira está em movimentos, deve apresentar valores mais próximos ao atrito lateral medido no CPT.

Desta forma, se justifica a utilização do torque residual para se calcular o atrito lateral no DPL, que deve se assemelhar muito mais ao atrito lateral medido no CPT, o que pode ser verificado nos gráficos acima.

#### 6.4.4.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA TOTAL A PARTIR DA ENERGIA.

Dada a relação:

$$q'_C = \frac{Fd}{A_p} - f'_s \Rightarrow q'_T = \frac{Fd}{A_p} = q'_C + f'_s$$

considera-se que a parcela  $Fd/A_p$  corresponde à resistência total oferecida pelo solo ao avanço da ponteira do DPL. Em princípio, a energia  $E_{\text{Ponteira}}$  que chega à ponteira do DPL para ser convertida em trabalho de cravação deveria ser

$$E_{\text{Ponteira}} = \eta_2 \cdot EFV$$

onde  $EFV$  é a energia medida no topo da composição e  $\eta_2$  é um fator que refletiria as perdas de energia por dissipação não conservativa. Como discutido em 6.4.3, para hastes curtas essa perda é muito pequena podendo ser desprezada, logo  $\eta_2 = 1$  e assim  $E_{\text{Ponteira}} = EFV$ . Conseqüentemente a força dinâmica que atua na cravação da ponteira é dada pela Eq. (6.4), de forma que

$$q'_T = \frac{EFV_{\text{MED}}}{\Delta\rho \cdot A_p} \quad \text{Eq. (6.9)}$$

#### 6.4.4.4 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE PONTA.

As resistências de ponta  $q'_C$ , a partir da medida de energia, foram calculadas através da Eq. (6.6), considerando apenas os valores de energia calculados para a média dos acelerômetros, e apenas para os golpes válidos. Foram considerados os valores de atrito  $f'_s = f'_{s-TN}$ ,  $f'_s = f'_{s-MAX}$  e  $f'_s = f'_{s-RES}$ , para efeitos comparativos. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 Resistências de ponta obtidas de acordo com as formulações de Nilsson (2008) e da proposta neste trabalho com os valores de torque máximo e residual.

z (m)	$N_{10}$	$\Delta\rho$ (mm/golpe)	$EFV_{\text{MED}}$ (J)	Fd (kN)	$q'_T$ (MPa)	$q'_{C-TN}$ (MPa)	$q'_{C-MAX}$ (MPa)	$q'_{C-RES}$ (MPa)
1,9	18	5,56	35,02	6,30	6,19	6,16	6,17	6,17
2,9	22	4,55	37,15	8,17	8,03	7,99	8,00	8,00
3,9	16	6,25	37,15	5,94	5,84	5,80	5,81	5,81
4,9	18	5,56	40,33	7,26	7,13	7,08	7,09	7,09
5,9	24	4,17	37,91	9,10	8,94	8,88	8,89	8,90
6,9	19	5,26	44,77	8,51	8,36	8,30	8,31	8,32
7,9	16	6,25	43,22	6,92	6,79	6,73	6,74	6,74
8,9	24	4,17	44,43	10,66	10,48	10,39	10,41	10,43
10,9	28	3,57	42,65	11,94	11,73	11,63	11,65	11,67
11,9	28	3,57	43,78	12,26	12,04	11,94	11,96	11,98

Fonte: o autor.

Observa-se que não existe uma grande variabilidade dos resultados de resistência de ponta para uma mesma profundidade, pois as diferenças entre os valores

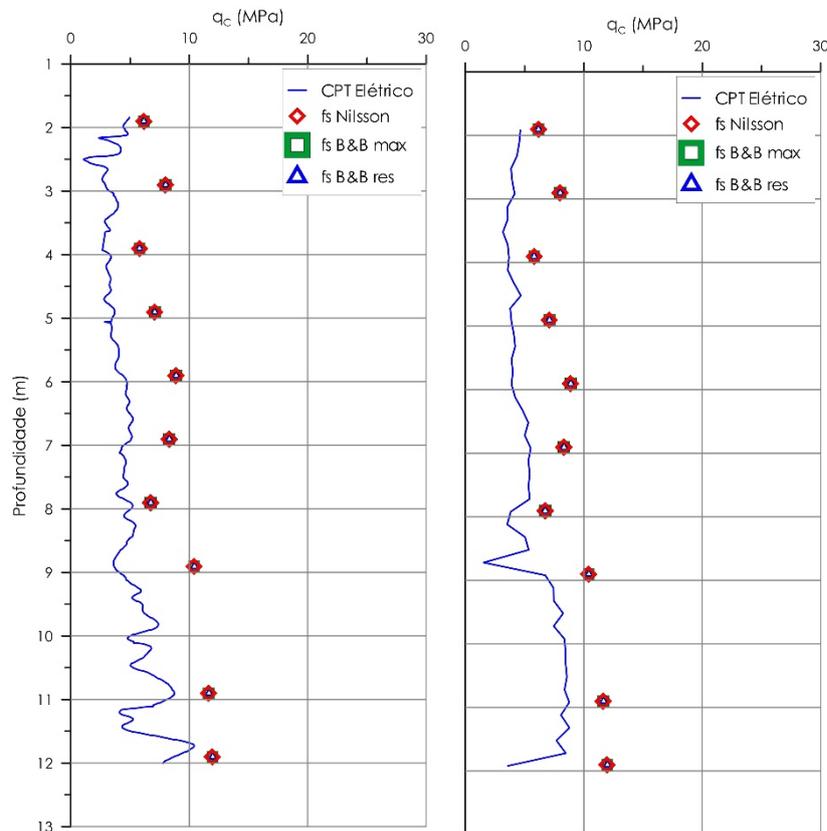
de atrito lateral encontram-se em KPa, enquanto que a resistência de ponta é medida em Mpa.

Como para a profundidade de 9,90m só puderam ser aproveitados os sinais de um acelerômetro, pois o segundo acelerômetro estava solto e assim não foi possível se estabelecer um valor de energia média para estes golpes. Assim sendo, para o restante da análise, não existirão resultados para esta profundidade.

Nos gráficos da Figura 6.23, pode-se comparar os resultados obtidos para as resistências de ponta  $q_{C-TN}^*$ ,  $q_{C-MAX}^*$  e  $q_{C-RES}^*$ , com os valores de resistência de ponta obtidos pelos ensaios CPT elétrico e CPT mecânico realizados no mesmo dia.

A comparação com a resistência de ponta obtida através do CPT mecânico é possível, pois a ponteira mecânica superestima somente as medidas de atrito lateral, e não as de resistência de ponta.

Figura 6.23 Resistência de ponta em função da profundidade.



Fonte: o autor.

Percebe-se que as resistências calculadas utilizando diferentes formulações para o atrito lateral não tem diferenças significativas entre si como esperado, pois os valores de atrito lateral são pequenos.

No entanto, comparando os resultados obtidos com os valores do CPT elétrico, ou mesmo do CPT Mecânico, constata-se os valores de  $q_{C-TN}^*$ ,  $q_{C-MAX}^*$  e  $q_{C-RES}^*$  são em geral um pouco superiores aos obtidos pelos ensaios CPT.

#### 6.4.4.5 USO DO ÁBACO PARA CLASSIFICAR O SOLO.

A classificação do solo ensaiado através do ábaco desenvolvido por Robertson *et al.* (1986) necessita de duas informações básicas: a resistência de ponta  $q_t$ , corrigida com relação aos efeitos da poropressão, conforme a Eq. (2.2), e a razão de atrito  $R_f$ , calculada de acordo com a Eq. (2.3). Como o nível d'água do local do ensaio não foi encontrado, a poropressão é zero, o que significa que  $q_t = q_c$ .

Na Tabela 6.6 encontram-se relacionados os valores do atrito lateral, da resistência de ponta e da razão de atrito em função da profundidade.

Tabela 6.6 Dados para a classificação do solo utilizando o ábaco de Robertson *et al.* (1986), considerando os diferentes atritos laterais utilizados.

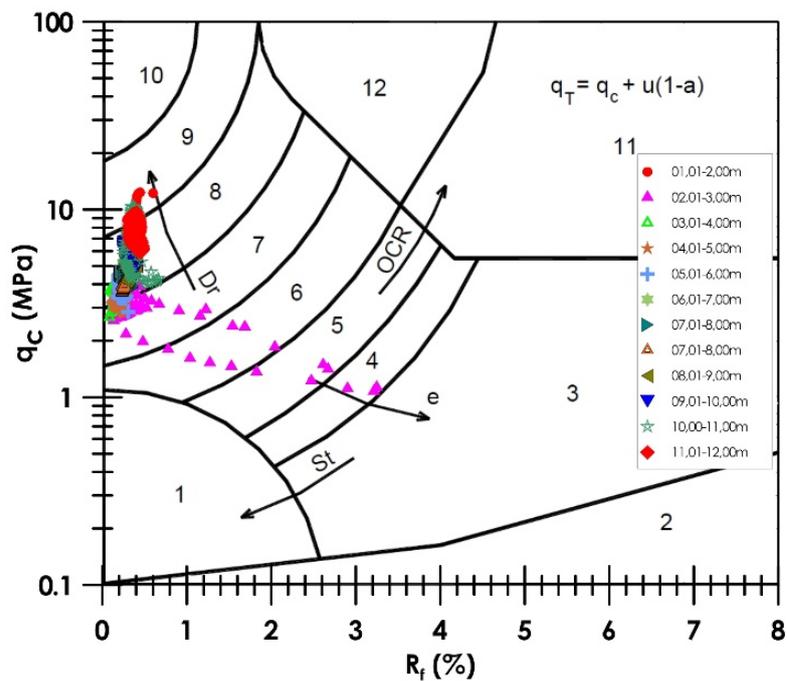
z (m)	fs tn (kPa)	qc tn (MPa)	Rf (%)	fs max (kPa)	qc max (MPa)	Rf (%)	fs res (kPa)	qc res (MPa)	Rf (%)
1,9	30,64	70,20	0,04	24,51	5,90	0,42	24,51	1,88	1,31
2,9	40,85	70,08	0,06	32,69	7,04	0,46	24,51	2,88	0,85
3,9	40,85	69,66	0,06	32,69	5,87	0,56	32,69	3,87	0,85
4,9	56,17	70,65	0,08	44,94	8,85	0,51	40,86	4,86	0,84
5,9	61,28	69,75	0,09	49,03	7,01	0,70	40,86	5,86	0,70
6,9	61,28	72,35	0,08	49,03	6,10	0,80	40,86	6,86	0,60
7,9	66,38	72,34	0,09	53,12	6,10	0,87	49,03	7,85	0,62
8,9	81,70	81,82	0,10	65,37	6,92	0,95	49,03	8,85	0,55
10,9	102,13	76,11	0,13	81,72	9,57	0,85	65,37	10,83	0,60
11,9	102,13	75,35	0,14	81,72	9,47	0,86	65,37	11,83	0,55

Fonte: o autor.

O ábaco apresentado na Figura 6.24, mostra a classificação dos diversos estratos do solo ensaiado, a partir dos dados coletados pelo CPT Elétrico. O solo está dividido em camadas sucessivas de 1 m, representadas por símbolos e cores diferentes.

De acordo com a classificação apresentada na Tabela 2.1, a maior parte destas camadas apresenta comportamento de areia siltosa a silte arenoso, areia a areia siltosa e areia, o que mostra que de fato o subsolo da região é predominantemente arenoso. Somente na camada que vai de 2,01 m a 3,00 m de profundidade o comportamento muda de areia siltosa à silte arenoso, para silte arenoso a silte argiloso, silte argiloso à argila siltosa e argila siltosa à argila. Este é o único estrato do solo em que se identifica o comportamento de argilas.

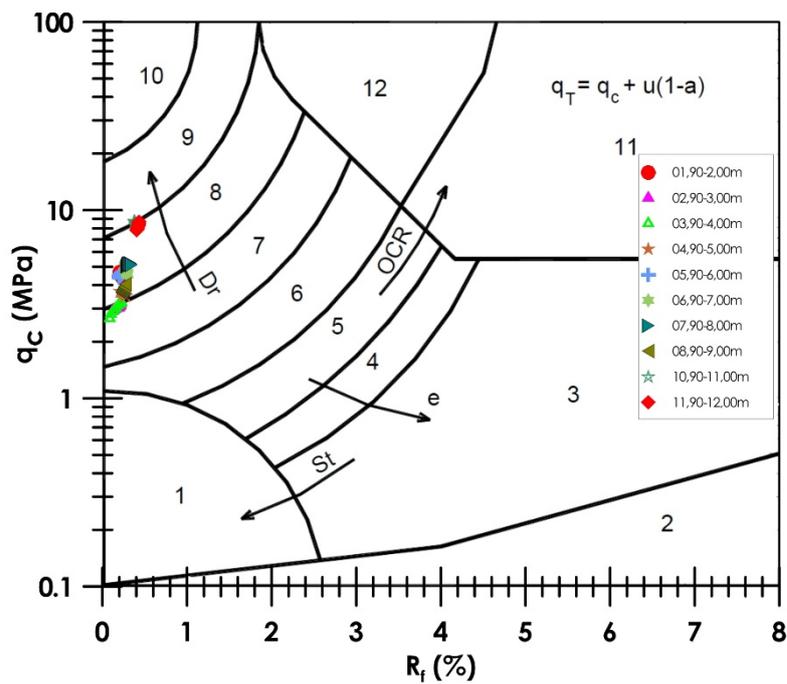
Figura 6.24 Classificação dos solos ensaiados em Bauru pelo CPT elétrico.



Fonte: o autor.

Na Figura 6.25 vemos a classificação a partir dos dados do CPT, para as profundidades de interesse apenas. Cabe notar que solos com comportamento argiloso desaparecem nesta visualização dos dados, pois a mesma é feita para cada metro de profundidade, não sendo contínua.

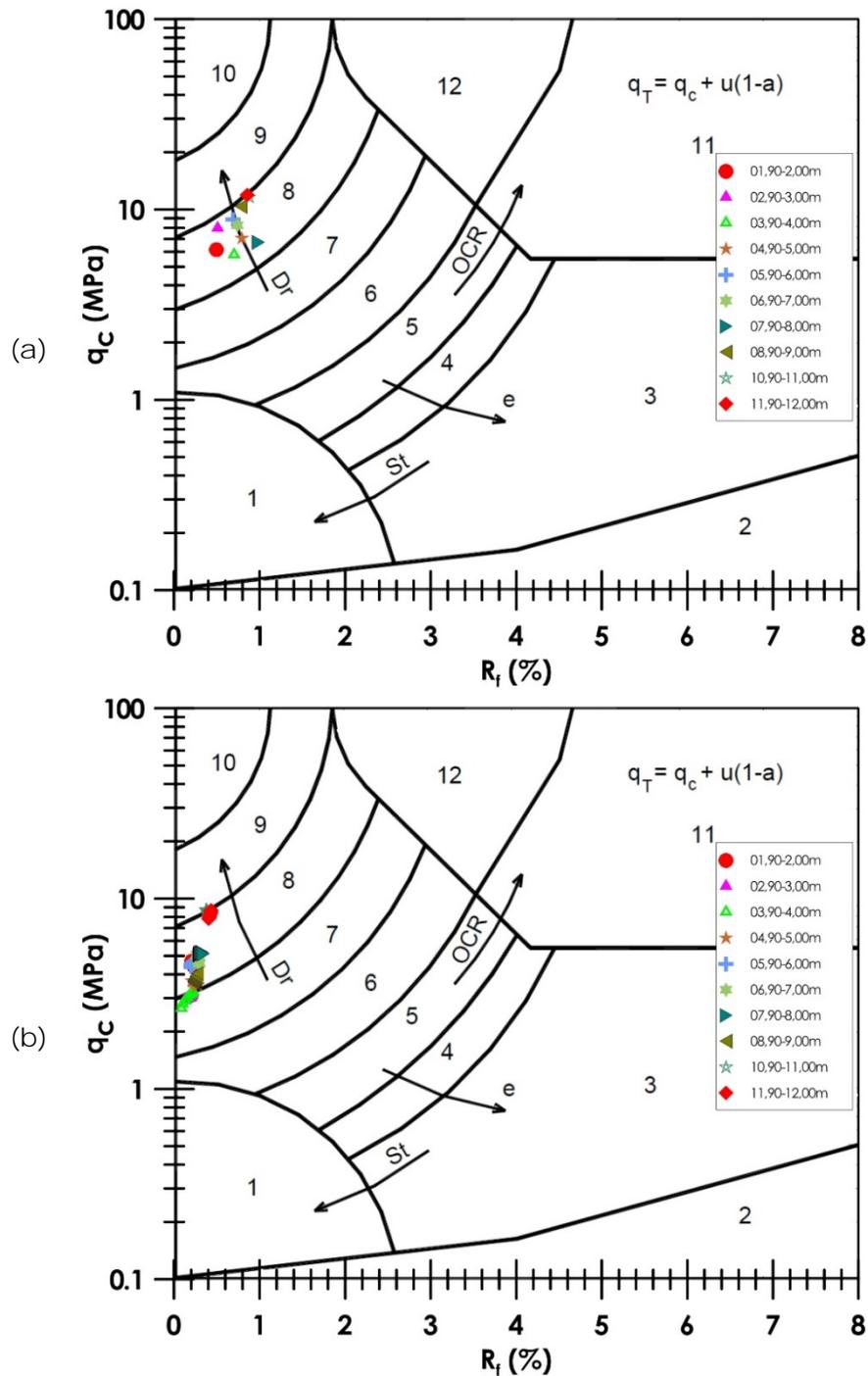
Figura 6.25 Classificação dos solos ensaiados em Bauru pelo CPT elétrico a cada metro.



Fonte: o autor.

Nos ábacos da Figura 6.26 pode-se comparar a classificação dos solos, onde é possível observar que os resultados obtidos pelo processo dinâmico utilizando o atrito lateral de Nilsson, Figura 6.26(a), são compatíveis com os resultados do CPT elétrico, Figura 6.26(b), porém não chega a classificar solos como areia siltosa à silte argiloso e os dados se afastam para a direita devido a razão de atrito  $R_f$  ser maior.

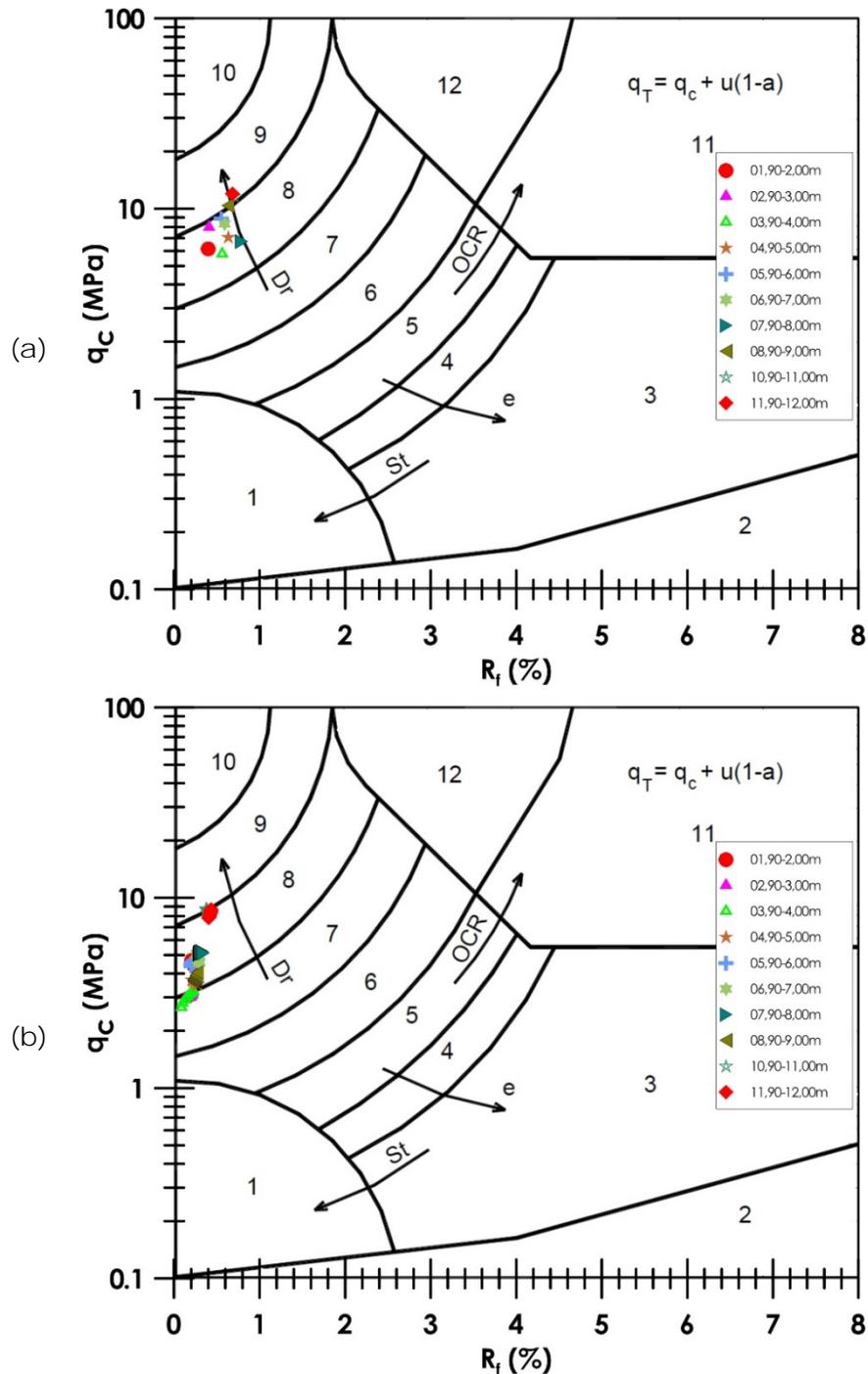
Figura 6.26 Comparativo de classificação do CPT com resultados dinâmicos do DPL considerando o atrito lateral de Nilsson (2008).



Fonte: o autor.

Pelos ábacos da Figura 6.27, observa-se que os resultados obtidos quando se usa a formulação aqui proposta para calcular o atrito lateral a partir do torque máximo, Figura 6.27(a), se aproximam mais dos resultados obtidos pelo CPT elétrico, Figura 6.27(b).

Figura 6.27 Comparativo de classificação do CPT com resultados dinâmicos do DPL considerando o atrito lateral calculado pelo torque máximo e a formulação proposta.

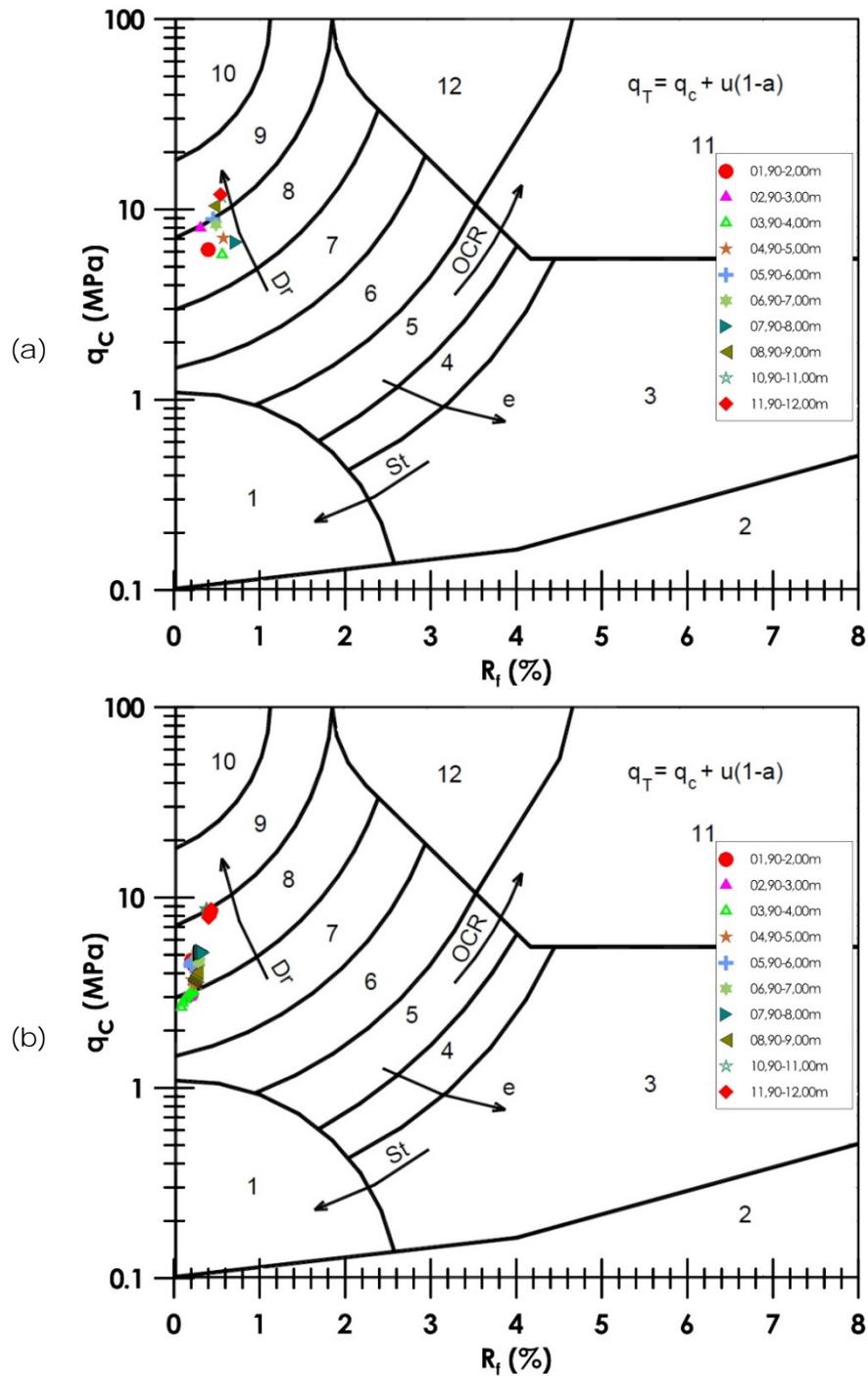


Fonte: o autor.

Os dados referentes às profundidades de 11,90m aqui são classificados como areia, quando pelo CPT elétrico ficam na fronteira entre areia e areia a areia siltosa.

Pelos ábacos da Figura 6.28 é possível constatar que ao calcular o atrito lateral pela formulação proposta, Figura 6.28(a), usando o torque residual, os resultados se aproximam dos obtidos pelo CPT elétrico, Figura 6.28(b), porém a classificação passa a conter mais pontos como sendo areia e não areia à areia siltosa. Em termos de Razão de atrito, é a classificação que melhor se adapta.

Figura 6.28 Comparativo de classificação do CPT com resultados dinâmicos do DPL considerando o atrito lateral calculado pelo torque residual e a formulação proposta.



Fonte: o autor.

A classificação do perfil do solo ensaiado através de métodos dinâmicos aplicados ao DPL é possível e se aproxima muito bem da classificação resultante do CPT elétrico.

No entanto, ao se comparar os ábacos elaborados por processos dinâmicos, com o da Figura 6.24 é fácil constatar que por fazer uma classificação a cada metro de profundidade, certamente existirão comportamentos que escaparão de serem classificados. Uma forma de minimizar isso seria passar a fazer o ensaio de torque a cada 20 cm de penetração, e não a cada metro. Com certeza isso aumenta o custo operacional do ensaio, mas deve melhorar significativamente a qualidade dos resultados apresentados.

Esta metodologia depende do conhecimento da energia envolvida nos golpes, que pode ser obtida por aproximação através da energia potencial do sistema e de um fator de eficiência para a queda do martelo, de forma que  $EFV = \eta \cdot EP_T$ .

## CONCLUSÕES

Este trabalho teve por principal objetivo interpretar o ensaio DPL com base em uma instrumentação dinâmica, utilizando a teoria da equação de onda.

Os principais resultados deste trabalho foram:

- Antes porém, foi a partir de ensaios realizados com 4 ponteiros com ângulos de ápices de 30°, 60°, 90° e 180°, foi possível constatar que não existem diferenças significativas no comportamento geomecânico das ponteiros de 60° e 90° e, assim sendo, a ponteira com ápice de 60° foi utilizada no presente trabalho para comparação direta com o CPT.
- Foi desenvolvido um programa em MatLab®, com base no desenvolvido por Morais (2014), que além de calcular força, velocidade, energia e deslocamentos por técnicas de integração, também efetua o cálculo da força dinâmica a partir do método CASE.
- Foi estabelecida uma nova equação que contabiliza os torques da parte cônica de uma ponteira do DPL, com sua parte cilíndrica, o que resultou em valores mais confiáveis do atrito lateral obtido a partir da medida do torque.
- Ficou demonstrado que torque residual sofre influência do peso da composição do DPL, e que a parte do atrito lateral devida ao cone é dependente do peso do sistema, fato este que necessita de maiores estudos.
- Os coxins mais adequados ao DPL, dentre os utilizados neste trabalho, são de borracha de poliuretano por apresentarem durabilidade e coeficiente de restituição alto.
- A força dinâmica obtida pelo método CASE na maioria das vezes foi superior à força dinâmica calculada por EFV.
- Na classificação dos solos, quando se usam valores de atrito lateral calculados a partir do torque residual, os resultados tendem a se aproximar mais dos resultados dados pelo CPT.
- As classificações para uma determinada profundidade obtidas pelo CPT e pelos métodos dinâmicos mostraram-se compatíveis na identificação do comportamento do solo.
- O atrito lateral obtido pelos métodos dinâmicos sempre é maior que o medido pelo CPT.

## BIBLIOGRAFIA.

ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, RJ, 1986.

\_\_\_\_\_. **NBR 12069 MB-3406**: Solo - Ensaio de penetração de cone in situ (CPT). Rio de Janeiro, RJ, 1991.

ALVES, A. M. D. L. et al. Métodos dinâmicos para previsão e controle do comportamento de estacas cravadas. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 4, n. 4, p. 12-21, Abril 2004 2004. ISSN 1677-3047.

ALVES FILHO, C. E. S. **Correlações para obtenção de parâmetros geotécnicos de argilas compressíveis com utilização do penetrômetro dinâmico leve**. 2010. 104 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia - Geotecnia de barragens) - Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2010.

ARAÚJO, M. G. **Avaliação de métodos de controle da cravação de estacas - aplicação a dois casos de obra**. 1988. Dissertação (Mestrado) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ

ASTM. **D5778-12**: Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils. West Conshohocken, PA, USA, 2012.

BASTOS, N. J. et al. Influência da geometria da ponta do penetrômetro dinâmico leve - DPL - na resistência à penetração e no atrito mobilizado. In: COBRAMSEG, 17, 2014, Goiânia, GO. **Anais**. Goiânia: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 2014.

BELINCANTA, A. **Energia dinâmica no SPT - Resultados de uma investigação teórico-experimental**. 1985. 262 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP

BERNARDES, G. P. **Dynamic and static testing of large model piles in sand**. 1989. 487 p. Doctor (Doctor of Engineering) - Department of Civil Engineering, Norwegian Institute of Technology, Trondheim

BREDENBERG, H. **Dynamic test loading of point bearing piles**. 1982. Doctor (Doctor of Engineering) - Royal Institute of Technology, Stockhol

CANTO, C. H. B. et al. Avaliação da variabilidade e de incertezas relacionadas aos resultados de ensaios executados com Penetrômetro Dinâmico Leve (DPL) em solos do estado do Paraná. In: COBRAMSEG, 14, 2008, Búzios. **Anais**.

CAVALCANTE, E. H. et al. Campos experimentais brasileiros. **Revista Luso-Brasileira de Geotecnia**, n. 111, p. 99-205, 2007.

CHELLIS, R. D. Pile-driving analysis. In:\_\_\_\_. **Pile Foundations**. 2 ed. ed. Tokio, Japan: McGraw-Hill Book Company, 1961. p.26-60.

DANZIGER, B. R. **Análise dinâmica da cravação de estacas**. 1991. 555 p. Tese (Doutorado) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ

DE RUITER, J. Electric penetrometer for site investigations. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 97, n. 2, p. 457-472, 1971. ISSN 0044-7994.

DIN. **4094-3**: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds. 1990.

FELLENIUS, B. H.; ESLAMI, A. Soil profile interpreted from CPTu data. Proceedings of Year 2000 Geotechnics Conference, Southeast Asian Geotechnical Society, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 2000. p.163-171.

FERREIRA, C. V. et al. Campo experimental de fundações em Bauru. In: SEFE III - 3º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 1996, São Paulo. **Anais**. São Paulo, SP, 1996. p.77-87.

FIGUEIREDO, L. C. et al. An overview on existing dynamic cone penetration test research related to the Central Area of Brazil. In: Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4, 2012, Porto de Galinhas, BA, Brazil. **Anais**. CRC Press. p.1669-1675.

GIACHETI, H. L. et al. Comparação entre resultados de ensaios sísmicos Down-Hole e Cross-Hole no Campo Experimental da UNESP de Bauru. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica-Cobramseg, 2006.

GIACHETI, H. L. et al. Comparação entre resultados de ensaios de penetração com os cones mecânico e elétrico em solos tropicais. **Solos & Rochas**, v. 27, p. 2, 2004.

GOBLE, G. G. et al. **Bearing capacity of piles from dynamic measurements**. Case Westerns Reserve University. Cleveland, OH, USA, p.76. 1975. (OHIO-DOT-05-75 Final Rpt.)

GOBLE, G. G. et al. The analysis of pile driving A state-of-the-art. In: International Seminar on the Application of Stress-Wave Theory on Piles 1980, Estocolmo, Suécia. **Anais**., 4-5 Junho. p.130-161.

GONÇALVES, C. et al. **Estacas pré-fabricadas de concreto: teoria e prática**. 1 ed. São Paulo: os autores, 2007. 616 p.

HASHMAT, A. **Correlation of Static Cone Penetration Test Results and Dynamic Probing Test Results**. 2000. 188 p. Dissertação - Division of Engineering Geology, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Delft, Netherlands

IBÁÑEZ, S. et al. Measuring energy in dynamic probing. In: Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4, 2012, Porto de Galinhas, BA, Brazil. **Anais**. CRC Press. p.399.

ISO. **22476-2**: Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 2: Dynamic Probing. 2005.

ISSMFE. International reference test procedures for dynamic probing (DP): Report of ISSMFE Technical Committee on Penetration Testing of Soils - TC 16 with Reference Test Procedures. 1989.

LAGO, A. L. et al. Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 3, p. 357-374, 2006. ISSN 0102-261X.

LOBO, B. D. O. **Mecanismos de penetração dinâmica em solos granulares**. 2009. 231 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS

LOWERY, L. L. et al. **Pile Driving Analysis-Simulation of Hammers, Cushions, Piles, and Soil**. Texas Transportation Insatitute, Texas A&M University, College Station. Texas. 1967

LUKIANCHUKI, J. A. **Interpretação de resultados do ensaio SPT com base em instrumentação dinâmica**. 2012. 364 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP

MASSARSCH, K. Cone Penetration Testing–A Historic Perspective, CPT14. In: ROBERTSON, P. K. e CABAL, K. L., 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing, Las Vegas, Nevada, USA, 2014, Las Vegas, Nevada, USA. p.97-134.

MORAIS, T. D. S. O. **Interpretação racional de resultados de ensaios SPT com base em instrumentação dinâmica**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP

NILSSON, T.; CUNHA, R. Advantages and equations for pile design in Brazil via DPL tests. INTERNATIONAL CONFERENCE ON SITE CHARACTERIZATION, 2004. p.1519-1523.

NILSSON, T. U. Comparações entre DPL Nilsson e SPT. In: GeoSul 2004: Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, 4, 2004a, **Anais**.

\_\_\_\_\_. O penetrômetro portátil DPL Nilsson. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 5, 2004b, São Paulo. **Anais**.

\_\_\_\_\_. Parameter approach from DPL test. In: International Conference on Site Characterization, 2008, Taipei, Taiwan. **Anais**. London, UK: Taylor et Francis Group, 2008.

NORTON, R. L. Embreagens e Freios. In:\_\_\_\_. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. p.959-986.

ODEBRECHT, E. **Medidas de energia no ensaio SPT**. 2003. 230 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS

ODEBRECHT, E. et al. Energy efficiency for standard penetration tests. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 131, n. 10, p. 1252-1263, 2005. ISSN 1090-0241.

PAES JUNIOR, N. S. **Avaliação do processo de de infiltração da água em solo residual de Biotita-Gnaise para superfícies com diferentes declividades utilizando Lisímetros**. 2013. 101 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, SP

ROBERTSON, P. K. Soil classification using the cone penetration test. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 27, n. 1, p. 151-158, 1990. ISSN 0008-3674.

ROBERTSON, P. K.; CABAL, K. L. **Guide to Cone Penetration Testing**. 3 ed. Signal Hill, CA, USA: Gregg Drilling & Testing, Inc., 2009. 115 p.

ROBERTSON, P. K. et al. Use of piezocone data. ASCE Spec. Conf. In Situ '86: Use of In Situ Tests in Geomechanical Eng., 1986, Blacksburg. p.1263-1280.

SANCIO, R. B.; BRAY, J. An assessment of the effect of rod length on SPT energy calculations based on measured field data. **Geotechnical Testing Journal**, v. 28, n. 1, p. 1-9, 2005. ISSN 0149-6115.

SANGLERAT, G. **The Penetrometer and Soil Exploration**. 1 ed. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1972. 464 p.

SANTOS JR, A. A. **Freios e Embreagens por Atrito**. ed. Campinas: FEM/UNICAMP, 2014. p. Disponível em: <  
<http://www.fem.unicamp.br/~lafer/em618/pdf/Freios%20e%20Embreagens.pdf> >.  
Acesso em: março 2014.

SCHAFER, R. W. What is a Savitzky-Golay filter? **Signal Processing Magazine, IEEE**, v. 28, n. 4, p. 111-117, 2011. ISSN 1053-5888.

SCHMERTMANN, J. H.; PALACIOS, A. Energy dynamics of SPT. **Journal of the Geotechnical Engineering Division - ASCE**, v. 105, n. 8, p. 909-926, Ago. 1979 1979. ISSN 0093-6405.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 223p p.

SCHNAID, F. et al. Prediction of soil properties from the concepts of energy transfer in dynamic penetration tests. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 135, n. 8, p. 1092-1100, 2009. ISSN 1090-0241.

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

SMITH, E. A. L. Pile-driving analysis by the wave equation. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, v. 86, p. 35-61, 1960.

TIMOSHENKO, S.; GOODIER, J. N. **Theory of Elasticity, by S. Timoshenko and J. N. Goodier**,. 2 ed. New York, NY: McGraw-Hill book Company, 1951. 506 p.

ŽARŽOJUS, G. et al. Energy Transfer Measuring in Dynamic Probing Test in Layered Geological Strata. **Procedia Engineering**, v. 57, p. 1302-1308, 2013. ISSN 1877-7058.

## ANEXO I COMPONENTES DO DPL.

Tabela A1.1 – Componentes do DPL modificado por Nilsson em 2001.

Qtd.	Massa Unit. (kg)	Descrição
1	4,06	Guia de 850 mm de comprimento e 25 mm de diâmetro, fabricado em aço, responsável por sustentar e direcionar o martelo.
1	10,00	Martelo com 165 mm de comprimento por 100 mm de diâmetro, fabricado em aço, responsável por fornecer a energia necessária à cravação da ponteira cônica após ser solto livremente a uma altura de 50ch do coxim.
1	1,90	Batente de 90 mm de comprimento e 57 mm de diâmetro, fabricado em aço, responsável pela transmissão da energia de queda do martelo ao conjunto de hastes e ponteira.
24	0,04	Parafusos comerciais M16 sem cabeça, com 35 mm de comprimento e encaixe hexagonal Allen de 8 mm, usados para unir o conjunto de hastes, ponteira, batente e haste guia.
14	3,10	Hastes fabricadas em aço, com 1000 mm de comprimento e 22 mm de diâmetro, usadas para conduzir e retirar a ponteira, e transmitir a esta tanto a energia de cravação quanto os giros
2	1,00	Ponteira fabricada em aço, com 100 mm de comprimento e 36 mm de diâmetro, tendo área projetada de 100 mm <sup>2</sup> , em formato de um cilindro acoplado a um cone com 90° de ângulo de ápice. É a peça a ser cravada no solo visando a determinação da resistência do mesmo.
1	6,42	Plataforma niveladora fabricada em aço, com 310 mm de comprimento e 150 mm de diâmetro, utilizada para manter o prumo das hastes ao mesmo tempo em que serve de referência para as leituras durante a cravação.
1	7,59	Cavalete extrator utilizado para a extração do conjunto de hastes e ponteira cravados no solo, fabricado em aço.
1	10,96	Viga extratora, reforçada por uma treliça e com 3 posições de apoio, de forma a ajustar o braço de alavanca, utilizada para a extração do conjunto de hastes e ponteira cravados no solo, fabricado em aço.
1	7,11	Prolongador para viga extratora, fabricado em aço.
1	1,00	Corrente de aço com argola em uma das extremidades, utilizada para a extração do conjunto de hastes e ponteira cravados no solo, fabricado em aço.
1	2,00	Torquímetro analógico com relógio, da marca TORK, com escala de 0 a 70 N.m, utilizado para medir o momento do giro na ponteira provocado através das hastes, de forma a medir diretamente a resistência entre o solo e a ponteira. Possui uma agulha morta (sem molas) que para no momento máximo.
2	0,70	Tubos em PVC utilizados para acomodar as hastes de aço.
2	8,00	Caixas confeccionadas em madeira para transportar o equipamento. Uma das caixas é alongada de forma a acondicionar as peças longas, como as hastes, a viga extratora, o prolongador e a haste guia. A Outra é uma caixa compacta para acondicionar os demais equipamentos.
10	0,05	Amortecedor de pinus, quadrado de 75 mm por 75 mm, espessura de 25 mm, furados no centro por broca de 27 mm, utilizados como coxim sobre o batente.
2	0,04	Arruelas de aço, com diâmetro externo de 60mm e furo central de 27 mm, utilizadas em conjunto com os amortecedores de pinus para formar o coxim sobre a cabeça de bater
1	0,11	Pote de vaselina utilizada para lubrificar e proteger os parafusos M16 e seus encaixes nas hastes de aço.

Qtd.	Massa Unit. (kg)	Descrição
1	0,09	Tubo de graxa de Lítio, grau NLGI-2, utilizada para lubrificar a haste guia, reduzindo o atrito desta com o martelo quando este encontra-se em queda livre, evitando assim perdas de energia
1	0,10	Régua nivel de bolha, utilizada para nivelar a plataforma niveladora e aprumar o sistema, de forma a possibilitar que a penetração da ponteira ocorra na vertical ou o mais próximo possível desta condição
1	0,06	Chave Allen 8 mm, utilizada na montagem/desmontagem do equipamento
1	0,65	Chave 19 mm, utilizada na montagem/desmontagem do equipamento
1	0,08	Soquete ½"/Allen 8 mm, utilizado na montagem/desmontagem do equipamento

Fonte: o autor.

## ANEXO II DADOS DO DPL MEDIDOS EM LABORATÓRIO.

Tabela All.1 – Massas medidas dos componentes do DPL modificado por Nilsson em 2001.

Componente	Massa		Oservações
	(g)	(kg)	
cabeça de bater	1681,50	1,682	
haste	2964,60	2,965	com 1 parafuso roscado
haste guia	3248,50	3,249	com 2 parafusos roscados
haste guia e cabeça de bater	4930,00	4,930	com 1 parafuso roscado
martelo	10055,00	10,055	
ponteira de 60°	545,00	0,545	com 1 parafuso roscado

Fonte: o autor.

Tabela All.2 – Diâmetros medidos dos componentes do DPL modificado por Nilsson em 2001.

Componente	Diâmetro		Oservações
	(mm)	(m)	
cabeça de bater	56,2	0,0562	diâmetro médio
haste	22,3	0,0223	diâmetro médio
haste guia	25,5	0,0255	diâmetro médio
martelo	0,0	0,0000	diâmetro externo médio
ponteira de 60°	36,0	0,0360	diâmetro médio

Fonte: o autor.

Tabela All.3 – Raios calculados dos componentes do DPL modificado por Nilsson em 2001.

Componente	Raio (m)
cabeça de bater	0,0281
haste	0,0112
haste guia	0,0128
martelo	0,0000
ponteira de 60°	0,0180

Fonte: o autor.

Tabela All.4 - Comprimentos medidos dos componentes do DPL modificado por Nilsson em 2001.

Componente	Comprimento		Observações
	(mm)	(m)	
cabeça de bater	90,0	0,090	comprimento médio
haste	1000,0	1,000	comprimento médio
haste guia	838,0	0,838	comprimento médio
martelo	165,0	0,165	comprimento médio
parte cilíndrica da ponteira	36,1	0,036	comprimento médio
parte cônica da ponteira	31,2	0,031	comprimento médio
ponteira de 60°	115,0	0,115	comprimento médio
haste instrumentada	250,0	0,250	comprimento médio

Fonte: o autor.

Tabela All.5 – Áreas transversais calculadas dos componentes do DPL modificado por Nilsson em 2001.

Componente	Área	OBS
	(m <sup>2</sup> )	
cabeça de bater	0,002481	
haste	0,000391	
haste guia	0,000511	
martelo	0,000000	
ponteira de 60°	0,001018	área projetada do cone

Fonte: o autor.

Tabela All.6 – Áreas laterais calculadas dos componentes do DPL modificado por Nilsson em 2001.

Componente	Área
	(m <sup>2</sup> )
parte cilíndrica da ponteira	0,004083
parte cônica da ponteira	0,002037

Fonte: o autor.

## ANEXO III DADOS COLETADOS E TABELADOS NA CAMPANHA DE ENSAIOS DE BAURU.

Tabela AIII.1 - Dados coletados durante o ensaio CPT mecânico.

z	RP	RP+RL	q <sub>c</sub>	f <sub>s</sub>	R <sub>f</sub>	I <sub>f</sub> =q <sub>c</sub> /f <sub>s</sub>	RT	Q <sub>t</sub>	Q <sub>st</sub>
(m)	(kg*10)	(kg*10)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(%)	(kg)	(kg*10)	(kN)	(kN)
0,12	215	226	215,14	9,07	4,22	23,73	0	0	0
0,32	124	260	124,28	1,67	1,34	74,57	0	0	0
0,52	84	109	84,28	1,33	1,58	63,21	0	0	0
0,72	65	85	65,28	0,53	0,81	122,39	0	0	0
0,92	59	67	59,28	0,87	1,47	68,40	0	0	0
1,12	50	63	50,28	0,67	1,33	75,41	0	0	0
1,32	45	55	45,41	0,20	0,44	227,07	0	0	0
1,52	43	46	43,41	0,47	1,08	93,03	0	0	0
1,72	42	49	42,41	0,67	1,58	63,62	0	0	0
1,92	46	56	46,41	0,47	1,01	99,46	0	0	0
2,12	45	52	45,41	0,47	1,04	97,32	0	0	0
2,32	43	50	43,55	0,47	1,08	93,33	0	0	0
2,52	38	45	38,55	0,47	1,22	82,61	0	0	0
2,72	39	46	39,55	0,33	0,83	118,66	0	0	0
2,92	41	46	41,55	0,33	0,79	124,66	0	0	0
3,12	35	40	35,55	0,47	1,32	76,18	0	0	0
3,32	35	42	35,69	0,40	1,12	89,23	0	0	0
3,52	31	37	31,69	0,47	1,48	67,91	0	0	0
3,72	35	42	35,69	0,47	1,32	76,48	0	0	0
3,92	36	43	36,69	0,67	1,83	55,04	0	0	0
4,12	35	45	35,69	0,67	1,88	53,54	0	0	0
4,32	40	50	40,83	0,60	1,47	68,05	0	0	0
4,52	46	55	46,83	0,73	1,56	63,86	0	0	0
4,72	37	48	37,83	0,33	0,87	113,48	0	0	0
4,92	38	43	38,83	0,40	1,03	97,07	0	0	0
5,12	40	46	40,83	0,60	1,47	68,05	0	0	0
5,32	41	50	41,97	0,73	1,74	57,23	0	0	0
5,52	38	49	38,97	0,27	0,69	146,12	0	0	0
5,72	39	43	39,97	0,53	1,33	74,94	0	0	0
5,92	38	46	38,97	0,53	1,36	73,06	0	0	0
6,12	41	49	41,97	0,80	1,91	52,46	0	0	0
6,32	47	59	48,10	0,73	1,52	65,60	0	0	0
6,52	52	63	53,10	0,80	1,51	66,38	0	0	0
6,72	49	61	50,10	0,60	1,20	83,51	0	0	0
6,92	54	63	55,10	0,93	1,69	59,04	0	0	0
7,12	52	66	53,10	0,93	1,75	56,90	0	0	0
7,32	53	67	54,24	1,07	1,97	50,85	0	0	0

z	RP	RP+RL	q <sub>c</sub>	f <sub>s</sub>	R <sub>f</sub>	I <sub>f</sub> =q <sub>c</sub> /f <sub>s</sub>	RT	Q <sub>t</sub>	Q <sub>st</sub>
(m)	(kg*10)	(kg*10)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kg/cm <sup>2</sup> )	(%)	(kg)	(kg*10)	(kN)	(kN)
7,52	52	68	53,24	0,73	1,37	72,60	0	0	0
7,72	53	64	54,24	0,60	1,11	90,40	0	0	0
7,92	37	46	38,24	1,00	2,62	38,24	0	0	0
8,12	34	49	35,24	0,87	2,47	40,66	0	0	0
8,32	49	62	50,38	0,67	1,33	75,57	0	0	0
8,52	52	62	53,38	0,73	1,37	72,79	0	0	0
8,72	14	25	15,38	0,80	5,20	19,23	0	0	0
8,92	66	78	67,38	0,73	1,08	91,88	0	0	0
9,12	73	84	74,38	1,40	1,88	53,13	0	0	0
9,32	73	94	74,52	1,27	1,70	58,83	0	0	0
9,52	81	100	82,52	1,33	1,61	61,89	0	0	0
9,72	73	93	74,52	1,87	2,51	39,92	0	0	0
9,92	82	110	83,52	1,67	2,00	50,11	0	0	0
10,12	83	108	84,52	1,93	2,28	43,72	0	0	0
10,32	83	112	84,66	2,80	3,31	30,23	0	0	0
10,52	84	126	85,66	2,40	2,80	35,69	0	0	0
10,72	82	118	83,66	1,60	1,91	52,29	0	0	0
10,92	86	110	87,66	2,00	2,28	43,83	0	0	0
11,12	79	109	80,66	2,13	2,64	37,81	0	0	0
11,32	86	118	87,79	1,93	2,20	45,41	0	0	0
11,52	75	104	76,79	1,87	2,44	41,14	0	0	0
11,72	83	111	84,79	1,27	1,50	66,94	0	0	0
11,92	34	53	215,14	9,07	4,22	23,73	0	0	0

Fonte: o autor.

Tabela AIII. 2 - Valores de N<sub>10</sub> coletados durante o ensaio DPL "in situ".

Prof (m)	N <sub>10</sub>										
0,1		2,1	19	4,1	13	6,1	21	8,1	27	10,1	19
0,2	44	2,2	19	4,2	12	6,2	20	8,2	19	10,2	15
0,3	40	2,3	18	4,3	9	6,3	21	8,3	20	10,3	23
0,4	35	2,4	18	4,4	9	6,4	18	8,4	24	10,4	28
0,5	21	2,5	21	4,5	13	6,5	19	8,5	21	10,5	34
0,6	19	2,6	23	4,6	13	6,6	21	8,6	21	10,6	36
0,7	14	2,7	22	4,7	15	6,7	21	8,7	24	10,7	36
0,8	14	2,8	22	4,8	18	6,8	20	8,8	24	10,8	30
0,9	16	2,9	22	4,9	18	6,9	19	8,9	24	10,9	28
1,0	19	3,0	22	5,0	15	7,0	17	9,0	24	11,0	30
1,1	25	3,1	21	5,1	11	7,1	21	9,1	23	11,1	34
1,2	21	3,2	20	5,2	8	7,2	23	9,2	25	11,2	31

Prof (m)	$N_{10}$										
1,3	21	3,3	18	5,3	8	7,3	23	9,3	27	11,3	21
1,4	22	3,4	18	5,4	13	7,4	26	9,4	30	11,4	21
1,5	20	3,5	18	5,5	17	7,5	27	9,5	30	11,5	17
1,6	19	3,6	19	5,6	23	7,6	25	9,6	28	11,6	11
1,7	18	3,7	19	5,7	24	7,7	26	9,7	25	11,7	10
1,8	16	3,8	17	5,8	24	7,8	17	9,8	27	11,8	21
1,9	18	3,9	16	5,9	24	7,9	16	9,9	28	11,9	28
2,0	19	4,0	15	6,0	22	8,0	25	10,0	27	12,0	

Fonte: o autor.

Tabela AIII. 3 - Deslocamentos medidos nos golpes instrumentados no ensaio "in situ" do DPL.

Prof (m)	$L_0$ (m)	$L_1$ (m)	$L_2$ (m)	$L_3$ (m)	$L_4$ (m)
0,9	0,435	0,429	0,422	0,417	
1,9	0,433	0,428	0,422	0,417	
2,9	0,432	0,428	0,422	0,418	0,413
3,9	0,434	0,427	0,421	0,415	
4,9	0,435	0,429	0,423	0,417	
5,9	0,459	0,430	0,425	0,421	0,417
6,9	0,433	0,427	0,421	0,416	
7,9	0,437	0,433	0,428	0,424	
8,9	0,437	0,432	0,428	0,423	
9,9	0,435	0,431	0,428	0,424	
10,9	0,430	0,426	0,423	0,420	
11,9	0,436	0,432	0,428	0,425	0,422

Fonte: o autor.

Tabela AIII. 4 - Deslocamentos medidos nos golpes instrumentados no ensaio "in situ" do DPL, para análise dos coxins.

Coxim	$L_0$ (m)	$L_1$ (m)	$L_2$ (m)
Borracha de poliuretano de 4 mm	0,421	0,418	0,415
Borracha comum de 3 mm	0,414	0,408	0,406
Madeira Pinus quadrado de 25 mm	0,447	0,443	0,439

Fonte: o autor.

Tabela AIII. 5 - Medidas de torque máximo e residual obtidas durante o ensaio "in situ" do DPL.

Prof (m)	T <sub>max</sub> (un)	T <sub>res</sub> (un)
0,9	0,40	0,30
1,9	0,30	0,30
2,9	0,40	0,30
3,9	0,40	0,40
4,9	0,55	0,50
5,9	0,60	0,50
6,9	0,60	0,50
7,9	0,65	0,60
8,9	0,80	0,60
9,9	0,80	0,70
10,9	1,00	0,80
11,9	1,00	0,80

Fonte: o autor.

## ANEXO IV SOFTWARE DE TRATAMENTO DE DADOS.

```
%{
=====
PROGRAMA.....: DPL_Energy vs 2.0
AUTOR.....: Nélio José Bastos
CRIADO EM....: Maio 2015
OBSERVAÇÕES..: Programa desenvolvido com base no software de Thaise da
                Silva Oliveira Moraes (USP - São Carlos)
MODIFICAÇÕES.: *** de 03 a 05 de julho de 2015 ***
                (1) possibilita ajustar a base line a partir do gráfico de
                    velocidades;
                (2) integra as velocidades para calcular os deslocamentos;
                (3) cálculo de  $F_d = \text{Energia} / \text{deslocamento}$  e de  $F_d$  pelo método
                    CASE;
                (4) melhorias na estrutura lógica do programa;
=====
%}
clear all;

% DEFINIÇÕES BÁSICAS
T          = 1/96000; % período de amostragem (s)
Z          = 15.5;   % impedância das hastes
anvil_mass = 1.6815; % massa da cabeça de bater (kg)
rod_mass   = 2.9646; % massa de uma haste (kg)
guide_mass = 3.2485; % massa da haste guia (kg)
hammer_mass = 10.055; % massa do martelo (kg)
tip_mass   = 0.545; % massa da ponteira (kg)
instr_mass = 0.840; % massa da haste instrumentada (kg)
tip_length = 0.115; % comprimento da ponteira
rod_length = 1.0;   % comprimento das hastes (m)
instr_length = 0.25; % comprimento da haste instrumentada (m)
g_accel    = 9.81; % aceleração da gravidade (m/s^2)
v_onda    = 5031; % velocidade de propagação da onda de tensão (m/s)

while 1

    % IMPORTAÇÃO DO ARQUIVO DE DADOS
    clc;
    nome_arq_dados = input('Arquivo de dados (.asc).....: ','s');
    quant_hastes   = input('Qual a quantidade de hastes do ensaio.: ');
    desloc_medido  = input('Qual a penetração medida do DPL (m)...: ');
    dados_lidos = load(nome_arq_dados);
    [nro_reg, nro_col] = size(dados_lidos);

    % EFETUA O CORTE DOS DADOS
```

```
% determina o ponto de corte inicial dos sinais, pelo sinal de força
for reg = 1:1:nro_reg
    if dados_lidos(reg,1)>0.5
        break
    end
end
while (reg>1)&&(dados_lidos(reg,1)>0)
    reg = reg-1;
end
if reg>50
    reg_ini = reg-50;
else
    reg_ini = 1;
end

% determina o ponto de corte final dos sinais, pelo sinal de força
for reg = nro_reg:-1:1
    if dados_lidos(reg,1)>1
        break
    end
end
while (reg<nro_reg)&&(dados_lidos(reg,1)>0)
    reg=reg+1;
end
if reg<nro_reg
    reg_fim = reg-1;
else
    reg_fim = nro_reg;
end

% corta o sinal
for reg = 0:1:(reg_fim-reg_ini)
    dados(reg+1,1) = dados_lidos(reg_ini+reg,1); % coluna 1 = força
    dados(reg+1,2) = dados_lidos(reg_ini+reg,2); % coluna 2 = acelerômetro 1
    dados(reg+1,3) = dados_lidos(reg_ini+reg,3); % coluna 3 = acelerômetro 2
end

% PREPARA AMBIENTE DE PROCESSAMENTO
clear dados_lidos;
[nro_reg, nro_colunas] = size(dados);
aceleracoes = zeros(nro_reg,3); % matriz das acelerações a serem
processadas
velocidades = zeros(nro_reg,3); % matriz das velocidades calculadas
deslocamentos = zeros(nro_reg,3); % matriz dos deslocamentos calculados
forca_calc = zeros(nro_reg,3); % matriz das forças calculadas
energia = zeros(nro_reg,3); % matriz das energias calculadas
```

```
energia_maxima = zeros(1,3);           % matriz para o máximo de energia
efic_energia    = zeros(1,3);           % matriz para a eficiência da energia
forca           = dados(:,1);           % matriz das forças lidas
corrige_BL      = 1;                    % flag para correção da Base Line
for reg = 1:1:nro_reg
    tempo(reg,1) = (reg-1)*T;           % matriz de tempos
end

% EXIBE OS SINAIS SELECIONADOS E SELECIONA QUAIS SERÃO PROCESSADOS
% plota os sinais
graf1 = figure('Name','Sinais Lidos','PaperOrientation','landscape');
subplot(3,1,1);
plot(tempo,dados(:,1),'k'), xlabel('tempo (s)'), ylabel('Força (kN)'), grid
on, xlim([0 0.07]);
subplot(3,1,2);
plot(tempo,dados(:,2),'b'), xlabel('tempo (s)'), ylabel('Acel 1 (m/s^2)'),
xlim([0 0.07]), grid on;
subplot(3,1,3);
plot(tempo,dados(:,3),'r'), xlabel('tempo (s)'), ylabel('Acel 2 (m/s^2)'),
xlim([0 0.07]), grid on;

% seleciona os sinais a serem processados
proc_sinais = menu('Acelerômetros para processar', 'SOMENTE 1', 'SOMENTE 2',
'AMBOS', 'NENHUM');

% verifica se algum sinal será processado
if proc_sinais~=4
    % prepara o vetor de acelerações de acordo com os sinais selecionados
    if (proc_sinais==1)|| (proc_sinais==3)
        aceleracoes(:,1) = dados(:,2);
    end
    if (proc_sinais==2)|| (proc_sinais==3)
        aceleracoes(:,2) = dados(:,3);
    end
    if proc_sinais==3
        aceleracoes(:,3) = (dados(:,2)+dados(:,3))/2;
    end

% INTEGRA OS SINAIS E CALCULA VELOCIDADES E FORÇAS');
for reg = 2:1:nro_reg
    if (proc_sinais == 1)|| (proc_sinais == 3)
        aux = (aceleracoes(reg-1,1)+aceleracoes(reg,1))/2*T;
        velocidades(reg,1) = velocidades(reg-1,1)+aux;
        forca_calc(reg,1) = velocidades(reg,1)*Z;
    end
    if (proc_sinais == 2)|| (proc_sinais == 3)
```

```
        aux = (aceleracoes(reg-1,2)+aceleracoes(reg,2))/2*T;
        velocidades(reg,2) = velocidades(reg-1,2)+aux;
        forca_calc(reg,2) = velocidades(reg,2)*Z;
    end
    if (proc_sinais == 3)
        aux = (aceleracoes(reg-1,3)+aceleracoes(reg,3))/2*T;
        velocidades(reg,3) = velocidades(reg-1,3)+aux;
        forca_calc(reg,3) = velocidades(reg,3)*Z;
    end
end
end

while 1

    % CALCULA ENERGIA=FORÇA x VELOCIDADE
    % integra F x V (notar que converte a força de kN para N)
    for reg = 2:1:nro_reg
        if (proc_sinais == 1) || (proc_sinais == 3)
            aux = (dados(reg-1,1)*1000*velocidades(reg-1,1) +
dados(reg,1)*1000*velocidades(reg,1))/2*T;
            energia(reg,1) = energia(reg-1,1)+aux;
        end
        if (proc_sinais == 2) || (proc_sinais == 3)
            aux = (dados(reg-1,1)*1000*velocidades(reg-1,2) +
dados(reg,1)*1000*velocidades(reg,2))/2*T;
            energia(reg,2) = energia(reg-1,2)+aux;
        end
        if (proc_sinais == 3)
            aux = (dados(reg-1,1)*1000*velocidades(reg-1,3) +
dados(reg,1)*1000*velocidades(reg,3))/2*T;
            energia(reg,3) = energia(reg-1,3)+aux;
        end
    end
end

    % INTEGRAÇÃO DA VELOCIDADE PARA A OBTENÇÃO DOS DESLOCAMENTOS
    for reg=2:1:nro_reg
        if (proc_sinais == 1) || (proc_sinais == 3)
            aux = (velocidades(reg-1,1)+velocidades(reg,1))/2*T*1000;
            deslocamentos(reg,1) = deslocamentos(reg-1,1)+aux;
        end
        if (proc_sinais == 2) || (proc_sinais == 3)
            aux = (velocidades(reg-1,2)+velocidades(reg,2))/2*T*1000;
            deslocamentos(reg,2) = deslocamentos(reg-1,2)+aux;
        end
        if (proc_sinais == 3)
            aux = (velocidades(reg-1,3)+velocidades(reg,3))/2*T*1000;
            deslocamentos(reg,3) = deslocamentos(reg-1,3)+aux;
        end
    end
end
```

```

        end
    end

    % PLOTA OS RESULTADOS CALCULADOS - graf2, graf3 e graf 4
    nome_grafico =
nome_arq_dados(max(findstr(nome_arq_dados,'\')+1:findstr(nome_arq_dados, '.ASC')-
1);

    % plota dados do acelerômetro 1
    if (proc_sinais == 1) || (proc_sinais == 3)
        graf2 = figure('Name','Resultados para acelerômetro
1','PaperOrientation','landscape');
        hold on;

        subplot(3,1,1);
        plot(tempo,dados(:,1),'k','LineWidth',1), xlabel('tempo (s)'),
ylabel('Força (kN)'), grid on, grid minor, xlim([0 0.07]), ylim([-40 40]);
        title(strcat(nome_grafico,' - Resultados do acelerômetro 1'));
        hold on;
        plot(tempo,forca_calc(:,1),'b','LineWidth',1);
        legend('Força medida','ZV');

        subplot(3,1,2);
        plot(tempo,deslocamentos(:,1),'b','LineWidth',.5), xlabel('tempo
(s)'), ylabel('Deslocamento (mm)'), grid on, grid minor, xlim([0 0.07]), ylim([0
10]);

        legend('Acelerômetro 1','Location','NorthEast');

        subplot(3,1,3);
        plot(tempo,energia(:,1),'b','LineWidth',.5), xlabel('tempo (s)'),
ylabel('Energia (J)'), grid on, grid minor, xlim([0 0.07]), ylim([0 50]);
        legend('Energia medida','Location','SouthEast');
    end

    % plota dados do acelerômetro 2
    if (proc_sinais == 2) || (proc_sinais == 3)
        graf3 = figure('Name','Resultados para acelerômetro
2','PaperOrientation','landscape');
        hold on;

        subplot(3,1,1);
        plot(tempo,dados(:,1),'k','LineWidth',1), xlabel('tempo (s)'),
ylabel('Força (kN)'), grid on, grid minor, xlim([0 0.07]), ylim([-40 40]);
        title(strcat(nome_grafico,' - Resultados do acelerômetro 2'));
        hold on;
        plot(tempo,forca_calc(:,2),'b','LineWidth',1);
        legend('Força medida','ZV');
    end

```

```

        subplot(3,1,2);
        plot(tempo,deslocamentos(:,2),'b','LineWidth',.5), xlabel('tempo
(s)'), ylabel('Deslocamento (mm)'), grid on, grid minor, xlim([0 0.07]), ylim([0
10]);

        legend('Acelerômetro 2','Location','NorthEast');

        subplot(3,1,3);
        plot(tempo,energia(:,2),'b','LineWidth',.5), xlabel('tempo (s)'),
ylabel('Energia (J)'), grid on, grid minor, xlim([0 0.07]), ylim([0 50]);
        legend('Energia medida','Location','SouthEast');
    end

    % plota dados da média dos acelerômetros
    if (proc_sinais == 3)
        graf4 = figure('Name','Resultados para média dos
acelerômetros','PaperOrientation','landscape');
        hold on;

        subplot(3,1,1);
        plot(tempo,dados(:,1),'k','LineWidth',1), xlabel('tempo (s)'),
ylabel('Força (kN)'), grid on, grid minor, xlim([0 0.07]), ylim([-40 40]);
        title(strcat(nome_grafico,' - Resultados da média dos
acelerômetros'));
        hold on;
        plot(tempo,forca_calc(:,3),'b','LineWidth',1);
        legend('Força medida','ZV');

        subplot(3,1,2);
        plot(tempo,deslocamentos(:,3),'b','LineWidth',.5), xlabel('tempo
(s)'), ylabel('Deslocamento (mm)'), grid on, grid minor, xlim([0 0.07]), ylim([0
10]);

        legend('Média dos acelerômetros','Location','NorthEast');

        subplot(3,1,3);
        plot(tempo,energia(:,3),'b','LineWidth',.5), xlabel('tempo (s)'),
ylabel('Energia (J)'), grid on, grid minor, xlim([0 0.07]), ylim([0 50]);
        legend('Energia medida','Location','SouthEast');
    end

    % VERIFICAÇÃO DO BASE LINE
    if corrige_BL
        if (menu('Corrige o Base Line? ','SIM','NÃO')==1)
            % EFETUA CORREÇÕES DE BASE LINE'
            if (proc_sinais == 1)||(proc_sinais == 3)
                BL_eq = polyfit(tempo, velocidades(:,1), 1);
            end
        end
    end

```

```

        BL_vl = polyval(BL_eq, tempo);
        BL_eq = [ BL_vl(nro_reg)/tempo(nro_reg), 0];
        BL_vl = polyval(BL_eq, tempo);
        velocidades(:,1)=velocidades(:,1)-BL_vl;
        forca_calc(:,1) = velocidades(:,1)*Z;
        close(graf2);
    end
    if (proc_sinais == 2)|| (proc_sinais == 3)
        BL_eq = polyfit(tempo, velocidades(:,2), 1);
        BL_vl = polyval(BL_eq, tempo);
        BL_eq = [ BL_vl(nro_reg)/tempo(nro_reg), 0];
        BL_vl = polyval(BL_eq, tempo);
        velocidades(:,2)=velocidades(:,2)-BL_vl;
        forca_calc(:,2) = velocidades(:,2)*Z;
        close(graf3);
    end
    if (proc_sinais == 3)
        BL_eq = polyfit(tempo, velocidades(:,3), 1);
        BL_vl = polyval(BL_eq, tempo);
        BL_eq = [ BL_vl(nro_reg)/tempo(nro_reg), 0];
        BL_vl = polyval(BL_eq, tempo);
        velocidades(:,3)=velocidades(:,3)-BL_vl;
        forca_calc(:,3) = velocidades(:,3)*Z;
        close(graf4);
    end
    else
        break
    end
    corrige_BL=0;
else
    break
end
end

% VERIFICA A GERAÇÃO DAS PLANILHAS
if (menu('Exporta para o Excel?', 'SIM', 'NÃO')==1);
    % CALCULA A ENERGIA DO SISTEMA
    energia_sistema=
(hammer_mass*g_accel*0.5)+(hammer_mass+guide_mass+anvil_mass+(quant_hastes*rod_ma
ss)+tip_mass+instr_mass)*g_accel*desloc_medido;

    % OBTÉM MÁXIMOS DE ENERGIA E CALCULA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
    if (proc_sinais == 1)|| (proc_sinais == 3)
        energia_maxima(1,1) = max(energia(:,1));
        efic_energia(1,1) = energia_maxima(1,1)/energia_sistema*100;
    end
end

```

```

if (proc_sinais == 2) || (proc_sinais == 3)
    energia_maxima(1,2) = max(energia(:,2));
    efic_energia(1,2) = energia_maxima(1,2)/energia_sistema*100;
end
if (proc_sinais == 3)
    energia_maxima(1,3) = max(energia(:,3));
    efic_energia(1,3) = energia_maxima(1,3)/energia_sistema*100;
end

% obtém parâmetros para método CASE
[Fd, reg_ini] = max(forca);
ti          = tempo(reg_ini);
tf          =          ti+2*(tip_length+(instr_length-
0.1)+rod_length*quant_hastes)/v_onda;
reg_fim = reg_ini;
while tempo(reg_fim+1)<tf
    reg_fim=reg_fim+1;
end
tf = tempo(reg_fim);

% GERA AS PLANILHAS
% obtém nome da planilha do MS-EXCEL a ser gravada
nome_arq_excel          =
nome_arq_dados(max(findstr(nome_arq_dados, '\'))+1:findstr(nome_arq_dados, '.ASC')-
3);

nome_arq_excel = strcat('SAIDA_DPL_1\ ', nome_arq_excel, '.xlsx');
golpe          = nome_arq_dados(findstr(nome_arq_dados, '.ASC')-1);
cel            = strcat('A', num2str(str2num(golpe)+2));

% grava resumo do processamento
data_export = {'Prof', 'Golpe', 'Forca max', 'Desloc', 'E sist', 'E max
1', 'E max 2', 'E max M', 'Efic 1', 'Efic 2', 'Efic M', 'Fd 1', 'Fd 2', 'Fd 3';
              '(m)', 'n', '(kN)', '(mm)', '(J)', '(J)',
, '(J)', '(J)', '(%)', '(%)', '(%)', '(kN)', '(kN)', '(kN)'};
xlswrite(nome_arq_excel, data_export, 'Resumo', 'A1');
data_export          = zeros(1,14);
data_export(:, 1) = quant_hastes-0.1;
data_export(:, 2) = str2num(golpe);
data_export(:, 3) = max(forca);
data_export(:, 4) = desloc_medido*1000;
data_export(:, 5) = energia_sistema;
data_export(:, 6) = energia_maxima(1,1);
data_export(:, 7) = energia_maxima(1,2);
data_export(:, 8) = energia_maxima(1,3);
data_export(:, 9) = efic_energia(1,1);
data_export(:,10) = efic_energia(1,2);

```

```

data_export(:,11) = efic_energia(1,3);
if (proc_sinais == 1)|| (proc_sinais == 3)
    data_export(:,12) = (energia_maxima(1,1)/desloc_medido)/1000;
end
if (proc_sinais == 2)|| (proc_sinais == 3)
    data_export(:,13) = (energia_maxima(1,2)/desloc_medido)/1000;
end
if (proc_sinais == 3)
    data_export(:,14) = (energia_maxima(1,3)/desloc_medido)/1000;
end
xlswrite(nome_arq_excel, data_export, 'Resumo', cel);

% grava resumo do n todo CASE
data_export = {'Prof', 'Golpe', 'l' , 't' , 'F(t)', 'ZV(t)_1',
'ZV(t)_2', 'ZV(t)_3', 't+dt', 'F(t+dt)', 'ZV(t+dt)_1', 'ZV(t+dt)_2', 'ZV(t+dt)_3',
'Rd_1', 'Rd_2', 'Rd_3';
                '(m)', 'n' , '(m)', '(s)', '(kN)', '(kN)' , '(kN)'
, '(kN)' , '(s)' , '(kN)' , '(kN)' , '(kN)' , '(kN)' , '(kN)',
'(kN)', '(kN)'};
xlswrite(nome_arq_excel, data_export, 'CASE', 'A1');
data_export = zeros(1,16);
data_export(:, 1) = quant_hastes-0.1;
data_export(:, 2) = str2num(golpe);
data_export(:, 3) = tip_length+(instr_length-
0.1)+rod_length*quant_hastes;
data_export(:, 4) = ti;
data_export(:, 5) = Fd;
data_export(:, 6) = forca_calc(reg_ini, 1);
data_export(:, 7) = forca_calc(reg_ini, 2);
data_export(:, 8) = forca_calc(reg_ini, 3);
data_export(:, 9) = tf;
data_export(:,10) = forca(reg_fim);
data_export(:,11) = forca_calc(reg_fim, 1);
data_export(:,12) = forca_calc(reg_fim, 2);
data_export(:,13) = forca_calc(reg_fim, 3);
if (proc_sinais == 1)|| (proc_sinais == 3)
    data_export(:,14) = (Fd+forca(reg_fim))/2+forca_calc(reg_ini, 1)-
forca_calc(reg_fim, 1);
end
if (proc_sinais == 2)|| (proc_sinais == 3)
    data_export(:,15) = (Fd+forca(reg_fim))/2+forca_calc(reg_ini, 2)-
forca_calc(reg_fim, 2);
end
if (proc_sinais == 3)
    data_export(:,16) = (Fd+forca(reg_fim))/2+forca_calc(reg_ini, 3)-
forca_calc(reg_fim, 3);

```

```
end
    xlswrite(nome_arq_excel, data_export, 'CASE', cel);

    % grava os resultados do processamento
    nome_planilha = strcat('Golpe_', golpe);
    data_export = {'Tempo', 'Força', 'Acel 1', 'Acel 2', 'Acel M', 'Vel
1', 'Vel 2', 'Vel M', 'Desl 1', 'Desl 2', 'Desl M', 'F Calc 1', 'F Calc 2', 'F Calc
M', 'Energ 1', 'Energ 2', 'Energ M';
                '(s)', '(kN)', '(m/s^2)', '(m/s^2)', '(m/s^2)',
'(m/s)', '(m/s)', '(m/s)', '(mm)', '(mm)', '(mm)', '(kN)', '(kN)', '(kN)',
'(J)', '(J)', '(J)'};
    xlswrite(nome_arq_excel, data_export, nome_planilha, 'A1');
    clear data_export;
    data_export(:, 1) = tempo;
    data_export(:, 2) = forca;
    data_export(:, 3) = aceleracoes(:,1);
    data_export(:, 4) = aceleracoes(:,2);
    data_export(:, 5) = aceleracoes(:,3);
    data_export(:, 6) = velocidades(:,1);
    data_export(:, 7) = velocidades(:,2);
    data_export(:, 8) = velocidades(:,3);
    data_export(:, 9) = deslocamentos(:,1);
    data_export(:,10) = deslocamentos(:,2);
    data_export(:,11) = deslocamentos(:,3);
    data_export(:,12) = forca_calc(:,1);
    data_export(:,13) = forca_calc(:,2);
    data_export(:,14) = forca_calc(:,3);
    data_export(:,15) = energia(:,1);
    data_export(:,16) = energia(:,2);
    data_export(:,17) = energia(:,3);
    xlswrite(nome_arq_excel, data_export, nome_planilha, 'A3');
end

% FECHA JANELAS DE GRÁFICOS - graf2, graf3 e graf 4
if (proc_sinais == 1)|| (proc_sinais == 3)
    close(graf2);
end
if (proc_sinais == 2)|| (proc_sinais == 3)
    close(graf3);
end
if (proc_sinais == 3)
    close(graf4);
end
end

% FECHA JANELAS DE GRÁFICOS - graf1
```

```
close(graf1);

% VERIFICA SE PROCESSA OUTRO ARQUIVO
if (menu('Processa outro arquivo de sinais? ', 'SIM', 'NÃO')==1)
    corrige_BL=1;
    disp('=====');
else
    break
end

end

disp('***** PROCESSAMENTO CONCLUÍDO *****');
```