



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Câmpus de Ilha Solteira

**IRÊNIO AMARO DA SILVA**

**Desenvolvimento de Sistema Eletrônico para Instrumentar  
um DPL em Ensaio Dinâmico de Resistência do Solo**

Ilha Solteira  
2014

**IRÊNIO AMARO DA SILVA**

**Desenvolvimento de sistema eletrônico para instrumentar um  
DPL em ensaio dinâmico de resistência do solo**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia  
do Campus de Ilha Solteira - UNESP, como  
parte dos requisitos para obtenção do título de  
Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de conhecimento: Automação.

**Prof. DR. ALEXANDRE CÉSAR RODRIGUES DA SILVA**  
**Orientador**

Ilha Solteira  
2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S586d Silva, Irênio Amaro da.  
Desenvolvimento de sistema eletrônico para instrumentar um DPL em ensaio dinâmico de resistência do solo / Irênio Amaro da Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014  
115 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação , 2014

Orientador: Alexandre César Rodrigues da Silva  
Inclui bibliografia

1. DPL(Dynamic Probing Light). 2. Strain gage. 3. Sensor de deformação.  
4. Acelerômetro. 5. Sensor de deslocamento.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** Desenvolvimento de Sistema Eletrônico para a Instrumentação de um DPL em Ensaio Dinâmico de Resistência do Solo

**AUTOR:** IRENIO AMARO DA SILVA

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. ALEXANDRE CESAR RODRIGUES DA SILVA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. ALEXANDRE CESAR RODRIGUES DA SILVA  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. APARECIDO AUGUSTO DE CARVALHO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. CARLOS ANTONIO ALVES  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. JOSE ANTONIO LAMBERT  
Departamento de Engenharia Elétrica / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

  
Prof. Dr. ERINALDO HILARIO CAVALCANTE  
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de Sergipe

Data da realização: 29 de agosto de 2014.

Dedico essa Tese à minha esposa, Maria José, aos meus filhos, Laise e Leandro, pelo amor e apoio, à minha neta, Alice, aos meus pais Egídio e Bernarda (in memoriam), às minhas irmãs Maria Amélia, Ana Copertina, Maria Luzia, Helena e ao primo Honorato, pelo exemplo de luta, ao Leonardo, ao sogro Benedito e família, à Tia Esmeralda e a família Brito, Ao amigo Ivo Campos e família. Ao povo de Vila Bela da Santíssima Trindade, minha Terra Natal.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Senhor Jesus Cristo, pelo amor, misericórdia, que tem nos ensinado o valor da oração e arte de amar a Deus sobre todas as coisas e ao próximo como a nós mesmos.

À minha família, pelo apoio e compreensão incondicional ao longo da realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Professor Alexandre César Rodrigues da Silva, pela motivação, confiança, sinceridade, orientação, amizade e principalmente por acreditar em mim, por ter contribuído para o meu crescimento, não apenas como profissional, mas também com pessoa e principalmente como cidadão.

Ao Professor Aparecido Augusto de Carvalho, pela motivação, pela sinceridade, pela humildade, pelas contribuições e sugestões sobre pesquisas científicas.

Aos Professores da UNESP, em especial a todos que contribuíram com o projeto Dinter pelo convênio UNESP/IFMT.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da FEIE-UNESP, pelos Professores do Programa, pela dedicação e empenho pela qualidade do ensino e aos dedicados servidores e técnicos administrativos, pela dedicação, sensibilidade e disposição.

Ao Tony Inácio da Silva, Nádia Conde Cuiabano e equipe do DPPG, pelo apoio, orientação, contribuição, profissional.

Aos amigos e colegas da UNESP e IFMT pela ajuda, pelo grupo de estudo das disciplinas: Juliana, Marcos, Gisele, Valquíria, Clodoaldo, Maurício.

À CAPES pelo apoio financeiro durante o afastamento para pesquisa e desenvolvimento da Tese.

Aos membros da banca examinadora pela dedicação e colaboração e sugestões para versão final da Tese.

Ao Professor João Bosco London, pelo incentivo para eu fazer Doutorado, pela dedicação, amizade e contribuições como Professor no ETF-MT E UFMT.

Ao Professor Nelson Ito Suzuki, pelo apoio e contribuição de equipamento de laboratório para desenvolvimento da pesquisa.

Ao Professor Luiz Carlos de Figueiredo, pelo companheirismo, compromisso, respeito, dedicação, amizade, pela parceria nos estudos e nos trabalhos de campo e laboratório.

## RESUMO

O Penetrômetro Dinâmico Leve, conhecido por DPL (Dynamic Probing Light) é um equipamento portátil de sondagem geotécnica e surgiu como uma alternativa para auxiliar o ensaio SPT (Standard Penetration Test). Este é hoje um dos equipamentos de sondagem mais utilizados no mundo. Embora o DPL tenha potencial para substituir o SPT nos ensaios em solos com baixa resistência à penetração, onde o  $N_{NSP} < 5$ . Na prática é ainda pouco conhecido na área da engenharia, com aplicação de pouco destaque nas obras da construção civil. A proposta deste trabalho é instrumentar um DPL com sistema eletrônico que possa em ensaio dinâmico, medir a resistência do solo à penetração. Essa medida se deve ao trabalho da energia efetiva que impulsiona o cone do equipamento para baixo cravando-o no solo. Constatou-se que o sistema eletrônico implantado no equipamento ficou mais barato que o seu similar, os resultados dos ensaios foram gerados em menor espaço de tempo, podem ser utilizados como dados de projetos de fundações. Os sinais de força e velocidade foram produzidos nas células de carga e acelerômetro. Para obtenção desses resultados, o sistema indicou automaticamente a penetração do cone no solo, motivada pela energia envolvida no processo, que por sua vez, é resultado da integração do produto da força atuante e da velocidade das partículas (no domínio do tempo). O objetivo do trabalho foi alcançado, visto que, a instrumentação do DPL, com um sistema eletrônico, possibilitou avaliar a resistência do solo à penetração. Constatou-se que essa medida está condicionada à qualidade do sinal de força e aceleração. Esta por sua vez depende de fatores como: qualidade técnica dos sensores de deformação, construção da célula de carga, qualidade do adesivo e corretos procedimentos nos ajustes e nos ensaios com o equipamento DPL instrumentado.

**Palavras Chave:** DPL. Strain gage. Sensor de deformação. Acelerômetro. Sensor de deslocamento.

## ABSTRACT

The Dynamic Penetrometer Lightweight, known as, Dynamic Probing Light (DPL) is a portable geotechnical survey device, which came out, as an alternative tool to assist the Standard Penetration Test (SPT). Currently, it is one of the most used equipment all over the world. Although, the DPL has the potential for replacing the SPT in testing on soils with low penetration resistance, where the  $NSP < 5$ , it has not been known in the engineering field, applying little attention in the civil construction works. The purpose of this study is to instrument a DPL with electronics system intended to measure soil penetration resistance in dynamic test. This measure is due to the work of the effective energy that drives down the cone of the equipment, nailing it on the ground. It was found that the electronic system implemented in the equipment was cheaper than its similar, the results of the tests were generated in a shorter time and these findings can be used as data for foundation projects. The force and speed signals were produced on the load cells and accelerometer. In order to obtain these results, the system automatically indicated the penetration of the cone into the soil, caused by the energy involved in the process, which in turn, results from the integration of the active power output and speed of the particles (in the time domain). The objective of the study was reached, since the instrumentation of the DPL with an electronic system, enabled to evaluate the soil penetration resistance. It was found that this measure is subject to the quality of the force and the acceleration signal. This, in turn, depends on factors such as technical quality of strain sensors, load cell construction, quality of the adhesive and correct procedures on the adjustments, as well as, on the tests with the DPL instrumented equipment.

**Keywords:** DPL. Strain gage. Deformation sensor. Accelerometer. Displacement sensor.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> –	Solo com baixa capacidade de carga. ....	19
<b>Figura 2</b> -	Equipamento de ensaio SPT .....	23
<b>Figura 3</b> -	Ensaio de campo com penetrômetro DCP.....	27
<b>Figura 4</b> -	Ensaio de campo com instrumento DPL CEFET em Nova Mutum.....	29
<b>Figura 5</b> -	Equipamento DPL Nilsson, com plataforma de prumo .....	32
<b>Figura 6</b> -	Equipamento DPL CEFET utilizado para instrumentação eletrônica.....	33
<b>Figura 7</b> -	Equipamento DPL Nilsson .....	35
<b>Figura 8</b> -	Ponteira de equipamento para ensaio geotécnico.....	42
<b>Figura 9</b> -	Fotografia de solo mole $N_{SPT} < 5$ , em Nova Mutum-MT.....	43
<b>Figura 10</b> -	Fotografia de um Solo do Cerrado em Várzea Grande-MT .....	44
<b>Figura 11</b> -	Fotografia e esquema interno da luva do DPL sob força dinâmica F .....	54
<b>Figura 12</b> –	Penetrômetro DPL CEFET. ....	66
<b>Figura 13</b> -	Luva de junção de peças do DPL CEFET. ....	67
<b>Figura 14</b> -	Mostra com detalhes a cabeça de bater do equipamento DPL.....	68
<b>Figura 15</b> –	Detalhes do martelo de 10kg do DPL CEFET.....	69
<b>Figura 16</b> –	Mostra com detalhes da ponteira (cone) do DPL CEFET .....	69
<b>Figura 17</b> -	Terminais dos sensores ligados em ponte.....	70
<b>Figura 18</b> -	Adaptador para proteger uma célula de carga no ensaio com força estática. ....	72
<b>Figura 19</b> -	Imagem de célula de carga do DPL protegido por luva de aço inox, após ensaio de resistência de solo. ....	74
<b>Figura 20</b>	Proteção das células: cobre, PVC e <i>epoxy</i> . ....	75
<b>Figura 21</b> -	Tambor de areia de rio para ensaio do DPL CEFET instrumentado.....	77
<b>Figura 22</b> –	Osciloscópio utilizado nos ensaios com DPL CEFET instrumentado. ....	78
<b>Figura 23</b> -	Esquema da fonte de alimentação da placa amplificadora. ....	79
<b>Figura 24</b> -	Esquema da placa amplificadora.....	80
<b>Figura 25</b> -	Filtro Rejeita Faixa (RF) da placa amplificadora.....	81
<b>Figura 26</b> -	Acelerômetro tipo MEMS – ADXL 193 com regulador de tensão.....	84
<b>Figura 27</b> -	DPL CEFET instrumentado com célula de carga e acelerômetro.....	86
<b>Figura 28</b> –	Linearização da Célula de Carga - Topo .....	89
<b>Figura 29</b> –	Linearização da célula de carga: topo.....	91
<b>Figura 30</b> –	Sinal de Força da Célula de carga – Topo .....	94
<b>Figura 31</b> –	Sinal de Força da Célula de carga – Cone .....	95
<b>Figura 32</b> –	Sinal de Aceleração gerado no Acelerômetro.....	95

<b>Figura 33</b>	– Sinal de Força da Célula de carga - Topo.....	97
<b>Figura 34</b>	– Sinal de Força da Célula de carga do cone, após uso do Scilab para seleção de dados numéricos. ....	97
<b>Figura 35</b>	– Sinal de Aceleração do Acelerômetro .....	98
<b>Figura 36</b>	– Sinal de Força da Célula de carga - Topo. Após ajuste de zero do domínio.....	98
<b>Figura 37</b>	– Sinal de Força - Cone. Após ajuste de zero do domínio.....	99
<b>Figura 38</b>	– Sinal do Aceleração, após correção de zero do domínio.....	99
<b>Figura 39</b>	– Sinal de Velocidade resultante da integração do sinal de aceleração.....	100
<b>Figura 40</b>	– Energia que alcança o cone do DPL.....	100
<b>Figura 4</b>	– Sinal de Força, após eliminação de dados de ruídos .....	101
<b>Figura 42</b>	– Sinal de Penetração do cone do DPL no solo .....	101
<b>Figura 43</b>	– Dados obtidos do sinal de Força .....	105
<b>Figura 44</b>	– Dados obtidos do sinal de Velocidade.....	105
<b>Figura 45</b>	– Sinal de Velocidade resultante da integração de sinal com defeito .....	107
<b>Figura 46</b>	– Sinal de Energia resultante de sinal gerado com defeito .....	107
<b>Figura 47</b>	– Sinal de Força gerado na Célula de carga com defeito construtivo .....	108
<b>Figura 48</b>	– Sinal distorcido de Penetração do cone do DPL no solo .....	108

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> -	Dados técnicos dos equipamentos DPL, DPM, DPH e DPSH.....	30
<b>Tabela 2</b> –	Resultados dos ensaios de Linearização da Célula de carga: TOPO .....	88
<b>Tabela 3</b> –	Resultados dos ensaios de Linearização da Célula de carga: CONE.....	90
<b>Tabela 4</b> –	Comparação entre medida real e virtual de penetração do cone do DPL.....	102
<b>Tabela 5</b> –	Comparação entre medida real e eletrônica de penetração do cone do DPL, produzidos dados ruins, por falta de bons ajustes nos componentes do equipamento .....	106

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AENOR	Associação Espanhola de Normalização e Certificação
ASTM	American Society for Testing and Materials (Normalização ao ensaio SPT)
CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica
CEN	Comitê Europeu de Normalização
CG	Centro de Gravidade
CI	Circuito Integrado
CPT	Cone Penetration Test
DCP	Dynamic Cone Penetration Test
DP	Dynamic Probin
DER	Departamento de Estradas e Rodagem
DIN	Deutsches Institut für Normung – Instituto Alemão para Normatização
DPH	Penetrômetro Dinâmico Pesado
DPL	Dynamic Probin Light
DPM	Penetrômetro Dinâmico Médio
DPSH	Dynamic Probing Super Heavy
EC7	Eurocódigo 7 (1997)
FEM	Método dos Elementos Finitos
GPS	Global Positioning System – Sistema de Navegação por Satélite
IFMT	Instituto Federal de Educação Tecnológica de Mato Grosso
IPT	Instituto de Pesquisa de São Paulo
ISSMFE	International Society for Soil Mechanics
LCD	Liquid Crystal Display - Display de Cristal Líquido.
MEMS	Micro – Eletromechanical Systems
N30	Tem o mesmo significado do $N_{SPT}$
$N_{SPT}$	Número de golpes necessário no Ensaio SPT para o amostrador cravar 30 cm
PANDA	Pénétromètre Autonome Numérique Dinymique Assisté
PDL	Penetrômetro Dinâmico Leve PDL: Penetrômetro Dinâmico Ligeiro Portugal
SCPT	Static Cone Penetration Test
PVC	Policloreto de Plivilila – Policloreto de vinil
SPT	Standard Penetration Test
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UnB	Universidade de Brasília
UNESP	Universidade Estadual Paulista
VCVS	Voltage Controlled Source

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1	JUSTIFICATIVA.....	17
1.2	OBJETIVO DO TRABALHO .....	19
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivos específicos do trabalho</b> .....	19
<b>1.2.2</b>	<b>Motivação</b> .....	20
1.3	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO .....	21
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – EQUIPAMENTOS DE ENSAIOS GEOTÉCNICOS</b> .....	23
2.1	EQUIPAMENTOS SPT .....	23
2.2	INSTRUMENTAÇÃO DO SPT PARA MEDIDA DE ENERGIA.....	24
2.3	EQUIPAMENTO DPL.....	24
<b>2.3.1</b>	<b>Denominações atribuídas ao DPL</b> .....	25
<b>2.3.2</b>	<b>Padronização e normas</b> .....	28
<b>2.3.3</b>	<b>Tipos de penetrômetros</b> .....	29
2.4	PENETRÔMETRO DINÂMICO LEVE .....	31
<b>2.4.1</b>	<b>Penetrômetro DPL NILSSON</b> .....	31
<b>2.4.2</b>	<b>Penetrômetro DPL CEFET</b> .....	32
2.6	PROCEDIMENTO NO ENSAIO COM O PENETRÔMETRO COM BASE NO DPL .....	36
2.7	CORRELAÇÃO ENTRE SPT E DPL.....	37
2.8	EXECUÇÃO DPL/SPT .....	41
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	49
3.2	DEFORMAÇÃO DIRETA.....	49
3.3	TEORIA DA EQUAÇÃO DE ONDA APLICADA ÀS ESTACAS E UTILIZADA NO EQUIPAMENTO DPL.....	53
3.4	ANÁLISE DA EQUAÇÃO DE ENERGIA .....	58
3.4	ENERGIA NO ENSAIO DPL.....	63
<b>3.4.1</b>	<b>Energia potencial teórica</b> .....	63
<b>3.4.2</b>	<b>Velocidade adquirida pelo martelo</b> .....	63
<b>3.4.3</b>	<b>Impedância da haste do DPL</b> .....	63
<b>3.4.3.1</b>	<b>Área da seção transversal</b> .....	64
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	65
4.1	INTRODUÇÃO .....	65
4.2	MATERIAIS.....	65
4.3	MÉTODOS .....	70
<b>4.3.1</b>	<b>Circuito de alimentação e sinal: célula de carga do topo e cone</b> .....	70
<b>4.3.2</b>	<b>Proteção dos sensores</b> .....	71
4.4	ENSAIO COM DPL INSTRUMENTADO COM CÉLULAS DE CARGA .....	73
4.5	CÉLULAS DE CARGAS DO TOPO E DO CONE .....	74
4.6	TEMPO DE CURA DO ADESIVO DOS EXTENSÔMETROS .....	75
4.7	SENSORES DE DEFORMAÇÃO E DESLOCAMENTO USADOS NO DPL .....	76
4.8	ACELERÔMETRO.....	83
4.9	SINAIS E DADOS GERADOS COM DPL INSTRUMENTADO .....	84

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>88</b>
5.1	ENSAIOS DE LINEARIZAÇÃO – CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA.....	88
5.2	CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA COM CARREGAMENTO ESTÁTICO E CRESCENTE .....	92
5.3	RESULTADOS DE ENSAIOS DO DPL COM CARGA DINÂMICA .....	93
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>110</b>
6.1	CONCLUSÕES .....	110
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	111
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>112</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O SPT é considerado o artefato de sondagem geotécnica mais empregado no mundo. É imbatível nas previsões de cargas para fundações de obras civis e militares. Tem preferência no ramo empresarial das construções, como engenharia geotécnica e engenharia de fundações das grandes construções. Isto se deve principalmente a simplicidade, robustez e facilidade de aplicação dos seus resultados.

Pesquisadores que estudavam eficiência do SPT, passaram observar a influência da energia efetiva que chegava no amostrador do equipamento, avaliando seu desempenho, no ensaio do solo. Com emprego da instrumentação eletrônica no SPT, pode-se realizar a medida dessa energia. Conforme Cavalcante (2002), a instrumentação do SPT, com essa finalidade iniciou nos Estados Unidos, na Universidade da Flórida no final de 1970.

Alguns desses trabalhos foram divulgados, como a de:

(PALACIOS, 1977; KOVACS, 1982; BELINCANTA, 1998; CAVALCANTE, 2002; ODEBRECHT, 2003; LUKIANTCHUKI; ESQUIAVEL; BERNARDES, 2011; LUKIANTCHUKI, 2012).

No Brasil essa técnica, como narrou Odebretch (2003), teve início em 1982. O pioneiro foi o engenheiro Antônio Belincanta no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT).

Um equipamento portátil de investigação geotécnica, cujos dados de ensaios foram correlacionados com os do SPT, é o DPL. Estudos realizados por equipes de profissionais como Martins e Miranda (2003), Nilson (2004) e Conciani (2005) mostraram utilidade do DPL. Trata-se de um equipamento portátil de sondagens geotécnicas que pode auxiliar o ensaio de SPT e tem potencial para substituí-lo, nos ensaios de resistência em solo mole à penetração, onde o  $N_{NSP} < 5$ .

Sabe-se que o DPL surgiu na Alemanha por volta de 1945, Hasmatt (2000), depois passou a ser utilizada na França, Inglaterra, Portugal. No Brasil o primeiro contato com DPL, ocorreu em 1984, tempo depois, foi utilizado por Nilson em 2001. Devido à necessidade de realizar ensaios na região do Paraná, um novo equipamento DPL foi criado por esse pesquisador, baseado no modelo e na norma europeia. Esse equipamento patenteado por ele em 2003 passou a ser chamado de DPL Nilson. Em 2006 foi criado outro modelo por

Conciani, referenciado na norma europeia. Esse equipamento ficou conhecido como DPL CEFET.

O que chama atenção, é que o DPL é pouco conhecido nos meios acadêmicos das engenharias e ainda é pouco explorado pelos profissionais da construção civil. Em comparação com o SPT, há poucas informações sobre pesquisas com DPL e muito menos sobre sua instrumentação. Não se tem conhecimentos de trabalhos científicos e artigos divulgados nas áreas acadêmicas, sobre instrumentação de DPL, empregando célula de carga e acelerômetro.

Também não foi encontrado divulgação de método experimental para medir energia efetiva que chega no cone desse instrumento, no instante que é cravado no solo, instante após impacto do martelo na cabeça de bater. Pode-se dizer que, instrumentar um DPL para estudar processo de variação de energia, do topo, onde ocorre impacto, até o cone, no instante que ele é cravado no solo, é um projeto embrionário.

A proposta neste trabalho foi instrumentar um DPL, que possa em ensaio dinâmico, medir a resistência do solo à penetração, utilizando energia efetiva que chega no cone do equipamento. O sistema eletrônico utilizado no projeto é bem mais simples, além de mais barato que o similar, teve por finalidade torná-lo mais eficiente. Aumentado a capacidade para executar ensaios e gerar dados aplicáveis aos projetos de fundações, em menor espaço de tempo. Além disso, dotado de inovações tecnológicas, se tornou prático na realização de ensaios do solo e útil aos profissionais técnicos e engenheiros que realizam sondagens geotécnicas.

Dados gerados por meio de sistema eletrônico são mais confiáveis, que os métodos empíricos, porque deixaram de ser baseados apenas em número de golpes do martelo no DPL. Com instrumentação do DPL com célula de carga e acelerômetro, o sistema indicou automaticamente, a penetração do cone no solo. A medida da energia envolvida, é resultante da interação da força atuante e da velocidade alcançada pelas partículas na seção de deformação da haste. Sendo a velocidade alcançada, devido a aceleração dessas mesmas partículas, produzida pela propagação da onda de tensão, ao longo da haste do DPL, a partir do instante que ocorreu o impacto.

A intensidade da força foi medida através dos sensores de deformação instalados em forma de ponte de Wheatstone na célula de carga, construída com strain gage. A aceleração foi medida usando sensores de deslocamento instalados no acelerômetro. O sistema eletrônico

teve como complemento, uma placa amplificadora, filtro corta faixa, fonte simétrica e osciloscópio. O processamento de dados numéricos dos sinais captados pelo osciloscópio foi operacionalizado por um programa do Scilab.

Há poucas informações sobre esse procedimento. O trabalho de Ibañez (2012) foi mais um enfoque para aplicação da norma International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering- ISSMFE (1989). Dos penetrômetros leves, quem tem se destacado é o PANDA, como descrito por Diemer et al. (2013), é um equipamento que não se enquadra na proposta de projeto que esteja voltado para fundação profunda, voltado para uso de estaca. Visto que o equipamento PANDA, tempo sido muito empregado nos projetos de terraplanagem e pavimentação.

Outro detalhe técnico importante, é na produção de energia no instante do impacto. No PANDA a energia envolvida no processo é variável, embora a massa seja constante, há variação de altura, de deslocamento da massa que gera impacto e da velocidade de deslocamento. Em cada impacto produzido, não há um guia de orientação ou controle de impulso do choque. Um microprocessador controla a energia de entrada e avalia, a penetração a ser produzida no solo, com aquela parcela de energia.

O sistema tem um controle, aceita ou rejeita determinado nível de energia de entrada pela intensidade mínima ou máxima no instante do impacto. No DPL a energia produzida no instante do impacto, é praticamente constante. Utiliza um peso com a mesma massa e mantém praticamente constante a altura do martelo, que deve se deslocar em queda livre na cabeça de bater.

O PANDA é um instrumento de investigação do solo, e constitui um sistema complexo, composto por microprocessador e acelerômetro muito moderno e tecnologia de última geração, com grande capacidade elevada de aceleração, processamento e interpretação de sinais.

Tratando-se de instrumentação do DPL, foi publicado um artigo por um pesquisador do IFMT, que trouxe uma proposta sobre medida de energia no DPL, utilizando sinais de acelerômetro, foi um pesquisador da IFMT, Figueiredo (2013). Na proposta foi utilizada apenas medida da aceleração. A partir desta, foi proposta cálculo da velocidade, por meio dessa grandeza calculou-se energia pela integral  $E = \frac{Ea}{c} \int_0^t V^2 dt$ .

No projeto do DPL instrumentado, o sinal de força gerado na célula de carga foi tratado por uma placa amplificadora construída com dois estágios, intermediado por um filtro. O primeiro teve função de melhorar o sinal da ordem de microvolt para mili-Volt e o segundo estágio de mili-Volt para Volt. O filtro planejado foi do tipo corta faixa, na faixa de frequência programada: (30 Hz a 120 Hz).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Justifica-se instrumentar um DPL, porque ainda não foi encontrada informação registrada, sobre instrumentação desse tipo de penetrômetro dinâmico leve. Mesmo correlacionado com SPT, o DPL não tem se destacado no cenário da construção civil. Os dados gerados por ele nos ensaios, para avaliar a resistência do solo à penetração, poucas vezes são aplicados diretamente nos projetos de fundações.

Percebe-se certa desconfiança, ou até mesmo certa insegurança na utilização dos dados que são produzidos por DPL, quando se trata de projeto de fundação. Essa resistência contribuiu negativamente no meio acadêmico de engenharia. Bem diferente é a situação do SPT, que tem atraído a atenção de pesquisadores e proporcionado estudos muito interessantes, para sua instrumentação. São exemplos dessas pesquisas aqui no Brasil, estudos desenvolvidos por

(CAVALCANTE, 200-; ODEBRECHT, 2003; LUKIANTCHUKI *et al.*, 2011; LULIANTCHUKI, 2012).

Considerando essas críticas, justifica-se instrumentar o equipamento DPL com um sistema eletrônico. Principalmente devido à proposta para medir a resistência do solo em função de energia. Isto é, da energia efetiva que impulsiona o cone, no instante que ele é cravado no solo. Como também medir a penetração do cone no solo, instante após impacto do martelo do DPL. Sem necessidade contagem de número de golpes, como é o procedimento do método empírico tradicional.

É importante instrumentar um DPL, porque automatiza o método de ensaio. Em cada impacto, o sistema informa quantos mm o cone penetrou no solo. Mede-se energia próxima da cabeça de bater e também próxima do cone. No processo convencional, o método é empírico. O resultado do ensaio fica sujeito a erro grosseiro, os dados não são confiáveis, gera desconfiança nas aplicações práticas.

O  $N_{10}$  por exemplo usado como escala, terá sempre uma imprecisão, porque dificilmente, após impacto do martelo, se alcançará 10 cm exato. A tendência nesse processo, é acumular uma associação de pequenos erros de medidas. O que pode influenciar muito os resultados dos ensaios. Dependendo do tipo de solo, os resultados ficam ainda mais comprometidos.

No método convencional, não se avalia perda de energia no processo. Por meio da instrumentação podem-se avaliar as grandezas: energia, velocidade, força e penetração. Se após um impacto não for registrado de penetração do cone no solo, isto significa dissipação de energia na interação do solo com o cone. O que se pode avaliar com mais facilidade, se foi alcançado o leito rochoso, se apareceu uma cimentação na camada ou ainda se surgiu uma pedra como obstáculo.

Nilson (2003) alertava para a necessidade de divulgar o DPL, porém, já chamava atenção da desvantagem do equipamento de não dispor de nenhum processo de automação. Como já havia sido alertados por outros pesquisadores que defendem o uso do SPT, exemplos: (CAVALCANTE, 2002; ODEBRECHT, 2003; LIKIANTCHUKI, 2012).

A instrumentação do DPL cria possibilidades para novos estudos com finalidade de se conhecer comportamento de solo como o da Figura 1 e vários tipos de solos. Essa proposta é muito interessante, visto que as correlações que foram divulgadas, como as de Martins e Miranda (2003), Ávila e Conciani (2006), Ribeiro Júnior et al. (2007), Nilson e Cunha (2004) apresentaram propostas cujas soluções resultaram em substituir  $N_{30}$  do Formulário específicas para o SPT, por  $N_{10}$  do DPL. Como a de Aoki e Veloso. Propostas que foram inviáveis para vários tipos de solos. Nilson deduziu formulário específico para DPL, disponível em: [www.nilsson.com.br](http://www.nilsson.com.br), que ainda aguarda confirmação da comunidade científica. Outras ficaram na dependência do SPT ou de prova de carga.

**Figura 1** – Solo com baixa capacidade de carga.



Fonte: o próprio autor

## 1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo do trabalho é desenvolver um sistema eletrônico de baixo custo para instrumentar um equipamento DPL (Penetrômetro Dinâmico Leve), portátil, para avaliar a resistência do solo à penetração e registrar os resultados de medidas num sistema de aquisição de dados.

### 1.2.1 Objetivos específicos do trabalho

Construir duas células de carga com extensômetros resistivos para compor dois sistemas eletrônicos, adaptáveis num DPL.

Dotar o equipamento de sistemas eletrônicos com capacidade de determinar a força e a aceleração e avaliar a energia transmitida ao solo pelo cone de penetração do próprio DPL.

Desenvolver algoritmo de programação para codificar e interpretar sinais elétricos para mensurar o deslocamento do cone para cada golpe do martelo.

Realizar atividades específicas nos laboratórios, visando à utilização de novas ferramentas e novas tecnologias aplicáveis à construção civil.

Empenhar na geração de conhecimentos no desenvolvimento de transdutores e sistemas eletrônicos que tenham outras aplicações, além da adaptação no equipamento DPL CEFET.

### 1.2.2 Motivação

Instrumentar, com unidade eletrônica, um equipamento DPL, tornando-o mais eficiente, com mais recursos na realização de ensaios de resistência do solo à penetração. Que o equipamento instrumentado seja útil aos engenheiros e técnicos que lidam com ensaios de solos. Que os dados produzidos por ele sejam utilizados nos projetos de fundações de obras.

Artigos publicados por Belincanta (1998), Cavalcante (2002), Nilson e Cunha (2004), Ávila e Conciani (2005), apresentam dados que chamam atenção quanto aos resultados obtidos por meio de técnicas de ensaio do solo. Os principais dados relacionados foram:

- a) os resultados dos ensaios para indicar a capacidade de carga de diferentes tipos de solos ou em determinadas condições de umidade, nem sempre atendem às reais necessidades dos profissionais da construção civil;
- b) equipamento como o SPT não é apropriado para determinados tipos de obras de longa extensão ou de difícil acesso;
- c) o SPT é inadequado para certos tipos de solos em determinadas áreas;
- d) o SPT se torna oneroso quando se trata de obras consideradas de pequeno porte.

Que seja o DPL instrumentado uma proposta para ajudar a solucionar problemas dessas naturezas. Não com pretensão de substituir SPT, mas sim com uma alternativa viável para os casos em que o SPT se torna inviável por questão geográfica, econômica ou local de difícil acesso.

Cavalcante (2002) e Belincanta (1998) registraram muitos detalhes na execução desse tipo de ensaio que exercem influência nos resultados apresentados. Ainda alertam que para determinadas condições locais do solo no ato do ensaio, eventualmente, os dados do SPT não condizem com a realidade. Em casos como estes, o DPL instrumentado pode substituir com vantagens o SPT, se as condições e o tipo de solo permitir um ensaio de qualidade do DPL.

### 1.3 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

O desenvolvimento do projeto de instrumentação eletrônica de um equipamento DPL contribuiu para a geração e aplicação de conhecimentos e aquisição de experiência sobre construção de transdutor de carga, equipamentos e instrumentos de medidas mecânicas e elétricas.

Pode-se comprovar que vários profissionais da instituição obtiveram um ganho significativo de conhecimentos teóricos e práticos sobre:

- Preparação e tratamento de peça para colagem de extensômetros resistivos;
- Técnicas de colagem de extensômetros resistivos;
- Cura e temperatura de cura após colagem de sensores;
- Técnicas de soldas usadas em fios, cabos delicados e peças miniaturas;
- Construção de uma célula de carga;

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Depois das considerações iniciais, será detalhado a seguir, de forma sucinta, como o trabalho está organizado.

Apresenta-se no Capítulo 2 uma revisão bibliográfica sobre os equipamentos geotécnicos, equipamento SPT, equipamento DPL (NILSON; CEFETMT). São abordadas as características desses equipamentos, vantagens e desvantagens nos ensaios de acordo com as condições e tipos de solos.

No Capítulo 3 são abordados os conceitos e as aplicações da extensometria. Utilização dos extensômetros elétricos resistivos na construção de células e transdutores de cargas. Deformação – Módulo de Elasticidade e Sensibilidade. Teoria da Equação de Onda Aplicada às Estacas e como pode ser utilizada nas hastes de um equipamento DPL. Análise da Equação de Energia.

No Capítulo 4 é apresentada a metodologia da construção das células de cargas. Ensaio com DPL instrumentado. Aquisição de sinais das células do equipamento utilizando placa de amplificação, fonte simétrica e osciloscópio.

O Capítulo 5 contém os resultados dos dados obtidos dos arquivos gerados no osciloscópio. Análise e tratamento dos dados utilizando o Scilab. Resultado do cálculo da força, energia, impedância utilizando Algoritmo.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e contribuições desta pesquisa e também são colocadas sugestões para trabalhos futuros.

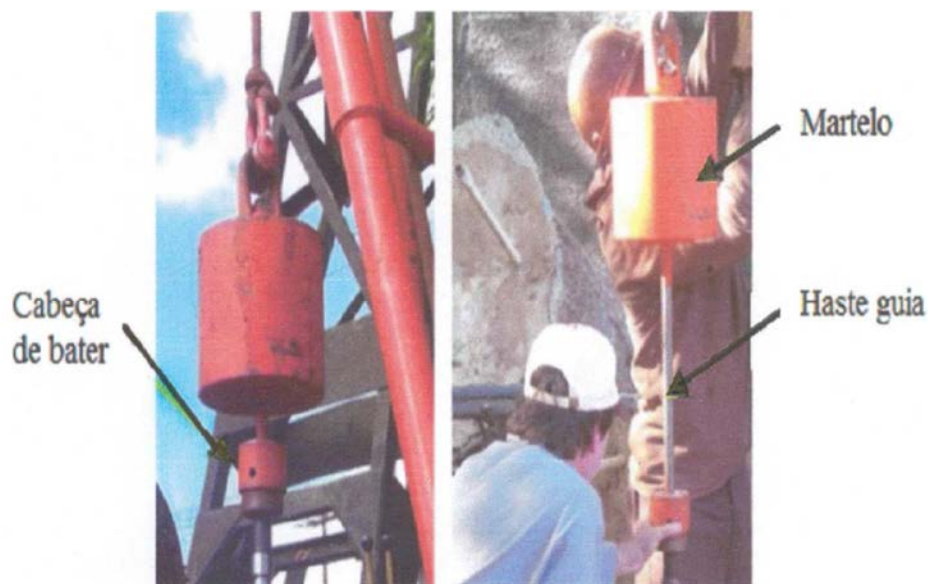
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – EQUIPAMENTOS DE ENSAIOS GEOTÉCNICOS

### 2.1 EQUIPAMENTOS SPT

O ensaio de campo SPT consiste em realizar medida de resistência do solo à penetração dinâmica, em conjunto com uma sondagem de simples reconhecimento. O procedimento é regulamentado pela ABNT – NBR 6484.

Como apresentado na Figura 2, um ensaio SPT tem por finalidade cravar no solo um amostrador padrão, com 50 mm de diâmetro externo. Na cravação, é usado um martelo com 65 kg de massa, acionado até uma altura de 750 mm por um dispositivo eletromecânico.

**Figura 2** - Equipamento de ensaio SPT



Fonte: Lukiantchuki (2012).

Depois, é lançado em queda livre sobre uma haste que contém, numa extremidade, uma cabeça de bater e, na outra, o amostrador. Após a cravação inicial de 150 mm, gera-se o  $N_{SPT}$ , que indica o número de golpes aplicados no equipamento para o amostrador penetrar 300 mm no solo.

O SPT (Standard Penetration Test) é considerado um dos mais importantes equipamentos de ensaios para investigações geotécnicas. É o tipo mais empregado no mundo nas previsões de capacidade de cargas das fundações que outras aplicações. Pode ser utilizado em diferentes tipos de solos. No Brasil, é amplamente utilizado nas previsões de cargas para

projetos de fundações de pontes, edifícios, barragens e outros tipos de obras. É o ensaio considerado o mais abordado no meio geotécnico devido à sua ampla utilização.

## 2.2 INSTRUMENTAÇÃO DO SPT PARA MEDIDA DE ENERGIA

Historicamente, medir energia no SPT teve início nos Estados Unidos, na Universidade da Flórida, no final da década de 1970, (PALACIOS, 1977). Os estudos em foco na época, realizados por pesquisadores como Schmertmann e Palacios (1979) e Kovacs (1982), são alguns exemplos.

Eles estudaram como determinar perdas de energia, avaliaram eficiências de golpes do martelo sobre a haste do amostrador e como realizar medidas de velocidade de impacto do martelo na cabeça de bater da haste.

No Brasil, os primeiros estudos sobre energia transmitida no SPT foram desenvolvidos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT). Em 1982, foram executadas as primeiras medidas Odebretch (2003). O engenheiro Antônio Belincanta foi quem esteve à frente desse trabalho, utilizando células elétricas de carga.

Cavalcante (2002) relata outros sistemas utilizados para medidas de velocidade de impacto de martelo no SPT: *scanners* estrategicamente instalados no martelo; geração de pulsos elétricos utilizando fios paralelos; e utilização de filmadoras de alta velocidade.

Dos trabalhos sobre medidas de energia do SPT e utilização de sensores, há os que serviram de referência nos estudos para instrumentação do DPL CEFET, como (BELICANTA et al., 1994; ODEBRETCH, 2003; LUKIANTCHUKI; ESQUIAVEL; BERNARDES, 2011); BORGES, 2011); LUKIANTCHUKI, 2012).

## 2.3 EQUIPAMENTO DPL

Uma alternativa viável que pode ser utilizada em parceria com o SPT e, em determinadas condições do solo, substituí-lo, é o DPL (Dynamic Probing Light), traduzido para o português como Penetrômetro Dinâmico Leve. Esse equipamento portátil de investigação geotécnica é usado para avaliar a resistência do solo à penetração. A partir dela, estima-se a capacidade de carga do solo para dimensionar a fundação de uma obra da construção civil.

Historicamente, o DPL surgiu na Alemanha no período da Primeira Guerra Mundial Hasmat (2000). No final de 1945, o DPL passou a ser utilizada na França, Inglaterra, Portugal e em vários estados americanos. Para disciplinar o uso do equipamento, discutiu-se a padronização de procedimentos. A primeira norma que disciplinou a construção e o uso do DPL nos ensaios de campo foi organizada pela DIN 4094-1 e ocorreu em 1964.

Inicialmente, os penetrômetros foram projetados para uso no solo seco ou solo não saturado. Foram produzidos basicamente quatro categorias de penetrômetros dinâmicos: leve, médio, pesado e superpesado. Esses equipamentos foram definidos e padronizados por normas. Com o progresso, surgiu a necessidade de investigação no fundo de rios, lagos e, conseqüentemente, do mar, determinada por fatores econômicos e demanda científica por novos materiais. Stark et al. (2000)

Dessa forma, projetaram-se penetrômetros que podiam ser usados em solo embaixo de águas rasas e em águas profundas do alto mar. Os das águas rasas constituíram duas categorias: Penetrômetros Quase Estáticos e Penetrômetros Dinâmicos, como é o caso do Penetrômetro Dinâmico de Queda Livre. Em caso de águas profundas, foram fabricados os Penetrômetros Quase Estáticos específicos para essa realidade. (MEUNIR, et al., 2005).

No Brasil, as primeiras experiências com DPL ocorreram em 1984. Conforme relator, o Departamento de Estradas e Rodagem (DER) documentou o uso de um determinado tipo de penetrômetro dinâmico, que foi denominado Penetrômetro Dinâmico Leve (PDL), padronizado pela norma alemã. Outros experimentos, conforme relatam Nogueira e Röhn (1990), ocorreram por volta de 1990.

Outras experiências com o uso do DPL na investigação geotécnica ocorreram com Nilsson (2001) Conciani começou em 2004, Ávila e Conciani (2005). Thomas Nilson começou os ensaios com DPL em 2001, usando uma versão européia. Em 2003, Nilson patenteou um modelo de Penetrômetro Dinâmico Leve, denominado DPL NILSSON. O trabalho foi realizado em Curitiba conforme citado por (NILSSON; CUNHA, 2004).

Ávila e Conciani iniciaram o trabalho de pesquisa com DPL em Mato Grosso, em 2004. Como professor do IFMT, liderou grupos de pesquisas com o equipamento DPL. Nesse ano, foi apresentado como proposta um novo modelo de DPL, denominado DPL CEFET, (ÁVILA; CONCIANI, 2006a).

### **2.3.1 Denominações atribuídas ao DPL**

Ao DPL, associaram-se denominações como: DCP; DPL; PDL. Alguns nomes foram influenciados pela cultura técnica de profissionais que formulam normas de ensaios desses penetrômetros.

Na Alemanha, o DPL foi padronizado pela Norma DIN 4091-1. Essa norma levou em conta a energia envolvida, os procedimentos nos ensaios e a geometria dos componentes. Na Inglaterra, devido à tradução, o DPL passou a ser chamado DCP (Dynamic Cone Penetration Test).

Nos Estados Unidos, recebeu o nome DCP (Dynamic Cone Penetration Test). Observa-se um diferencial entre esses equipamentos na questão de energia, geometria e procedimentos de ensaios, conforme a referência das normas alemã e americana.

O DCP, conforme a ASTM D 6951 - 03 é um equipamento que tem por finalidade avaliar as propriedades materiais do solo em 1 metro de profundidade a partir da superfície. Ele tem restrição de penetração estabelecida pela geometria do equipamento.

Em Portugal, Martins e Miranda (2003) relatam ensaios feitos com penetrômetro dinâmico. Eles traduzem DPL como Penetrômetro Dinâmico Ligeiro. Observa-se que há uma diversidade de denominações atribuídas ao DPL.

No Brasil, devido à tradução e aos termos técnicos, aumentaram as dificuldades para diferenciar os Penetrômetros Dinâmicos Leves. Artigos publicados em revista ou apresentados em congressos e simpósios mostram outras denominações e siglas atribuídas ao DPL.

Röhn e Nogueira (1993) usaram a sigla PDL para caracterizar um Penetrômetro Dinâmico Leve construído conforme o padrão da norma alemã, que o insere na mesma categoria do DPL. Outros exemplos estão relacionados com o DPL CEFET e DPL Nilsson. No aspecto construtivo, mesmo referenciado pelo padrão da norma internacional, o DPL CEFET, em algumas de suas peças, apresenta uma geometria que o difere da proposta do DPL Nilsson.

Outra questão relaciona-se à denominação dada ao DPL, também tratado como cone dinâmico (DCP, CD). No *site* <[www.nilsson.com.br](http://www.nilsson.com.br)>, ficha\_DPL, Nilsson disponibiliza a ficha técnica do DPL Nilsson.

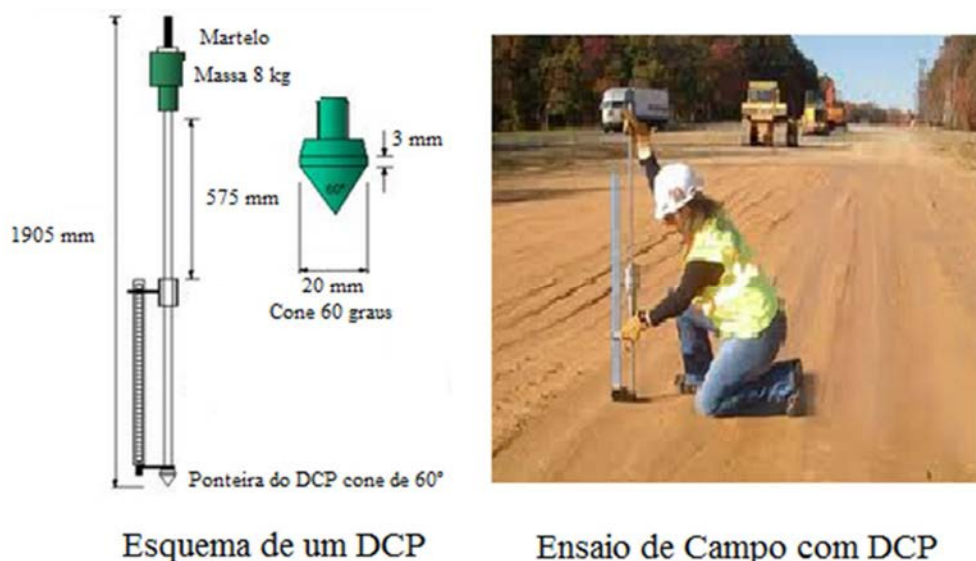
Num artigo apresentado no 11º Congresso de Geologia de Engenharia e Ambiental, Miguel et al. (2005) observaram que a equipe de Nilsson empregou a escrita DPL (Dynamic Probing Light).

Também foram observadas denominações e escritas diferentes atribuídas a um mesmo equipamento. Num artigo apresentado na revista *Solos e Rochas*, Ávila e Conciani (2006a) deram ao DPL a denominação de Cone Dinâmico (DCP). Em outro artigo, Ribeiro Júnior et al. (2007) utilizaram como escrita DPL (Dynamic Penetrometer Light).

Os diferentes termos que os pesquisadores atribuem ao DPL podem gerar dúvidas para quem está pouco familiarizado com ensaios realizados com Penetrômetros Dinâmicos Leves. Os termos usados por Nilsson se referem ao mesmo equipamento; nesse caso, gera poucas dúvidas de interpretação. O termo *probe* pode dar a entender que ele se refere ao DPL como uma sonda de ensaio de solo. Se utilizar a palavra *probing*, pode-se conceber o DPL tanto como um equipamento quanto um processo de sondagem.

Ávila e Conciani (2005) atribuíram ao DPL o nome Cone Dinâmico, referindo-se ao equipamento padronizado pela norma alemã, portanto ele utiliza o Penetrômetro Dinâmico Leve (DPL). O que pode gerar muita dúvida no leitor é que o termo pode se referir a outro tipo de equipamento. A Figura 3 mostra um esquema e uma foto de ensaio de campo com utilização de um penetrômetro dinâmico DCP. O ensaio foi usado para avaliação da base de uma rodovia em processo de pavimentação.

**Figura 3** - Ensaio de campo com penetrômetro DCP



Fonte: Nome do Autor (2014).

De acordo com a norma americana– ASTM D 6951-03 –, o DCP (Dynamic Cone Penetration), um modelo de cone dinâmico, se refere a um equipamento que tem restrição de penetração no solo. A investigação se limita à profundidade de um metro. Difere muito do DPL que usa haste segmentada, adaptável, com variação de profundidade de investigação, podendo atingir, dependendo do tipo de solo, até 12 metros de profundidade.

Outro equipamento que deve ser incluído nesse grupo que trata dos vários tipos de penetrômetros é o PANDA. Trata-se de um equipamento instrumentado eletronicamente, assistido por microprocessador e acelerômetro, que dispõe de recurso tecnológico muito eficiente na investigação geotécnica de solo.

### 2.3.2 Padronização e normas

O DPL já foi padronizado em vários países. Na Alemanha, é regulamentada pela DIN 4094-1. Nos Estados Unidos, ASTM – D6951-03. Portugal utiliza o EC7, norma europeia (EUROCODE,1997). A Espanha regulamentou a sua norma em 2005.

O Brasil padronizou oficialmente norma ABNT – NBR 6484 para SPT, e a Norma ABNT – NBR 12 131 para ensaio de carga. Essa normatização não ocorreu com o DPL. Até hoje, aqui no Brasil, o DPL é utilizado em ensaios tanto de campo como de laboratório, sem uma padronização oficial que oriente o uso e construção desse equipamento. Sousa Santos e Conciani (2008) realizaram ensaios com DPL utilizando hastes com espessura das paredes diferentes. Os autores concluíram testes para definir uma geometria para um equipamento que fosse mais eficiente, seguro e confiável.

No entanto, apesar dos bons resultados, a equipe avaliou que era fundamental uma padronização da geometria das hastes com norma oficial para realização dos ensaios. A padronização no Brasil é atribuição da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Tratando-se de DPL, essa entidade ainda não apresentou oficialmente uma proposta de norma.

Sousa (2008) argumentou que o uso de resultados de ensaios de DPL em projetos depende de correlações específicas, isto é, a padronização do ensaio do equipamento DPL é importante para projetos geotécnicos, visto que grande parte dos projetos para fundações ainda é realizado com dados obtidos por meio de ensaios de SPT, (SOUSA et al., 2008).

Neste ensaio foi utilizado método empírico. Para avaliação da resistência desse solo à penetração com carga dinâmica, quantificou-se durante o ensaio, quantos golpes foram aplicados na cabeça de bater do DPL, para o cone penetrasse 100 mm no solo. Constatou-se no ensaio executado, em três furos, que a nega, foi alcançada em média, a uma profundidade de 6 metros.

A Figura 4 mostra uma foto de um DPL CEFET que foi utilizado em ensaios de campo num solo mole, com índice de resistência à penetração do SPT abaixo de 5. Os ensaios foram realizados numa área urbana, destinada à construção de um edifício residencial, no município de Nova Mutum-MT.

**Figura 4** - Ensaio de campo com instrumento DPL CEFET em Nova Mutum



Fonte: O próprio autor (2012).

### 2.3.3 Tipos de penetrômetros

Conforme divulgação da AENOR (Associação Espanhola de Normalização e Certificação), o CEN – COMITÊ EUROPEU DE DE NORMATIZAÇÃO, aprovou a norma que regulamenta a utilização dos penetrômetros dinâmicos em 11 de abril de 2004. A AENOR por sua vez, passou a utilizar oficialmente a norma europeia a partir de 2005, conforme documento EN ISO 2247-2:2005.

A norma europeia regulamentou a utilização dos penetrômetros. Por essa norma, os penetrômetros dinâmicos dividem-se em quatro categorias, de acordo com o tipo de ensaio: Penetrômetro Dinâmico Leve – Dynamic Probing Light (DPL); Penetrômetro Dinâmico Médio – Dynamic Probing Medium (DPM); Penetrômetro Dinâmico Pesado – Dynamic Probing Heavy (DPH); Penetrômetro Dinâmico Superpesado – Dynamic Probing Super Heavy (DPSH).

De acordo com a normatização que foi divulgada pela AENOR, a tabela 1 apresenta os dados técnicos dos quatro modelos de penetrômetros dinâmicos citados. Nela estão especificados, com as referida unidades: massa do martelo, altura de queda, diâmetro da cabeça de bater, diâmetro do guia do martelo, comprimento da haste, massa máxima da haste, diâmetro externo da haste, ápice do cone, área da base, diâmetro e comprimento da ponta do cone.

A cada categoria de penetrômetro, estimou-se uma profundidade na investigação do solo de acordo com a energia utilizada pelo sistema. Nesta seção, foram detalhadas as

principais recomendações para o DPL, conforme o apêndice C do relatório técnico (TC-16) da ISSMFE (1989). Na Tabela 1 estão especificados os dados técnicos dos quatro tipos de penetrômetros, conforme aprovação da norma européia.

**Tabela 1** - Dados técnicos dos equipamentos DPL, DPM, DPH e DPSH.

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

Fonte: ISSMFE (1989).

Das quatro categorias de penetrômetros dinâmicos padronizados pela ISSMFE em 1989, constatou-se em artigos que o DPL (Penetrômetro Dinâmico Leve) tem sido oficialmente mais utilizado em pesquisa de investigação geotécnica no Brasil. Poucas são as pesquisas geotécnicas realizadas com Penetrômetro Dinâmico Pesado. Em comparação com o DPL, não alcança 5%.

Na atualidade, o Penetrômetro Dinâmico Leve PANDA tem sido utilizado nas investigações geotécnicas, principalmente aplicadas à terraplanagem e pavimentação. Os seus dados são empregados em projetos: de fundações rasas; de base e sub-base de rodovia; e de pesquisa para dissertações de Mestrado e teses de Doutorado.

## 2.4 PENETRÔMETRO DINÂMICO LEVE

### 2.4.1 Penetrômetro DPL NILSSON

Conforme relatos do Nilson (2001), o DPL Nilson foi construído em 2001, tomando como referência uma norma internacional que padronizou esse tipo de instrumento. O autor planejou um equipamento de integração por pequenos módulos que facilitasse o transporte, a montagem e a utilização prática nos ensaios de campo.

Cada módulo foi constituído por: um cone ou ponteira cônica com área lateral de  $37,4 \text{ cm}^2$  e área de secção transversal de  $10 \text{ cm}^2$ ; massa de 4,85 kg; comprimento total de 95 mm e comprimento da ponta de 25 mm; um martelo para cravação, com massa de 10 kg, guiado por haste auxiliar de 22 mm de diâmetro, que deve cair em queda livre de uma altura de 500 mm sobre uma cabeça metálica com diâmetro de 55 mm e massa máxima de 1,695 kg.

O parâmetro de medida foi  $N_{10}$ , índice que informa o número de golpes aplicados na cabeça de bater para o cone penetrar 10 cm no solo. A medição pode alcançar 12 m de profundidade, em solo mole. É apropriado para ensaio em solo, onde  $N_{NSP} \leq 5$ . As hastes para conexão das peças são maciças e segmentadas. Cada uma tem o comprimento máximo de 1 m, diâmetro de 20 mm e massa de 2,89 kg/m.

A adaptação foi feita para operação manual, incluindo plataforma de prumo e hastes com marcadores de leitura. As peças são ergonômicas, podem atender ensaios em diferentes tipos de solo, desde que não sejam duros. Com o equipamento, pode-se realizar ensaio de atrito lateral por torquímetro, além de instalar-se em praticamente qualquer local; mesmo em terreno inclinado e/ou acidentado, tem alta produtividade. Conforme o tipo de solo, realiza-se em média, 50 metros de furos por dia, por equipamento. Pode ser transportado em um veículo de passeio e não gera poluição nem consome energia elétrica ou combustível fóssil durante a operação.

Um diferencial no ensaio com DPL Nilson é a verificação do valor do torque. Com o equipamento, pode-se realizar ensaio de atrito lateral por torquímetro. Quando necessária, a medida deve ser executada a cada metro de profundidade alcançado pelo cone. O valor do

torque é obtido com a medição do momento máximo, portanto o torque é o momento máximo alcançado no instante anterior à ruptura do solo, enquanto que o momento resistente é aquele alcançado durante a rotação contínua após a ruptura (NILSSON, 2008).

A figura 5 mostra a foto de um equipamento DPL Nilsson, utilizado num ensaio de campo para mensurar a resistência de um solo à penetração com carga dinâmica.

**Figura 5** - Equipamento DPL Nilsson, com plataforma de prumo



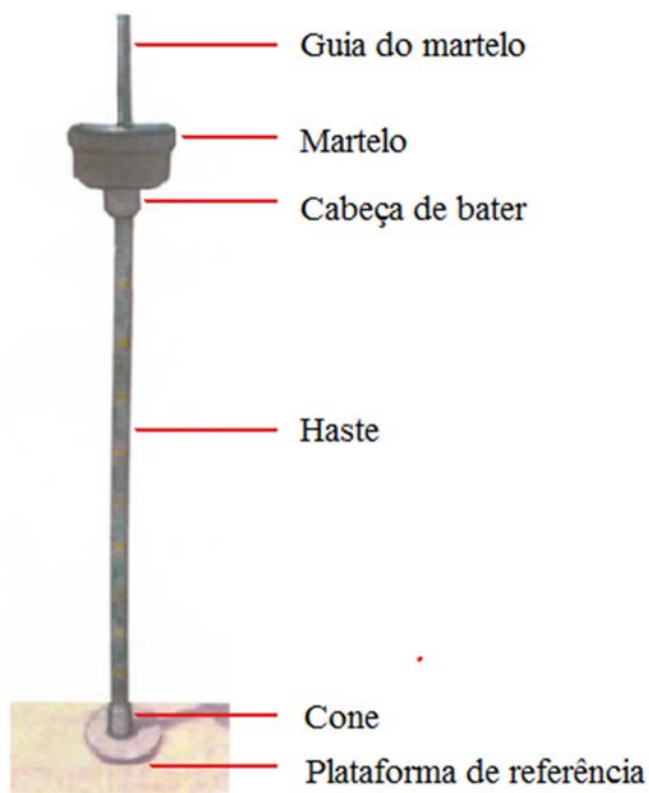
Fonte: Sanchez et al. (2010).

#### 2.4.2 Penetrômetro DPL CEFET

O equipamento DPL CEFET foi confeccionado de acordo com as normas DIN 4094-1, (ÁVILA; CONCIANI, 2006a). Cada unidade é constituída por uma haste oca de borda grossa, com 4 mm de espessura, 1 m de comprimento e 22 mm de diâmetro externo. A haste é segmentada e adaptável a outras peças por meio de rosca interna; o martelo possui massa de 10 kg que, no ensaio, deve se deslocar 500 mm de altura, em queda livre, através de uma haste guia com 22 mm de diâmetro; tem uma cabeça de bater com 0,70 kg de massa e 50 mm de diâmetro; um cone cilíndrico com  $112 \text{ cm}^2$  de área lateral; a base mede 37 mm de diâmetro; o comprimento total é de 100 mm, com 22,8 mm de comprimento da ponta, 6,25 kg de massa; e a ponta do cone tem ângulo de 45 graus com a geratriz.

A figura 6 mostra a foto de um ensaio de campo com equipamento DPL, para avaliar a resistência de um solo à penetração com carga dinâmica. O ensaio foi realizado numa área urbana, onde será construído um edifício residencial.

**Figura 6** - Equipamento DPL CEFET utilizado para instrumentação eletrônica



Fonte: O próprio autor (2012).

A geometria atual do DPL CEFET foi fruto de muitos testes com os componentes do equipamento. Sousa e Santos (2008) realizaram ensaios para estudar o desempenho desse DPL, e um experimento com haste maciça, depois haste oca com borda fina e, finalmente, haste oca de borda grossa (SOUSA et al., 2008).

Verificaram que o DPL com haste maciça ficou pesado, incompatível com a proposta de projeto do equipamento. Equipado com haste de borda fina, ele ficou muito fragilizado. Nos ensaios, quando foi aumentado o comprimento das hastes por meio de conexões, elas entortaram com facilidade.

Uma conexão feita com luva externa não produziu um bom resultado nas hastes com bordas finas. Durante o ensaio de campo com o DPL CEFET, houve colapso na extremidade

de algumas hastes; outras quebraram por causa da fragilidade no local da junção. As bordas se tornaram ainda mais finas após a confecção de roscas. Esses problemas comprometeram o desempenho do equipamento.

As hastes selecionadas para o equipamento DPL CEFET foram constituídas por bordas grossas e as conexões entre elas se deram por meio de luva de união. Este equipamento apresentou menor desempenho de cravação no solo quando as conexões entre as hastes foram feitas com luvas. A explicação para esta perda de eficiência foi o atrito da luva com o solo.

O DPL CEFET foi o modelo de Penetrômetro Dinâmico Leve selecionado para ser instrumentado com sensores de deformação e de deslocamento. Esse projeto de instrumentação foi proposto como tese neste trabalho para se medir a força gerada e a velocidade provocada pela deformação no topo e no cone da haste, no instante em que é gerado um impacto na cabeça de bater do DPL.

O equipamento foi projetado com haste de aço com borda grossa e cada conexão entre hastes deve ser executada com luva de união. Essa peça leva vantagem sobre a luva de conexão, pois assegura uma uniformidade no diâmetro dos componentes, evitando atrito adicional com o solo no instante em que o equipamento for cravado no solo.

### **2.4.3 Penetrômetro tipo PANDA**

Conforme relatado por Vargas et al. (2013), PANDA (Pénétrromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté par Ordinateur) é um equipamento construído pela companhia *Soil Solution*, em parceria com o laboratório de Engenharia Civil LERMES/CUST da Universidade Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, na França. Como ferramenta, apresenta várias particularidades que diferem de outros PDL convencionais.

O PANDA é portátil, leve e prático, desenvolvido para controle de compactação e investigação geotécnica de solo. O controle é feito através da avaliação da resistência de ponta ( $q_d$ ) e da caracterização das camadas do solo. Analisa-se o local com base nas amostras, utilizando um *software* específico depois que o solo é conhecido.

O equipamento completo pesa 20 kg, incluindo 5 m de hastes. Cada peça tem 50 cm de comprimento e 14 mm de diâmetro; pontas cônicas de 2 cm<sup>2</sup>, 4 cm<sup>2</sup> e 10 cm<sup>2</sup>; um martelo com 2 kg de massa; um sensor que detecta a penetração da haste no solo; e uma maleta para transporte de equipamento e acessórios.

Para garantir bons resultados nos ensaios, as hastes utilizadas devem apresentar diâmetro externo inferior ou igual ao diâmetro da ponteira. Esse procedimento garante redução no atrito lateral das hastes com o solo.

A Figura 7 mostra um esquema e fotos que mostram aplicações práticas do penetrômetro PANDA. Mostra um ensaio de campo e outro ensaio de avaliação da qualidade técnica da execução da base e sub-base de uma rodovia pavimentada.

**Figura 7** - Equipamento DPL Nilsson



Fonte: geotecniaambiental.clf (2014).

Para garantir bons resultados nos ensaios, as hastes utilizadas devem apresentar diâmetro externo inferior ou igual ao diâmetro da ponteira. Esse procedimento garante redução no atrito lateral das hastes com o solo.

Substitui-se a ponteira de diâmetro maior por outra com diâmetro inferior quando o ensaio exige um nível mais elevado de energia de impacto. Esse procedimento é recomendado quando a cravação é planejada em materiais com resistência mais elevada à penetração, como certas bases de pavimentação ou cascalhos naturais.

Outro detalhe que deve ser observado é a relação impacto/profundidade. A profundidade mínima recomendada em cada impacto do martelo foi fixada em 1mm. A variação mais adequada se dá na faixa de 2 mm a 20 mm, Diemer et al. (2013). Essa

limitação serve para evitar o surgimento de repique elástico e geração de pressão neutra quando se tratar de solos saturados e compactados com teor acima da umidade ótima.

Uma das vantagens do equipamento PANDA é quanto ao tipo de ensaio. Ele fornece medida de energia cinética durante o processo de cravação do cone, o que permite calcular diretamente a resistência de ponta da haste no solo ( $q_d$ ) por meio da equação  $q_d$

$$q_d = \frac{M^2}{2Ae(M+P)} \quad 2.1$$

$q_d$ : resistência de ponta (Mpa) A: área da ponta ( $m^2$ );

M: massa do martelo (kg);

e: profundidade de penetração da haste para uma batida do martelo;

P: massa das hastes e ponta (kg).

O PANDA é um penetrômetro leve, operacionalizado manualmente e utiliza recurso tecnológico oferecido pelos acelerômetros. Ele é associado a uma central com microcomputador que operacionaliza os arquivos dos dados produzidos.

Com esse equipamento, realiza-se o ensaio de campo sem a preocupação de manter uma altura de queda fixo, como nos demais penetrômetros dinâmicos. A altura de queda do martelo não segue uma regra rígida; pode variar com o operador, visto que a demanda de energia de impacto é registrada no microprocessador, que define qual foi a profundidade de cravação do cone.

## 2.6 PROCEDIMENTO NO ENSAIO COM O PENETRÔMETRO COM BASE NO DPL

Com base no DPL estima-se a capacidade de carga do solo pelo registro do número de golpes que são aplicados para que o cone acoplado ao equipamento penetre 10 cm no solo. O número de golpes produzido é contado e registrado numa planilha.

Nilson (2004) recomenda observar o tipo de solo onde o DPL for usado para ensaios. Em solos finos, não se deve ultrapassar 30 golpes por minuto, para evitar reflexo de energia emitida pelo martelo no instante dos golpes. Tratando-se de solos com boa permeabilidade, durante o ensaio, pode-se aplicar até 60 golpes por minuto.

Considera-se finalizado o ensaio quando o cone alcança a camada considerada impenetrável do solo, também chamada de 'nega'. Nilson considera essa condição quando são

necessários aplicar 60 golpes para o cone do DPL penetrar 10 cm no solo. Conciani et al. (2006a) consideram o resultado do ensaio satisfatório quando é necessário aplicar 50 golpes no equipamento para o cone penetrar 10 cm no solo.

Como pode ser analisado no texto, há divergências nos critérios de avaliação de nega do solo no ensaio como DPL. Conciani chama a atenção para essas propostas: escolha de nega muito elevada pode resultar em sobrecargas que podem danificar o equipamento; esforço adicional produzido pelo atrito lateral do cone para realizar torque pode produzir deformação nas hastes, danificar roscas e até resultar em perda de ponteira (cone) do equipamento – essa peça pode ficar cravada no solo quando o equipamento for retirado do local de ensaio.

Martins e Miranda (2005) realizaram ensaios geotécnicos com DPL no norte de Portugal. Segundo eles, os testes foram realizados conforme o EC7, norma europeia Euro código-7 (1997). Essa norma recomenda uma profundidade máxima de 8m para esse tipo de penetrômetro leve.

Os autores Martins e Miranda (2005) observaram que, em determinado tipo de solo, o cone do DPL pode alcançar profundidade muito menor que 8 m. Nesse caso, o equipamento exige uma demanda crescente de energia, sendo necessário aplicar até 100 golpes para o cone penetrar 10 cm no solo, sem atingir o firme (nega). Em solo dessa natureza, além de dada profundidade, a energia de cada pancada se perde sem gerar avanço da ponta do cone do DPL, mesmo não sendo um solo rochoso.

Um DPL instrumentado com sistema eletrônico, como proposto na tese deste trabalho, surge como alternativa para analisar esse tipo de situação. O sistema avalia a variação de força e velocidade, o trabalho realizado (pela variação de energia topo/cone) e pode informar a distância de deslocamento do cone no solo após cada golpe. Essa informação é muito importante, porque pode indicar como e onde a energia será dissipada no solo, se por conta de atrito lateral ou resistência à penetração da ponta do cone.

## 2.7 CORRELAÇÃO ENTRE SPT E DPL

De modo geral, engenheiros geotécnicos que atuam na área de projetos, precisam de parâmetros confiáveis sobre diferentes tipos de solos. Esses dados são determinantes na definição do tipo de fundação para obras e na elaboração de projetos de fundações mais adequados, econômicos e seguros.

A capacidade de carga de um solo pode ser determinada por meio de ensaios geotécnicos tanto com SPT como com DPL. Eles podem gerar dados para projetos de

construção de pequeno, médio e grande porte, empregados tanto em obras civis quanto militares.

A partir da avaliação de dados estatísticos atualizados sobre a capacidade de carga dos solos que se verificou serem necessários mais estudos de novos parâmetros. Isso justifica as pesquisas desenvolvidas por Nilson e Cunha (2004), Martins e Miranda (2005), Sousa e Fonseca (2006), Ávila e Conciani (2006a) e Ribeiro Júnior et al. (2007), que mostraram a correlação de dados e métodos de sondagens dinâmicas do SPT com o DPL. As comparações foram efetuadas utilizando os gráficos construídos com essas finalidades.

Em alguns trabalhos, como o de Nilson e Cunha (2004) e Ribeiro Júnior et al. (2007), o índice ( $N_{NSP}$ ) do SPT foi substituído pelo índice ( $N_{10}$ ) do DPL. Essa substituição teve como finalidade simplificar a previsão de carga para fundação. Para verificar a correlação, Ribeiro Júnior et al. (2007) compararam a capacidade de carga de uma estaca cravada utilizando macaco hidráulico, com carga prevista em projeto dimensionada com dados do SPT e do DPL.

Para ampliar conhecimento sobre a correlação entre SPT e DPL, Nilson e sua equipe realizaram ensaios geotécnicos em diferentes tipos de solos nos estados do Paraná, São Paulo e Distrito Federal. Em cada ensaio, executou-se furo do DPL, em média, a um metro de distância do furo do SPT. Os locais e municípios indicados foram: Curitiba-PR, São José dos Pinhais-PR, Campinas-SP, Londrina-PR e Brasília-DF.

Em Curitiba, foram executados 15 SPT e 9 DPL no CIC (Cidade Industrial de Curitiba-PR), em outubro e novembro de 2001. O solo encontrado foi argila orgânica muito mole. A partir dos 5,8 m da superfície, prevaleceu silte argiloso. O ensaio com DPL alcançou 12 m. A partir de 11 m de profundidade, foram necessários até 46 golpes para o cone avançar 10 cm no solo. A correlação DPL com SPT seguiu uma equação linear para o tipo de solo.

Em São José dos Pinhais, os ensaios ocorreram em maio de 2002 e março de 2003. O solo do local era argila vermelha siltosa. Consideraram a nega do solo quando aplicaram 55 golpes para o cone avançar 10 cm. Nessa área, houve boa correlação entre DPL e SPT.

Para coletar novos parâmetros, outros testes foram executados no campo experimental da Unicamp, em Campinas-SP, no ano de 2000: 17 SPT e 6 DPL. Também estudaram o comportamento de estacas escavadas tipo hélice contínua e tipo ômega. O solo identificado no local foi argila siltosa porosa, com areia na cor vermelha, até a profundidade de 6,5 m. A partir desse nível, predominou silte argiloso com areia. Foi encontrada boa correlação entre DPL e SPT.

Na Data Poli, em Londrina-PR, em abril de 2003, foi executado um programa de Estudo de Casos de Fundações Profundas. Inicialmente, executou-se um ensaio até 9 m. O solo predominante no local foi argila siltosa porosa na cor vermelha-escura, variando de mole a

média até 9 m, passando em seguida de média para rija. O DPL pôde ser cravado até a profundidade de 12 m. A correlação entre DPL e SPT se deu praticamente pelo mesmo número de golpes. Verificou-se essa condição quando foi necessário aplicar 12 golpes para o cone do DPL penetrar 10 cm no solo; o mesmo para o SPT penetrar 30 cm.

Os ensaios de correção DPL/SPT na região Centro-Oeste realizaram-se em Brasília, no espaço da UnB, em novembro de 2002. Foram desenvolvidas Metodologias de Projeto de Fundações Profundas, assentadas em solos colapsíveis. Nessa área, predominou argila porosa não saturada. O ensaio com DPL pôde ser executado até a profundidade de 10 m, limitada pelo comprimento da estaca. O solo apresentou uma brusca mudança de comportamento em função do teor de umidade. Quando o  $N_{SPT} < 5$ , o número de golpes para o cone penetrar 10 cm no solo é maior que a quantidade de golpes para barrilete do SPT penetrar 30 cm. Se o  $N_{SPT} > 5$ , o número de golpes é praticamente o mesmo, resultado típico para condição de não saturado.

Estudos para correlacionar SPT, CPT e demais penetrômetros dinâmicos, leves e pesados, foram desenvolvidos em solos graníticos, em vários locais urbanos da região Norte de Portugal, Martins e Miranda, (2005). Os estudos foram assim distribuídos: 6 na cidade do Porto e arredores; 4 na cidade de Braga; e 2 na cidade de Guimarães. Os solos desses locais mostraram granulometrias heterogêneas, classificadas como areias, com apreciáveis porções de silte. Muitas vezes, apresentaram uma pequena porcentagem de argila; noutras vezes, sua porcentagem foi nula.

A partir desses ensaios, estudaram correlações entre DPH/SPT, CPT/DPL, CPT/DPH e DPL/DPH. Todas as correlações (lineares) foram obtidas com um programa para computador SPSS (Statistical Package for Social Sciences). Conforme o relato de Martins e Miranda (2005), houve boa correlação linear entre os resultados dos ensaios com SPT e DPH. Constataram boa correlação do DPL com o CPT e descobriram que, no solo residual granítico, a nega do DPL foi indicada antes de o cone atingir o leito rochoso, confirmando o limite de penetração do DPL em 8m, estabelecido na Eurocode 7 EC-7.

Os autores Martins e Miranda (2005), alertam que, mesmo em profundidades menores, o DPL apresenta uma situação contraditória de nega. É uma situação que ocorre em solo argiloso úmido, com grãos finos. A energia produzida pela propagação de onda de tensão se dissipa no solo, sem o avanço do cone. Quando instrumentada por sensor, essa situação pode ser identificada no local de ensaio. Caso dessa natureza ocorre porque, para além de dada profundidade, em certos tipos de solo, a energia de cada pancada se perde sem que haja avanço da ponta do penetrômetro, mesmo não sendo terreno rochoso. Além disso, uma pequena pedra ou um conjunto de seixos poderão impedir a penetração.

Trabalhos com propostas de ensaios para correlação do SPT, DPL e CPT também foram desenvolvidos em solos noutra região de Portugal, Sousa e Fonseca (2006). As pesquisas foram executadas em solo granítico, aterro como solo xistoso, maciço natural e solos de origem vulcânica. Esses locais estão situados em Maia e no Porto.

A correlação do DPL, SPT e CPT teve como base os resultados obtidos com prova de carga em placa e a utilização de métodos de previsão de cargas para fundações rasas. Os autores não apresentaram proposta para predição de estaca. Eles apenas compararam os resultados, que mostram se houve ou não boa concordância do DPL com outros tipos de penetrômetros.

Ávila e Conciani (2006a) realizaram ensaios comparativos entre DPL e SPT em Primavera do Leste-MT. Foram pioneiros no estudo de correlação de dados desses equipamentos em Mato Grosso. O solo predominante no local foi silte arenoso amarelo, não plástico. Na previsão de carga para fundação, empregaram o método Decourt e Quaresma.

Para avaliar a previsão da capacidade de carga de uma estaca apiloada, empregou-se prova de carga. Através de testes, constataram que o DPL é pouco correlacionável com dados do SPT. As correlações do DPL com capacidade de cargas de estacas mostraram-se mais compatíveis e promissoras. A desvantagem dessa técnica é que demanda tempo, custo, deslocamento de equipamentos e mão de obra qualificada.

Ribeiro Júnior et al. (2007) desenvolveram estudos de ensaios geotécnicos com DPL e SPT, referenciados por ensaio de prova de carga, no município de Jaciara-MT. O solo local foi argila arenosa vermelha, de muito mole a média. Para tal, foi elaborada previsão de carga usando dados do DPL e método estatístico para SPT.

O método estatístico utilizado foi aquele desenvolvido por Aoki e Veloso, e também por Decourt e Quaresma, que prevê a capacidade de carga de fundações com base nos dados do SPT. Confrontaram dados gerados e concluíram que a quantidade de ensaios executados foi insuficiente para correlações mais abrangentes. Há necessidade de mais estudos para conseguir um bom ajuste entre a capacidade de carga prevista com os dados do DPL e independente do modelo empírico proposto para SPT ou validação através de ensaio real de carga em estaca curta.

Nota-se que há relato de autores nacionais e internacionais que mostram estudos realizados sobre correlações de dados de ensaios DPL com SPT. O que justifica a proposta de cada autor é a falta de estudos mais aprofundados na literatura nacional sobre validação do ensaio DPL. Também não se encontram correlações mais aguçadas com outros métodos de ensaios para fundações.

As correlações foram estudadas para que resultados do ensaio DPL possam ser utilizados diretamente no cálculo de fundações, inicialmente, em estrutura de pequeno porte, onde a questão é mais relevante. Esse procedimento foi experimentado, na prática, por (NILSSON; CUNHA, 2004; ÁVILA; CONCIANI, 2006<sup>a</sup>; RIBEIRO JÚNIOR et al., 2007).

Autores como Nilsson e Cunha (2004), junto com sua equipe, utilizam DPL nos ensaios de suas obras. Justificam a necessidade de estudar a correlação com SPT e buscam discutir uma solução para um problema contemporâneo na área da construção civil. Chamam a atenção para o aumento do número de obras de pequeno porte que não dispõem de projeto confiável de fundações. Relatam que, nelas, há casos onde se verifica ausência ou quantidade insuficiente de investigação do subsolo.

Os resultados dos ensaios obtidos com DPL mostraram que a correlação com outros tipos de penetrômetros é influenciada pelos tipos de solo e serviram de base para estudos mais aprofundados e abrangentes. Algumas conclusões recomendaram cautela e outras geraram incerteza.

Não há um bom acordo entre SPT e DPL, para determinados tipos de solos, portanto não se devem fazer correlações gerais entre eles, (NILSON; CUNHA, 2004; RIBEIRO JÚNIOR et al., 2007). A correlação só poderá ser generalizada quando tiver mais resultados padronizados e referenciados em norma internacional. A generalização dos resultados requer que se façam mais ensaios com penetrômetros dinâmicos noutros locais de regiões com clima diferente (MARTINS; MIRANDA, 2005; RIBEIRO JÚNIOR et al., 2007).

A correlação entre DPL / SPT em solo residual granítico não se mostrou boa em vários locais de Portugal, Martins e Miranda (2005; Sousa e Fonseca (2006). É necessário estudar o comportamento do DPL em diferentes tipos de solos, por meio de medição da energia envolvida no equipamento, Ribeiro Júnior et al. (2007). Seria importante a automação do processo de ensaio do DPL para diminuir incertezas (NILSON; CUNHA, 2004).

## 2.8 EXECUÇÃO DPL/SPT

Como regra geral, o ensaio com equipamento SPT é indicado para solos granulares, com  $N_{SPT} \geq 5$  ou quando se tratar de fundação com profundidade superior a 12 m. O DPL é apropriado para solo mole, ou seja, de pouca resistência, solos constituídos por grãos finos, onde o  $N_{SPT} < 5$ . Neste caso, pode ser utilizado em ensaios com profundidades de até 12 m. Um bom exemplo é o solo do município de Nova Mutum-MT, mostrado na Figura 7.

Quando se leva em conta a energia envolvida no ensaio, o DPL desenvolve, no máximo, 50 Joules por golpe, enquanto que no SPT chega a 480 Joules.

Considerando-se apenas a contribuição da descida em queda livre do martelo, o SPT emite, aproximadamente, 10 vezes mais energia que o DPL. A energia e as dimensões dos equipamentos limitam a capacidade de ensaio do DPL a 12 metros de profundidade e ampliam a capacidade do SPT. Este pode atingir camadas do solo com profundidade muito maior que as alcançadas pelo DPL.

Há ainda que se considerar alguns detalhes técnicos. O barrilete amostrador do SPT tem diâmetro externo de 50,80 mm; a ponteira do DPL, padronizada pela norma ISSMFE, tem diâmetro de 35,70mm.

O amostrador do SPT tem comprimento de 457 mm (no mínimo), sem incluir 76 mm da parte bivelada. A ponteira do DPL tem comprimento de 100 mm. A Figura 2.5 ilustra bem a questão das dimensões das ponteiros utilizadas nesses equipamentos de ensaios geotécnicos.

A Figura 8 mostram fotos e desenhos de ponteiros que são empregados nos equipamentos de ensaio geotécnico. Todos eles têm por finalidades avaliar a resistência do solo à penetração com carga dinâmica ou com carga quase estático.

**Figura 8** - Ponteira de equipamento para ensaio geotécnico



Fonte: Nilson (2011).

Comparando a relação entre essas grandezas, observa-se que a ponteira do DPL realiza 12 vezes menos contato com o solo do que o barrilete do SPT. Embora o comprimento do cone DPL seja menor, há uma diferença no tipo de contato em relação ao solo.

A ponteira do DPL tem área de contato com o solo bem definida e sempre constante. É cravada de modo contínuo ao longo do trecho, enquanto que o ensaio de penetração do SPT utiliza efetivamente 45% do trecho.

Escolher entre um equipamento DPL ou SPT para realizar ensaios é uma questão que se apresenta aos pesquisadores. Por influência de resultados dos próprios ensaios, eles definiram novos critérios além dos técnicos e econômicos, Nilson (2003); fez algumas recomendações. Na escolha entre SPT e DPL, utiliza-se DPL:

- a) em solos que apresentam  $N_{SPT} < 5$ , ou seja, um solo mole em que o barrilete do SPT avança, no mínimo, 30 centímetros quando o martelo realiza cinco golpes no equipamento;
- b) em solos finos, constituídos por argilas porosas, quando é importante saber o atrito lateral (caso em que há necessidade de uso de estacas);
- c) quando é necessário fazer muitos furos de sondagens; e
- d) quando os casos são difíceis, devido à topografia do terreno ou por questões ambientais e de preservação, desde que o  $N_{SPT} < 5$ .

Na figura 9 é mostrado a foto de um solo onde o  $N_{SPT} < 5$  pode-se ser realizado ensaio com equipamento DPL, até 12m de profundidade.

**Figura 9** - Fotografia de solo mole  $N_{SPT} < 5$ , em Nova Mutum-MT



Fonte: O próprio autor (2012).

O equipamento DPL não deve ser usado para ensaios onde o solo local apresenta  $N_{SPT} > 5$ , como é o caso do exemplo de solo que se apresenta na Figura 7.

Nilson (2003) recomenda utilizar SPT:

- a) em solos de grãos médios, com  $N_{SPT} > 20$ ;
- b) quando os furos são profundos, maiores que 12 m;
- c) quando o solo é granular.

Para obras de maior porte, Nilson (2003) recomenda maior opção de ensaio, no mínimo SPT e DPL juntos.

Nilson (2003), bem como Ávila e Conciani (2005) ressaltaram a influência de água intersticial. Solo saturado e de baixa permeabilidade transmite uma parcela importante de energia para a água, provocando um aumento na resistência à penetração quando o equipamento é cravado no solo.

Num ensaio com SPT, o barrilete drena uma parte da água confinada para cima reduzindo a pressão no equipamento. No entanto, os pesquisadores citados anteriormente, fazem um alerta sobre a realização de ensaios dinâmicos em determinados tipos de solos quando os ensaios envolvem altas energias como SPT.

A Figura 10 mostra uma fotografia com imagem de um solo do cerrado. Neste tipo de solo não se recomenda ensaio com DPL, para avaliar a resistência à penetração com carga dinâmica, porque o  $N_{SPT} > 20$

**Figura 10** - Fotografia de um Solo do Cerrado em Várzea Grande-MT



Fonte: O próprio autor (2013).

Nilson (2003), bem como Ávila e Conciani (2005) ressaltaram a influência de água intersticial. Solo saturado e de baixa permeabilidade transmite uma parcela importante de

energia para a água, provocando um aumento na resistência à penetração quando o equipamento é cravado no solo.

Num ensaio com SPT, o barrilete drena uma parte da água confinada para cima reduzindo a pressão no equipamento. No entanto, os pesquisadores citados anteriormente, fazem um alerta sobre a realização de ensaios dinâmicos em determinados tipos de solos quando os ensaios envolvem altas energias como SPT.

Da Silva, Miguel e Belincanta (2006) observaram o comportamento de solos saturados: “recomenda-se muita cautela na realização de ensaios em solo saturado com equipamento SPT, a pressão exercida pela água pode levar a uma avaliação incorreta da sua resistência”.

Solo saturado é também problemático para ensaio com equipamento DPL. Solos finos são menos impermeáveis. Quando o cone do DPL é cravado no solo, não há tempo nem condição para drenar água do solo e a geração de poro pressão pode elevar o número de golpes. Por isso não se recomenda uso de equipamento DPL em solos saturados.

Com o aumento do número de golpes, aumenta-se também a  $N_{10}$ , que é um parâmetro usado como escala para estimar a resistência do solo. No caso, o resultado não expressa a realidade da resistência do solo.

Além da água, outros cuidados devem ser tomados quando se realizar ensaios com o equipamento DPL. Ocorrência de pedra e cimentação aumenta bastante os valores de  $N_{10}$  do DPL. Esses dados formam picos isolados, fáceis de serem detectados no boletim de ocorrência.

## 2.9 PENETRÔMETROS PARA USO NO FUNDO DO MAR

O crescimento populacional nos continentes impulsionou o consumo de uma imensa quantidade de produtos. Essa expansão influenciou o setor econômico, alterou o ritmo das indústrias e expandiu tanto o comércio interior quanto o exterior. Devido a esse movimento, houve a necessidade de ampliar meios de transportes, diversificar a produção de energia e alimentos, expandir e melhorar o sistema de comunicação etc. Para atender essas demandas, houve planejamento para a ampliação de obras, principalmente as da construção civil. Esses empreendimentos ocuparam grandes áreas de solos firmes e, por consequência, tiveram que ocupar também áreas alagadas, como leitos de rios, córregos, lagos e lagoas. Nesse desafio por otimização de espaço físico, o fundo dos mares também despertou o interesse de pesquisadores, que o estudaram a fim de conhecê-lo e de utilizar novos materiais, e de empresários em busca de matéria-prima para as indústrias da construção civil, siderúrgica,

eletromecânica, petroquímica, eletroeletrônica, telecomunicações e navegações (STARK et al., 2009).

As investigações geotécnicas no fundo dos mares surgiram consorciadas aos projetos de novos penetrômetros quase estáticos e também dinâmicos, adaptados para avaliar as propriedades mecânicas de sedimentos marítimos. Eles foram produzidos tanto para uso à beira-mar, em áreas consideradas rasas, com profundidade média de 100 m, quanto para uso em alto mar, com profundidade de até 6.000 m (MEUNIR et al., 2005).

Dentre os vários tipos, destacam-se: Penetrômetro Dinâmico de Queda Livre ou Penetrômetro STING (Sea Terminal Impact Naval Gauge), Abelev et al. (2000), Penetrômetro Penfeld, Meunier et al. (2005), Penetrômetro Dinâmico Nimrod, Stark et al., (2009) e Penetrômetro Dinâmico em Queda Livre Quase Estático (STOLL et al., 2007). Eles constituíram modelos de penetrômetros quase estáticos e também dinâmicos, utilizados por pesquisadores principalmente dos Estados Unidos, França e Alemanha.

Testes realizados com sedimentos do fundo do mar mostraram que eles nem sempre são homogêneos, podendo ser heterogêneos tanto em extensão quanto em profundidade. Stoll et al. (2007) discutiram resultados petronométricos dessas superfícies com base nos testes realizados. Avaliaram que pode haver grande diferença de resistência à penetração, medido de acordo com o grau de falta de homogeneidade dos sedimentos e a taxa de penetração da sonda.

Ensaio realizados com diferentes tipos de penetrômetros mostraram que propriedades como resistência ao cisalhamento, compressibilidade e permeabilidade são influenciadas por distribuição granulométrica e densidade dos sedimentos não drenados desse local.

### **2.9.1 Penetrômetro quase estático**

Os penetrômetros quase estáticos utilizados para pesquisa no fundo do mar são:

*Penetrômetro de Cone* – Equipamento constituído por uma peça com 10 cm<sup>2</sup> de área de seção reta, cravado no solo à taxa de 2 cm/s. Esse tipo de teste foi definido pela Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM), número D3441.

*Penetrômetro versão Fundo do Mar* – Tipo de penetrômetro projetado por Stoll e sua equipe, em 2007. O equipamento foi montado numa estrutura de quatro patas, que assenta no fundo do mar. O aparato é capaz de cravar um cone até 2 m de profundidade, com uma força equivalente a 1.000 libras (454.545 kg). A unidade pode ser facilmente desmontada e transportada para testes noutra local.

Versões do penetrômetro Fundo do Mar foram projetadas com capacidades menores (1,0 e 0,5 m de penetração no solo marítimo). Essas novas versões foram construídas e utilizadas pela Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN); SACLANT Centro de Pesquisa Submarino, La Spezia, Itália; e para Laboratório de Pesquisa Naval dos EUA, Stennis Space Center, MS (STARK et al., 2009).

### **2.9.2 Equipamentos para ensaios em águas profundas**

A versão de equipamento para ensaios em águas profundas que teve grande destaque foi o penetrômetro PENFELD. É uma valiosa ferramenta desenvolvida para investigação e medições de parâmetros geotécnicos, *in situ*, durante cravação no solo do mar. O equipamento foi projetado para testes em águas profundas, com até 6.000 m de profundidade. Dotado de uma ferramenta CPT fundo do mar, realiza uma investigação que pode alcançar 30 m de profundidade no subsolo do fundo do mar.

Equipado com um cone multissensor especialmente concebido para uso em regiões mais profundas do mar, foi planejado para medir a fraca resistência das primeiras camadas do fundo do mar. Pode ser utilizado na prevenção e levantamento de riscos geológicos, como vulcões de lama e fluxos de fluidos. Coleta amostra de solo usando pistões gigantes e executa testes *in situ* utilizando o fundo do mar para fins científicos de caracterização de sedimentos, estabilidade de talude e mapeamento de risco.

Na engenharia, tem valiosa aplicação em projeto de âncoras de produção flutuante, como o utilizado na plataforma de petróleo, sistemas de armazenamento, tubulação para transporte de óleo e gás, com importante contribuição na pesquisa em Geociência (georriscos, litologia), (MEUNIER et al., 2005).

### **2.9.3 Penetrômetros para uso em solo marítimo**

Dentre os variados tipos de ferramenta para investigação do solo marítimo, o SONDA XBT é um penetrômetro que foi introduzido na comunidade marinha por Stoll e Akal (1999). Planejada para realizar uma rápida avaliação das propriedades do solo do fundo do mar, a sonda XBP dispõe de um acelerômetro que detecta a desaceleração com os impactos da unidade que penetra no fundo do mar, em um terminal com velocidade média de 7 m/s. O registro da desaceleração é analisado para determinar propriedades mecânicas, como a resistência ao cisalhamento. Uma das grandes vantagens desse tipo de sonda é que ela pode

ser lançada a partir de um navio em movimento, o que permite o levantamento rápido de uma considerável área do fundo do mar.

Para identificar os tipos de sedimentos utilizando os resultados dos ensaios, os pesquisadores criaram arbitrariamente três classes, de acordo com o pico de desaceleração: sedimentos em areias uniformes, com desaceleração maior que 60 g (classe I); sedimentos argilosos, com desaceleração máxima inferior a 20 g (classe III); e, dependendo da densidade no local, sedimentos com pico de desaceleração entre 20-60 g (classe II). Testes com sonda XBP foram realizados no Mediterrâneo, Báltico, Mar Negro e Golfo do México.

Outra ferramenta de grande utilidade é o Penetrômetro Dinâmico de Queda Livre (STING). Ele avalia, com rapidez, a resistência do solo constituído de sedimentos marinhos não drenados. Essa avaliação é feita a partir do registro da desaceleração do impacto da sonda do equipamento. Além dos conhecimentos científicos, essas áreas despertaram o interesse de vários ramos da construção civil, engenharia de petróleo no mar e da própria (MARINHA; ABELEV et al., 2009).

O equipamento é constituído por hastes de aço com 19 mm de diâmetro, onde são alojados todos os sensores e sistemas de dados eletrônicos. Cada haste pode estender 1, 2, ou 3 m, dependendo do alcance de penetração esperada no sedimento. As formas finais incluem discos de quatro diâmetros diferentes: 25, 35, 50 e 70 mm.

O Penetrômetro STING é dotado de um acelerômetro e dispõe de um sistema de gravação livre, transportando uma quantidade preestabelecida de dados, que devem ser transmitidos para um computador após cada teste. Durante o teste, não há nenhuma comunicação de dados entre o penetrômetro e a plataforma de lançamento. A sonda é geralmente recuperada por uma corda sintética trançada de 4 mm de diâmetro.

No grupo dos penetrômetros aquáticos, são incluídos os PROBOS. Concebidos como aperfeiçoamentos da versão STING, cada equipamento é constituído por um acelerômetro e um transdutor, que mede a força na extremidade inferior. É permanentemente ligado ao dispositivo de lançamento por um cabo elétrico de alta resistência, usado tanto para a transmissão de dados como para a recuperação da unidade depois da realização de cada teste, (STOLL et al., 2007).

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS

Estudos científicos são realizados através de ensaios para a determinação das propriedades mecânicas de materiais. Duas formas de ensaio são utilizadas com essa finalidade: ensaio mecânico não destrutivo e ensaio mecânico destrutivo.

No ensaio não destrutivo, aplica-se uma força que produz uma deformação numa determinada peça. Neste caso, a reação interna da peça equilibra a ação da força externa, o que faz com que a deformação na peça permaneça no seu regime elástico.

Já no ensaio destrutivo, os esforços aplicados geram deformações no interior da peça que ultrapassam o seu regime elástico até a sua ruptura ou destruição. Este tipo de ensaio foi o objeto de estudo de (QUINTERO; MANCOSU, 2010). O objetivo da sua pesquisa foi a realização de ensaio numa peça, com aplicação controlada de forças de tração e de flexão monitoradas por sensores de deformação até rompê-la ou destruí-la.

Além do estudo de deformação, foi analisado o desempenho de um novo tipo de sensor de deformação, que utiliza a chamada Eletrônica Impressa. No monitoramento, além dos dados obtidos, fizeram comparação do sensor strain gage convencional com um novo tipo de sensor lançado no mercado, que utiliza o Método Eletrônico Impresso.

#### 3.2 DEFORMAÇÃO DIRETA

Uma peça elástica que fica solicitada à deformação direta é o elemento utilizado na fabricação de célula de carga de alta capacidade. Esse tipo de célula é chamado de célula de coluna, pois o elemento elástico é similar a uma coluna cilíndrica, retangular ou quadrada.

A utilização de extensômetros na construção de célula de carga exige muito cuidado. O primeiro procedimento que exige muita atenção é a colagem do extensômetro na peça; ele deve ficar alinhado com a sua direção longitudinal e transversal.

Um extensômetro colado corretamente pode servir durante muito tempo, porém é praticamente impossível descolar um sensor resistivo sem correr o risco de destruí-lo; de modo geral, ele é danificado quando se tenta fazer isso.

O segundo procedimento que exige cuidado é a utilização prática da célula de carga. Ela é de concepção simples, porém apresenta o inconveniente de ser sensível a cargas excêntricas. As deformações resultantes de forças excêntricas, tanto de tração como de compressão que ocorrem nos extensômetros, são diferentes, o que acarreta uma não linearidade na saída do transdutor.

Pesquisas como as realizadas por Silva et al. (2009), Quintero e Mancosu (2010) e Leang et al. (2012), entre outros, deram importantes contribuições para inovações tecnológicas. Graças às pesquisas, novos componentes eletrônicos como CI, sensores e amplificadores são lançados no mercado, motivando a criação de diferentes tipos de projetos científicos.

Uma célula de carga, por exemplo, antes construída com sensor elétrico resistivo convencional, hoje pode ser construída com o emprego de uma nova geração de sensores produzidos pela eletrônica de impressão utilizando recursos da nanotecnologia ou nanociência, Método dos Elementos Finitos (FEM) e modelagens computacionais.

A eletrônica impressa tira proveito da nanociência no desenvolvimento de novos materiais, Silva et al. (2009). Esse tipo de eletrônica pode ser uma opção fundamental para produzir sensores de tensão, produtos eletrônicos de alta velocidade e de baixo custo. A tecnologia da eletrônica impressa permite também realizar a impressão de um sensor diretamente sobre a amostra.

Na opinião de pesquisadores como Quintero e Mancosu (2010) e Silva et al. (2009), a eletrônica impressa terá um crescimento vertiginoso nos próximos anos. Eles afirmam que esta tecnologia terá um domínio de mercado muito maior que a do silício, muito em uso nos dias atuais.

Essa nova tecnologia apresenta muita vantagem em relação aos métodos tradicionais porque pode ser utilizada com maior rapidez e menor custo, como etiqueta de identificação por rádio frequência, chassis de telefone, sensores e vários tipos de aplicações que ainda estão em estudo para o aperfeiçoamento das técnicas, dos equipamentos e dos materiais que são empregados.

A construção de uma célula de carga utilizando extensômetro elétrico resistivo requer uma série de procedimentos, como polimento da peça no local da colagem do sensor, tratamento com produto químico para retirada de impurezas, técnica adequada de colagem e cura em temperatura apropriada numa estufa. O processo se torna muito mais simplificado e rápido quando se utilizam recursos da eletrônica impressa.

Há outros fatores que devem ser avaliados na utilização de extensômetros elétricos resistivos. Alguns pesquisadores levaram em conta não apenas o processo de utilização do sensor, mas também o da sua produção. Na fabricação comercial do strain gage convencional, é utilizado método foto resistente e técnica de condicionamento ácido.

A desvantagem desse método de produção é a geração de efluentes tóxicos com grandes riscos ao meio ambiente, à saúde e para diferentes formas de vida animal ou vegetal. Outro problema é o processo industrial – produção lenta e custo muito elevado, quando comparado com a eletrônica impressa.

Os principais desafios para maior eficiência do sensor impresso, conforme a avaliação dos pesquisadores estão no desenvolvimento de material, confiabilidade do processo de impressão, procedimento da técnica e do equipamento, traço de impressão em diferentes larguras e quantidade de camadas.

Observou-se que o número de camadas afeta a resistência elétrica do traço, isto é, do sensor resistivo impresso. Quando elas aumentam, a resistência elétrica do sensor diminui. Os ensaios realizados com a célula de carga mostraram que todos os sensores tiveram uma porcentagem semelhante de deformação após uma série de repetições.

Diversos testes de tração realizados com sensor de constantan, sem retirada das amostras, mostraram menor porcentagem de deformação. Isto significou maior confiabilidade nesse tipo de sensor em relação ao impresso, nesse quesito. No entanto, observou-se, através de novas baterias de ensaios, que o sensor impresso resistivo alcança maior sensibilidade que o sensor convencional.

O comportamento desse novo tipo de sensor foi idêntico ao do convencional. A aquisição do sistema converte deformação mecânica em sinais elétricos para interpretação física, como força, pressão e torque.

No que diz respeito ao comportamento do sensor impresso quando submetido à força dinâmica, por meio de testes dinâmicos, os pesquisadores Quintero e Mancosu (2010) comprovaram que o sensor impresso resistivo apresenta uma boa vida de fadiga para medições dinâmicas, o que representa uma boa alternativa na construção de célula de carga para ensaios com carga dinâmica, como são os casos dos penetrômetros leves.

Os pesquisadores Liu e Gong (2010) apresentaram o desenvolvimento de um sistema eletrônico para medição de deformação produzida por uma força numa peça. Nesse trabalho, foi proposta a utilização de novos componentes e unidades eletrônicas, que propõe substituir com vantagens os extensômetros elétricos resistivos.

Na opinião de Liu e Gong (2010), o sistema apresenta estrutura compacta, simples de trabalhar, baixo custo, alta precisão, teste rápido, automação de aquisição e processamento de dados. Além dessas vantagens, é um sistema que vem conquistando espaço nas indústrias aeroespacial, automobilística, mecânica e também em alguns ramos da construção civil, como no caso das estruturas metálicas.

O projeto, resumidamente, consiste num medidor de tensão, amplificador, transmissão *wireless* módulo ZigBee e PC. Para captar uma deformação gerada por uma tensão na seção de uma dada peça, produzida por uma força, o strain gage convencional foi substituído por *chip* resistivo. Essa unidade eletrônica transforma sinal de microdeformação em microtensão elétrica (microvolt).

Para processar esse sinal analógico com amplitude em microvolt, foi utilizado um sistema amplificador. Esse sistema foi projetado para amplificar sinal analógico do strain gage (*chip*), filtrar e converter sinais com pico de microvolt em sinais de tensão com amplitude em volt.

O C8051F350, utilizado como um controlador central, é o microprocessador do sistema para analisar e tratar sinais. Possui 8 canais de transmissão de 24 *bits*. Recebe sinais de tensão analógicos e converte-os em sinais digitais diretamente pelo módulo ADCO.

O ZigBee empregado no projeto realiza transmissão sem fio para receber e transmitir dados. A transmissão *wireless* do módulo ZigBee comunica-se com o C8051F350. Esse processador tornou-se uma unidade de medida. A transmissão sem fio de sinais digitais é praticamente livre de erros, na distância efetiva melhora o sinal de microdeformação que resulta na melhoria da precisão da medição.

Quando os dados do remetente são recebidos, os sinais digitais são convertidos para uma porta serial do computador, em nível necessário, por meio da interface RS-232 do circuito conversor de nível incorporado no controle do microcomputador. Posteriormente, todo processamento de sinal recebido será feito através do computador. O PC é o responsável pelo processamento e controle centralizado dos dados.

Uma pesquisa muito importante no campo da eletrônica impressa foi realizada por Silva et al. (2009). Inicialmente, o trabalho desse grupo esteve focado na concepção de strain gage por modelagem numérica. O passo seguinte foi o da simulação de uma deformação, gerada por tensão, com emprego do Método dos Elementos Finitos (MET ou FEM, em inglês: Finite Element Method).

A partir dos resultados obtidos na simulação, o grupo fez correlação com resultados experimentais para estudar e compreender a eficiência dos resultados produzidos com o MET. Hoje, esse método se transformou numa rede técnica mundial empregada para entender problemas mecânicos por meio de modelagens computacionais.

Com esse trabalho, foi concretizado o desenvolvimento de um novo tipo de strain gage, gerado por modelagem numérica. Eles observaram uma forma de avaliar deformação numa estrutura flexível. Afirmam que o strain gage impresso é uma tecnologia adequada para ser aplicada em placas flexíveis. A vantagem do sensor impresso é que ele pode ser aplicado como um método direto.

Os estudos também mostram que o Método dos Elementos Finitos pode ser aplicado para simular extensômetros impressos durante testes de tensão mecânica.

### 3.3 TEORIA DA EQUAÇÃO DE ONDA APLICADA ÀS ESTACAS E UTILIZADA NO EQUIPAMENTO DPL

O equipamento DPL, quando utilizado num ensaio para determinar a resistência do solo à penetração, assume comportamento muito semelhante ao da estaca, quando é cravada no solo.

Considera-se uma estaca quando é carregada em uma extremidade por uma força dinâmica  $F$ , gerado pelo impacto de um martelo no topo dessa estaca num instante  $t$ . Antes de ocorrer choque mecânico, todas as partículas da massa desse corpo estão em repouso.

Decorrido um intervalo de tempo  $dt$ , após o impacto, essas partículas alteram o seu estado de repouso, o que pode ser observado numa seção transversal, onde um elemento  $dl$  é comprimido.

Essa força de compressão gera uma deformação. Instantes depois, a força de compressão atua noutro elemento, que é comprimido, provocando em sequência uma nova compressão e, por consequência, uma deformação nos elementos subsequentes. Devido à ação da força de compressão  $F$ , resulta uma onda de compressão que se propaga com uma velocidade  $c$ .

Tratando-se de um equipamento DPL, a ser instrumentado com duas células de carga, como é a proposta de projeto para uma Tese, o comportamento da haste desse equipamento, é comparado com o de uma estaca cravada no solo, como é o caso de um elemento de fundação de um pilar numa obra da construção civil.

Considera-se um equipamento DPL CEFET (onde foram adicionadas duas células de carga): uma célula de carga (do topo), a ser localizada na extremidade superior da haste e abaixo da cabeça de bater, outra célula de carga (do cone), que deve ser localizada na extremidade inferior da haste e acima do cone.

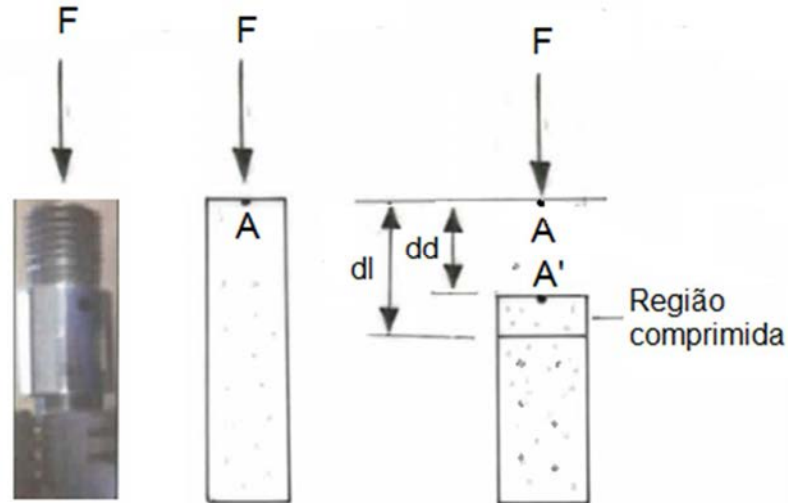
O DPL é carregado na extremidade superior, através da cabeça de bater. Com o impacto do martelo, é gerada uma onda de compressão que se propaga ao longo de cada peça e através da haste até alcançar a extremidade do cone e o solo.

A região que deve ser avaliada é o centro da luva de junção das hastes do DPL. Na área central, em destaque no entorno dessa peça, (linha horizontal e vertical do centro da peça), a grandeza que deve ser mensurada, é a força de compressão  $F$ . É a intensidade dessa força que produz deformação na seção da peça, quando é produzido um impacto na cabeça de bater do equipamento. Na região em foco, foram colados os quatro extensômetros da célula de carga elétrica.

Levando-se em conta que a força de compressão gera deslocamento, a deformação resultante, é caracterizada por uma distância  $dl$ . A deformação que se leva em conta, ocorre na

fase elástica do material que constitui a peça. Essa grandeza pode ser calculada pela Lei de Hooke, como segue:

**Figura 11** - Fotografia e esquema interno da luva do DPL sob força dinâmica F



Fonte: O próprio autor (2013).

A – Área da Seção Transversal E – Módulo de Elasticidade

$\rho$  – Densidade de Massa  $dd = \delta_l$  F – Força produzida durante o impacto do martelo. F causa deformação e gera uma onda de compressão que propaga ao longo de cada seção da haste do DPL

Deformação linear (axial) – em função da deformação

$$\epsilon = \frac{\delta_l}{dl} \quad (3.1)$$

$\epsilon$  - deformação linear

$\delta_l$  – deformação (m)

dl – deslocamento, comprimento (m)

Formas de calcular deformação

$$\delta_l = \varepsilon dl \quad (3.2)$$

$$\delta_l = \frac{Fdl}{EA} \quad (3.3)$$

F – força de compressão (N)

E – módulo de elasticidade (N/m<sup>2</sup>)

A – área da seção reta (m<sup>2</sup>)

### Lei de Hook

Módulo de elasticidade

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.4)$$

$\sigma$  – tensão mecânica (N/m<sup>2</sup>)

Tensão mecânica em função do módulo de elasticidade e deformação linear

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.5)$$

Cálculo da deformação linear em função da força, área da seção reta e módulo de elasticidade

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

Considerando que as partículas estavam em repouso na seção da peça antes da ocorrência de deformação, elas sofrem mudança de velocidade,  $dv$ , quando se movem de A para o ponto A', no instante  $dt$ . Neste caso, pode-se calcular a velocidade e a aceleração das partículas e a velocidade de propagação da onda de tensão.

Formas de expressar a velocidade de partículas na seção quando ocorre deformação

$$dv = \frac{\delta_l}{dt} \quad (3.7)$$

V – velocidade (m/s)

t – tempo (s)

$$d_V = \frac{F d_l}{EA} \frac{1}{dt} \quad (3.8)$$

$$d_V = \frac{FC}{EA} \quad (3.9)$$

Cálculo da velocidade de propagação da onda de tensão.

$$\frac{d_l}{dt} = c \quad (3.10)$$

c – velocidade de propagação da onda de tensão (m/s)

Formas de calcular a aceleração

$$a = \frac{d_V}{dt} \quad (3.11)$$

$$a = \frac{Fc}{EA dt} \quad (3.12)$$

a – aceleração (m/s<sup>2</sup>)

Lei de Newton

$$F = ma \quad (3.14)$$

m – massa (kg)

Massa específica pode ser expressa por

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.15)$$

$V$  – volume ( $m^3$ )

$\rho$  – massa específica ( $kg/m^3$ )

Cálculo do volume e aceleração em função da força e massa específica a massa será:  $m = \rho V$ , e o volume

$$V = Ad_l \quad (3.16)$$

$$a = \frac{F}{\rho Ad_l} \quad (3.17)$$

Igualando as duas equações que podem ser utilizadas para calcular a aceleração, temos aquela que pode ser usada para calcular a velocidade de propagação da onda (compressão ou atração), em função do módulo de elasticidade  $E$  e da massa específica da haste

Cálculo da velocidade de propagação da onda em função do módulo de elasticidade e da massa específica da haste do equipamento.

$$c^2 = \frac{E}{\rho}. \quad (3.18)$$

A equação (3.18) mostra que a velocidade de propagação de uma onda longitudinal de tensão ( $c$ ) depende exclusivamente das propriedades do módulo de elasticidade, ou seja do meio material por onde a onda se propaga e massa específica do material.

Cálculo da velocidade das partículas em função da tensão

$$v = \frac{\sigma c}{c} \quad (3.19)$$

A velocidade das partículas, além das propriedades do meio material por onde propaga a onda de tensão ( $c$ ), depende também do nível de tensão (mecânica de compressão) que é aplicada.

### 3.4 ANÁLISE DA EQUAÇÃO DE ENERGIA

Com base na proposta de instrumentação de um equipamento SPT, apresentou-se uma alternativa para instrumentação de um Penetrômetro Dinâmico Leve (DPL). Considere a haste de um equipamento DPL com sua seção transversal uniforme e constituído por um material considerado como sendo elástico-linear.

Quando através dessa haste se propagar uma onda de tensão unidirecional, como resultado de um impacto do martelo do DPL, um trabalho infinitesimal é realizado, num instante  $\Delta t$ , quando uma força variável  $F(t)$ , atua gerando um deslocamento  $\Delta$ , como expresso pela equação 3.1.

Trabalho realizado

$$\Delta W = F(t) \Delta \delta \quad (3.20)$$

$\Delta W =$  Trabalho realizado e velocidade = deslocamento / tempo

$$V(t) = \Delta \delta / \Delta t \quad (3.21)$$

$$\Delta W = F(t) V(t) \Delta t \quad (3.22)$$

Sendo  $V(t)$  a velocidade de partícula na haste, devido à onda de tensão.

Desta forma, a energia transferida para a haste, desde o instante de propagação da onda  $t_{(1)} = 0$  até o tempo  $t_{(2)}$  qualquer, pode ser calculada da seguinte maneira:

$$W = \int_{t_1=0}^{t_2} F_t V_t dt \quad (3.23)$$

Conforme Belicanta (1998), a primeira aplicação prática dos fundamentos da energia transferida às hastes de um equipamento SPT foi feita por Palacios (1977) e, posteriormente, por Schmertmann e Palacios (1979). Nesses trabalhos, foram utilizadas células elétricas de carga para detectar a propagação de força atuante nas hastes originadas da propagação de onda de tensão.

Comprovou-se que a transferência efetiva de energia do martelo para as hastes é interrompida no tempo  $2l/c$ . Esta conclusão foi baseada na hipótese de que a onda ascendente refletida e propagada através da haste, quando retorna ao topo, afasta instantaneamente o martelo da cabeça de bater. Nesse caso, não mais contribui significativamente para aumentar a energia transferida.

Um fato chama muito a atenção nos resultados obtidos com a instrumentação utilizada por (PALACIOS, 1977). Ele conseguiu um bom resultado no registro de força e muita dificuldade para medir velocidade. Os acelerômetros disponíveis naquela época, devido à qualidade tecnológica dos sensores, não apresentavam uma boa resolução. Como consequência, a qualidade dos sinais produzidos pelos acelerômetros dificultava a interpretação de medida de aceleração. Por não apresentar uma resolução pelo menos razoável, induzia a erro de medida.

Para resolver esse impasse, ele recorreu a recursos matemáticos, utilizando a relação de proporcionalidade entre tensão de velocidade, isto é, a velocidade das partículas na haste, impulsionada pela onda de tensão, que já havia sido apresentada, Timoshenko e Goodier (1970).

Nessa proposta, a tensão mecânica é calculada em função do módulo de elasticidade, velocidade de deslocamento das partículas na área de deformação e da velocidade de propagação da onda de tensão de compressão.

$$\sigma = \frac{EV}{c} \quad (3.24)$$

Noutra proposta, a velocidade é calculada em função da velocidade de propagação da onda de tensão de compressão, força, módulo de elasticidade.

$$V = \frac{cF}{Ea} \quad (3.25)$$

$$W = \int_{t_1=0}^{t_2} F_t V_t dt \quad (3.26)$$

W – trabalho (J)

Fazendo uma substituição da expressão da velocidade na equação da energia, gera-se uma nova equação, expressa por:

$$W = \frac{c}{Ea} \int_{t_1=0}^{t(F=0)} F^2 dt \quad (3.27)$$

A equação mostrada acima foi utilizada numa série de pesquisas para determinar a energia transferida para as hastes do equipamento SPT. Os que iniciaram essas aplicações foram Palacios (1977) e Schmertmann e Palacios (1979), que foi recomendada pela (ISSMFE, 1989).

O cálculo da energia utilizando a equação 4.6 passou a ser conhecido como método  $F^2$ , ou  $EF^2$ , considerando a integral da força ao quadrado no intervalo de tempo no instante 0 e  $t(F=0)$ . Quando a energia transferida à integral é calculada até o tempo  $2l/c$ , o método recebe a denominação de E2F.

Como proposta, Belicanta (1998) apresentou, dependendo da disponibilidade, quatro tipos de instrumentação:

1. Extensômetro instalado abaixo da cabeça de bater;
2. Extensômetros instalados simultaneamente no topo da composição (posição 1) e logo acima do mostrador;
3. Extensômetros e acelerômetros instalados numa seção abaixo da cabeça de bater (a uma distância de  $10.\phi$ , sendo  $\phi$  o diâmetro da haste);
4. Extensômetros e acelerômetros instalados simultaneamente no topo da composição (posição 3) e logo acima do mostrador.

Admitindo que a energia contida num pulso é composta por duas parcelas, sendo uma de deformação (devido à compressão do material) e outra cinética (devida ao movimento das partículas), as seguintes equações podem ser utilizadas:

a) Método EFV

$$EFV = \int_{t_0}^{t=^{max}} F.V dt \quad (3.28)$$

b) Método EF2

$$EF2 = \frac{c}{Ea} \int_0^{t=2L/c} F^2 dt \quad (3.29)$$

c) Método E2F

$$E2F = \frac{c}{Ea} \int_{t_1=0}^{t(F=0)} F^2 dt \quad (3.30)$$

A grandeza que requer atenção no emprego dessas equações é o tempo. É ele que limita o intervalo de integração de acordo com o método empregado para calcular a energia transferida às hastes do equipamento, seja um DPL ou um SPT.

No método  $E_{F2}$ ,  $t$  é o tempo para o qual a força  $F(t)$  zera pela primeira vez, enquanto que no método  $E_{2F}$  esse tempo corresponde a  $2l/c$ , sendo  $l$  o comprimento total desde a seção instrumentada até a extremidade do cone (DPL) ou do amostrador (SPT).

Os parâmetros  $E$ ,  $a$  e  $c$  representam, respectivamente: módulo de elasticidade, área da seção transversal instrumentada e a velocidade de propagação da onda nas hastes do equipamento.

Um comentário feito por Abou-Matar e Goble (1997) chama a atenção quanto ao método utilizado para calcular energia. Eles comentam que, só com medida de força, não há como avaliar experimentalmente a qualidade dos dados (acurácia das medidas), uma vez que não se sabe como o sinal de velocidade se comporta proporcionalmente, podendo incorrer em erros grosseiros.

Esses pesquisadores alertaram para o risco de se cometer erros grosseiros quando se calculava a energia por

$$EF2 = \frac{c}{Ea} \int_0^{t=2L/c} F^2 dt \quad (3.31)$$

ou utilizando a integral

$$E2F = \frac{c}{Ea} \int_{t_1=0}^{t(F=0)} F^2 dt \quad (3.32)$$

porque não era assegurada a proporcionalidade da velocidade.

Esse cuidado continua sendo válido para o sentido inverso, quando se obtém o sinal de aceleração e, por meio deste, o da velocidade, mas não é conhecido o sinal de força. Neste caso, a energia pode ser calculada pela integral

$$E = \frac{Ea}{c} \int_0^t V^2 dt. \quad (3.33)$$

Esta situação típica foi observada na instrumentação do DPL CEFET. Com a nova geração de sensores e acelerômetro do tipo MEMS (Machine Eletromechanical Systems), tornou-se muito mais fácil medir a aceleração e a velocidade do que a força.

Essa nova geração de acelerômetros MEMS oferece facilidade na medição de aceleração e velocidade. O modelo ADXL 193 constitui um sistema embarcado; não necessita de placa, bastando adicionar um regulador de tensão para controlar a tensão de alimentação.

O mesmo já não ocorre com medição de força gerada por propagação de onda de tensão na seção da haste de instrumento DPL, após o impacto de um martelo. Como a massa utilizada no choque é de apenas 10 kg, a força resultante que gera tensão elétrica, por consequência de deformação, é da ordem de microvolts.

Uma grandeza desse porte exige um sistema de amplificação e filtro muito eficientes e de qualidade para combater os ruídos indesejáveis, daí a dificuldade após a construção da célula de carga para o DPL. Há a necessidade de se projetar, dimensionar e ajustar ganho da placa de amplificação, corte da faixa de frequência indesejável e linearização da célula de carga em função das placas.

Se forem obtidas com êxito as medidas de força com célula de carga e de aceleração e velocidade com acelerômetro, o cálculo da energia aplicada na cabeça de bater, no caso do DPL, e a energia que chega no cone será calculada com êxito. Nesse caso, a energia será calculada pela isto é, em função de Força e Velocidade.

$$EFV = \int_{t_0}^{t=max} F \cdot V dt \quad (3.34)$$

Esse resultado, quando alcançado, é importante para muitos pesquisadores que buscam alcançar esse objetivo. Outra razão é que permitirá a avaliação de perdas de energia no equipamento, no instante do ensaio. Essa avaliação será decisiva para definir o desempenho deste equipamento na determinação de resistência do solo.

Também possibilitará avaliar, em função do tipo de solo, a profundidade para o melhor desempenho do DPL. Nilsson e Cunha (2004) defendem até 12 m de profundidade, no ensaio realizado com DPL em solo com  $N_{NSP} < 5$ . Chegaram a essa conclusão, levando-se em conta o número de ensaios realizados em dezenas de municípios do estado do Paraná.

Por outro lado Martins e Miranda (2003) realizaram ensaios de penetração nos solos graníticos do norte de Portugal, os quais estabeleceram o limite, que consideram viável para DPL, de 8 m de profundidade.

### 3.4 ENERGIA NO ENSAIO DPL

Num ensaio de solo, para avaliar a sua resistência à penetração dinâmica, um martelo com massa de  $M_m = 10$  kg, é levantado até um referencial, que corresponde a uma altura de queda de  $h = 0,50$  m. Dessa posição, no estado de repouso, antes do martelo ser lançado em queda, a energia potencial do sistema resulta em:

#### 3.4.1 Energia potencial teórica

$$E_{PT} = M_m \times g \times h_q = 10,135 \times 9,805 \times 0,5 = 49,69 \text{ J}$$

$M_m$  massa do martelo (kg),  $g$  aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ),  $h_q$  altura de queda (m) do martelo.

Quando não se considera perda de energia durante impacto do martelo,  $E_{PT} = E_C$ . Nessa situação, em que a perda de energia no processo é considerado desprezível, a energia potencial é convertida em energia cinética. No instante do impacto, a velocidade adquirida pelo martelo seria de aproximadamente:

#### 3.4.2 Velocidade adquirida pelo martelo

$$M_m \times g \times h_q = \frac{1}{2} M_m \times V_m^2 \quad V_m = \sqrt{2 \times g \times h_q} = \sqrt{2 \times 9,805 \times 0,5} = 3,13 \text{ m/s}$$

#### 3.4.3 Impedância da haste do DPL

$$Z = \frac{E.A}{c} \quad (3.35)$$

A impedância é uma grandeza que representa a proporcionalidade da força de compressão em relação à velocidade adquirida pelas partículas da haste, impulsionadas pela propagação da onda de compressão. A sua importância se justifica, quando são obtidos os resultados de força medida por meio de célula de carga elétrica e da velocidade, obtida com acelerômetro. A intensidade da força, calculada pelo produto da velocidade pela impedância, deve gerar resultado equivalente ao da intensidade da força medida com célula de carga.

### 3.4.3.1 Área da seção transversal

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (3.36)$$

$$A_e = \frac{\pi (d_e)^2}{4} = \frac{\pi (0,02661)^2}{4} = 5,56 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$d_e$  – diâmetro externo da haste  $d_e = 0,03661 \text{ m}$

$$A_i = \frac{\pi (d_i)^2}{4} = \frac{\pi (0,018)^2}{4} = 2,554 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$d_i$  – diâmetro interno da haste  $d_i = 0,018 \text{ m}$

$$A = A_e - A_i = 3,02 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Impedância

$$Z = \frac{E \cdot A}{c} \quad Z = \frac{21 \cdot 10^{10} \cdot 3,02 \cdot 10^{-4}}{5120} \quad Z = 12386,71$$

Massa específica

$$C^2 = \frac{E}{\rho} \quad (3.18) \quad \rho = \frac{21 \cdot 10^{10}}{5120^2} \quad \rho = 8,011 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são apresentados procedimentos metodológicos, etapas realizadas e materiais utilizados na construção de células de carga para montagem de sistemas eletrônicos para um equipamento DPL.

### 4.2 MATERIAIS

O DPL CEFET foi o modelo de Penetrômetro Dinâmico Leve selecionado para ser instrumentado com sensores de deformação e de deslocamento. Esse projeto de instrumentação foi proposto como tese neste trabalho para se medir a força gerada e a velocidade provocada pela deformação da haste desse equipamento.

A força de deformação será identificada no topo e no cone da haste, no instante em que é gerado um impacto na cabeça de bater do DPL. O equipamento foi projetado com haste de aço com borda grossa e cada conexão entre hastes deve ser executada com luva de junção. Essa peça leva vantagem sobre a luva de conexão externa, pois assegura uma uniformidade no diâmetro dos componentes, evitando atrito adicional com o solo no instante em que o equipamento for cravado no solo.

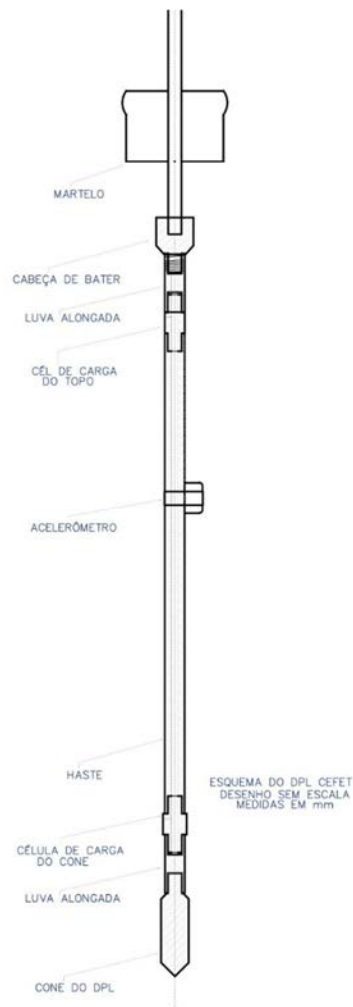
Esse projeto de instrumentação foi proposto como tese neste trabalho para se medir a força gerada e a velocidade provocada pela deformação da haste desse equipamento.

A força de deformação será identificada no topo e no cone da haste, no instante em que é gerado um impacto na cabeça de bater do DPL. O equipamento foi projetado com haste de aço com borda grossa e cada conexão entre hastes deve ser executada com luva de junção. Essa peça leva vantagem sobre a luva de conexão externa, pois assegura uma uniformidade no diâmetro dos componentes, evitando atrito adicional com o solo no instante em que o equipamento for cravado no solo.

As células foram construídas no Laboratório de Instrumentação do Departamento de Construção Civil, com apoio do Laboratório de Eletrônica e Iniciação Científica do Departamento de Eletroeletrônica do IFMT – Campus Cuiabá.

Esse projeto de instrumentação foi proposto como Tese neste trabalho para se obter a força gerada e a velocidade provocada pela deformação da haste desse equipamento. A Figura 12 mostra o esquema de um penetrômetro DPL CEFET, usado em ensaio dinâmico para determinação da resistência do solo à penetração dinâmica.

**Figura 12** – Penetrômetro DPL CEFET.



ê

Fonte: o próprio autor

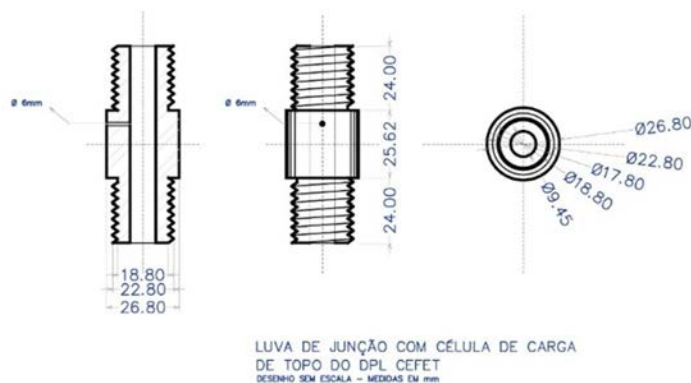
A força de deformação será identificada no topo e no cone da haste, no instante em que é gerado um impacto na cabeça de bater do DPL. O equipamento foi projetado com haste de aço com borda grossa e cada conexão entre hastes deve ser executada com luva de junção. Essa peça leva vantagem sobre a luva de conexão externa, pois assegura uma uniformidade no diâmetro dos componentes, evitando atrito adicional com o solo no instante em que o equipamento for cravado no solo.

As células foram construídas no Laboratório de Instrumentação do Departamento de Construção Civil, com apoio do Laboratório de Eletrônica do Campus Cuiabá. Cada célula de carga, constituída por sensores de deformação, foi estruturada numa luva de conexão. Essa peça servia apenas para conectar hastes do DPL. Na célula foi usada como suporte para colagem e

fixação dos extensômetros elétricos resistivos. A resistência ôhmica prevista individualmente era 120  $\Omega$ , especificada pelo fabricante como tipo PA-06-250BA-120LEN. F.s 2,11.

A colagem dos sensores na superfície da peça foi efetuada com sucesso, depois que foi polida num torno para limpeza e correção de imperfeições dessa área. O polimento foi executado em baixa rotação num torno, ajustado em 70 RPM. A Figura 13 mostra um luva polida. Outros procedimentos complementares foram executados na limpeza de resíduos e impurezas que podiam prejudicar a colagem dos extensômetros.

**Figura 13** - Luva de junção de peças do DPL CEFET.



Fonte: o próprio autor

A colagem dos sensores na superfície da peça foi efetuada com sucesso, depois que foi polida num torno para limpeza e correção de imperfeições dessa área. O polimento foi executado em baixa rotação num torno, ajustado em 70 RPM. A Figura 8 mostra uma luva de junção polida. Outros procedimentos complementares foram executados na limpeza de resíduos e impurezas que podiam prejudicar a colagem dos extensômetros.

Finalizada a preparação da peça, quatro sensores foram colados sobre a superfície da luva de junção dois na posição vertical e os outros dois na posição horizontal. Na preparação da peça para a colagem dos sensores foram utilizados:

a) *Lixa d'água 220*: Para retirar rebarbas e eliminar riscos mais grosseiros. As lixas de números 400 e 600 foram usadas para corrigir pequenas irregularidades, e as de 1.200 empregadas para polimento;

b) *Álcool isopropílico*: Substância desengraxante e solvente orgânico, para limpeza e remoção final de gorduras das superfícies pré-limpas e lixadas;

c) *Condicionador*: Líquido volátil, ligeiramente ácido, na remoção de pequenas oxidações superficiais e melhoria das condições de adesão dos extensômetros;

d) *Neutralizador*: Líquido volátil, ligeiramente básico, para neutralizar a acidez introduzida pelo condicionador;

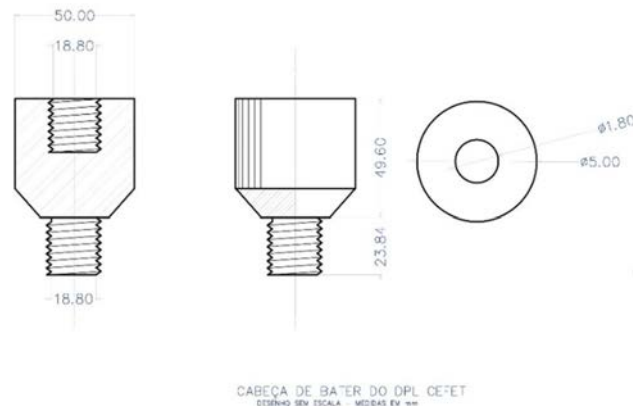
e) *Adesivo*: De acordo com o fabricante, após a colagem, o adesivo resiste à temperatura ambiente de  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $+300^{\circ}\text{C}$ . É recomendado em transdutores e em ensaios de grande precisão e de longa duração;

f) *Fita Adesiva FK-1*: Como auxiliar na manipulação, transferência e posicionamento dos extensômetros quando da sua colagem. É própria para ser submetida às temperaturas de pressão das curas dos adesivos, sem apresentar alterações nem interferências, tanto no material da base quanto no adesivo da fita. Não reage nem danifica extensômetro e é de fácil remoção após a cura do adesivo;

g) *Almofada de Borracha de Silicone*: Permite uniformização na distribuição da pressão aplicada sobre o extensômetro durante o processo de colagem, sem danificá-lo;

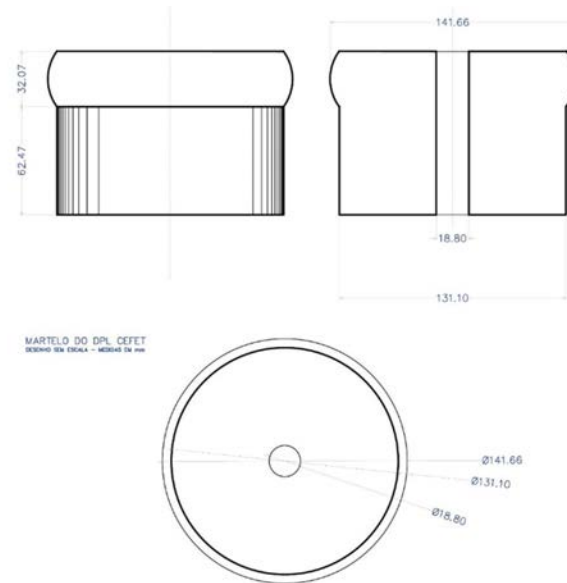
h) *Película de Teflon*: Colocada logo acima do extensômetro em processo de colagem. Serve para isolar do adesivo o que não deve ser colado quando ele se espalha pela pressão exercida. Suporta, sem alteração, as temperaturas de cura dos adesivos.

**Figura 14** – Mostra com detalhes a cabeça de bater do equipamento DPL.



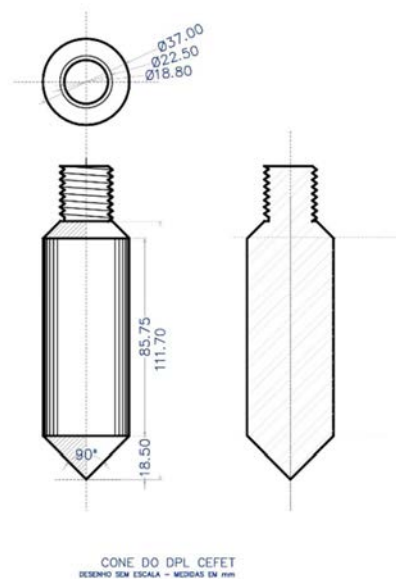
Fonte: o próprio autor.

**Figura 15** – Detalhes do martelo de 10kg do DPL CEFET.



Fonte: o próprio autor

**Figura 16** – Mostra com detalhes da ponteira (cone) do DPL CEFET



Fonte: o próprio autor

## 4.3 MÉTODOS

### 4.3.1 Circuito de alimentação e sinal: célula de carga do topo e cone

Os terminais dos sensores colados na luva de conexão foram soldados aos pares entre si, para constituir uma ponte de Wheatstone de modo que, em cada braço, ficassem associados em série. A resistência ôhmica de cada sensor foi identificada por um multímetro digital, usado como ohmímetro.

Cada medida mostrou o valor real  $R$ . Observou-se que difere dos  $120 \Omega$  previstos pelo fabricante dos extensômetros. Na prática, houve acréscimo no valor ôhmico, entre  $0,3 \Omega$  e  $0,9 \Omega$ . Os sensores da célula do Topo apresentaram os seguintes valores de resistência ôhmica:  $R_{V1} = 120,4 \Omega$ ;  $R_{H1} = 120,9 \Omega$ ;  $R_{V2} = 120,3 \Omega$ ; e  $R_{H2} = 120,4 \Omega$ .

A ponte foi construída com boa aproximação do equilíbrio elétrico. A resistência equivalente num braço ficou aproximadamente igual à da resultante do outro braço. Por essa razão, ligou-se  $R_{V1}$  em série com  $R_{H2}$ , para formar o primeiro braço da ponte. E  $R_{V2}$  foi ligado em série com  $R_{H1}$ , para formar o segundo braço da mesma ponte, como mostra a Figura 17. Apresenta-se nesta luva de conexão, os extensômetros colados na peça, como especificado no texto.

**Figura 17** - Terminais dos sensores ligados em ponte.



Fonte: O próprio autor (2012).

Na célula do Cone, foram utilizados os extensômetros  $R_{V1} = 120,6 \Omega$ ;  $R_{H1} = 120,1 \Omega$ ;  $R_{V2} = 120,4 \Omega$ ; e  $R_{H2} = 120,3 \Omega$ . Para construir a ponte de Wheatstone, ligaram-se em série  $R_{V1}$  com  $R_{H1}$ , para formar o primeiro braço e, para formar o segundo, ligaram-se em série  $R_{V2}$  com  $R_{H2}$ .

A partir dessa ligação em ponte, dois novos circuitos elétricos foram construídos. O primeiro destinou-se à alimentação elétrica dos sensores e o segundo serviu para conduzir o sinal elétrico gerado por esses mesmos sensores, isto é, quando transformam tensão de deformação mecânica em sinal de tensão elétrica.

O contato elétrico da ponte com o sistema eletrônico onde estão instalados amplificadores, filtros e demais componentes foi realizado por um cabo específico. Esse cabo especial é constituído internamente por quatro fios coloridos (vermelho, marrom, amarelo e rosa). O fio vermelho e o marrom foram soldados aos terminais dos sensores da ponte para formar o circuito de alimentação.

Ficou convencionado que o fio vermelho seria ligado no polo positivo da fonte de tensão de alimentação e o fio marrom no polo negativo. O fio amarelo e o fio rosa foram soldados noutros dois terminais da mesma ponte, onde foi gerado o sinal de tensão, que deve ser transferido às placas de amplificação e filtro do sistema eletrônico projetado para o equipamento DPL, no instante de seu uso em ensaio no solo.

#### **4.3.2 Proteção dos sensores**

Para evitar o risco de danificar o cabo do circuito de alimentação e de sinal dos sensores, ligados em ponte de Wheatstone, construiu-se um adaptador para a célula de carga. Por meio dele, o ensaio com carga estática variável para verificar linearização da célula de carga pode ser realizado com segurança. Nessa construção, foram utilizados: 2 porcas reforçadas com rosca; 1 placa de aço com 80 mm de comprimento x 50 mm de largura x 05 mm de espessura; e 1 anel reforçado com furo lateral construído com 35 mm de altura, 30 mm de diâmetro e 7 mm de espessura.

Na montagem, uma porca de aço foi unida com solda industrial a um anel com furo lateral. Depois, soldou-se outra porca numa placa de aço, como mostra a Figura 11. Fixando a célula nesse adaptador, a sua proteção estava garantida durante a realização dos ensaios com prensa eletromecânica.

A vantagem do adaptador foi manter a célula no prumo para receber a força transmitida pela prensa. No prumo, a tensão produzida pela força era distribuída uniformemente numa

luva de conexão os efeitos de deformação transmitidos aos sensores da célula de carga. Esta célula foi usada como uma unidade de estudo do comportamento de uma célula de carga, na primeira etapa com carga estática; na segunda, os ensaios foram realizados com carga dinâmica. Nos testes da primeira etapa, foram empregados prensa eletromecânica, multímetro digital, osciloscópio digital, unidade eletrônica do LabVil, microcomputador e tela LCD.

Os testes realizados permitiram avaliar:

- a) a continuidade nos circuitos e nos sensores da ponte;
- b) a sensibilidade da célula;
- c) a amplitude do sinal gerado;
- d) o tipo de amplificação a ser utilizada; e
- e) a necessidade de utilização de filtro.

E também serviram para examinar a capacidade e a sensibilidade dos equipamentos; e planejar etapas, com novos desafios técnicos a serem superados, dentre eles a construção de placa específica para amplificar o sinal de tensão; sistema de filtros para eliminar ruídos indesejáveis; aquisição de um osciloscópio com 4 canais e dotado de mais recursos técnicos que aquele utilizado nos testes; substituir a fonte simétrica construída com bateria de 9 V por outra fonte simétrica 0-15 V, alimentada em rede elétrica que pudesse garantir qualidade na alimentação dos sensores e da placa eletrônica.

A Figura 18 mostra um adaptador usado nos ensaios de força das células elétricas de carga.

**Figura 18** - Adaptador para proteger uma célula de carga no ensaio com força estática.



Fonte: O próprio autor (2011).

Para estudar o sinal produzido na célula de carga quando o equipamento foi submetido à força dinâmica, foram construídas uma célula do topo, programada para ser instalada na extremidade superior da haste e abaixo da cabeça de bater, e outra célula do cone, adaptada na extremidade inferior da haste e acima do cone.

Com a implantação do sistema eletrônico, cada célula deveria gerar sinal no instante em que o DPL fosse submetido a uma carga dinâmica. Considerando-se que o conjunto cone/célula deve ser cravado no chão, surgiu a necessidade de proteger os sensores da agressividade do solo, pois elementos como grãos de areia, partículas de argila ou umidade poderiam prejudicá-los.

#### 4.4 ENSAIO COM DPL INSTRUMENTADO COM CÉLULAS DE CARGA

Para concretizar a proteção da célula de carga, utilizou-se uma luva metálica na área externa e, internamente, adesivo *epoxy*. No planejamento dessa proteção, observou-se que, se a luva de junção mantivesse a mesma dimensão da haste, o diâmetro da célula ficaria muito próximo do diâmetro do cone.

Isto significaria que o furo a ser aberto no solo pelo cone não deixaria espaço com folga suficiente para alojar a célula a ele acoplada. No caso, ela ficaria submetida a uma pressão adicional produzida pelo solo.

Para prevenir uma possível interferência no sinal gerado pelos sensores dessa célula quando o cone fosse cravado no solo, optou-se pela redução do diâmetro da luva de conexão usado para construir a nova célula de carga.

Dessa forma, após estudo, o diâmetro da luva de conexão foi reduzido de 26,80 mm para 22,80mm. A proteção externa da célula foi construída com luva de cobre, com 32 mm de diâmetro e 2 mm de espessura; na interna, utilizou-se adesivo *epoxy*, com tempo de cura de 90min.

A Figura 19 mostra uma imagem que foi registrada logo após à realização de um ensaio de campo. Ensaio que teve por finalidade primordial, testar a proteção interna e externa dos sensores instalados na célula de carga.

**Figura 19** - Imagem de célula de carga do DPL protegido por luva de aço inox, após ensaio de resistência de solo.



Fonte: O próprio autor (2011).

#### 4.5 CÉLULAS DE CARGAS DO TOPO E DO CONE

A célula de carga instalada no topo do DPL foi construída com strain gage. Por intermédio de um multímetro, foram indicados os seguintes valores de resistência elétrica:  $R_{V1} = 120,6 \Omega$ ;  $R_{H1} = 120,3 \Omega$ ;  $R_{V2} = 120,0 \Omega$ ;  $R_{H2} = 120,8 \Omega$ . A ponte foi construída associando para formar o primeiro braço,  $R_{V1}$  em série  $R_{H1}$ . E, para formar o segundo braço,  $R_{V2}$  em série com  $R_{H2}$ .

A Figura 20 mostram luvas de conexões de um equipamento DPL que foram adaptadas para constituir a estrutura da célula de carga do topo e do cone. Também apresentam os detalhes da proteção interna e externa dos strain gages das células elétricas de cargas depois que foram construídas.

**Figura 20** - Proteção das células: cobre, PVC e epoxy.



Fonte: O próprio autor (2012).

Os strain gages usados na construção da célula de carga do cone, um multímetro os seguintes valores de resistência ôhmica:  $R_{V1} = 120,1 \Omega$ ;  $R_{H1} = 120,3 \Omega$ ;  $R_{V2} = 120,0 \Omega$ ;  $R_{H2} = 120,0 \Omega$ . A ponte dessa célula foi formada associando  $R_{V1}$  em série com  $R_{H2}$  para formar o primeiro braço e  $R_{V2}$  foi associado em série com  $R_{H1}$  para formar o segundo braço. Outro procedimento foi instalação dos circuitos de alimentação e sinal.

Na proteção externa, a luva de aço inox foi substituída por luva de cobre na célula do cone e luva de PVC na célula topo. A do topo foi protegida com luva de PVC. Durante o ensaio, a célula não tem contato com o solo. Sua função se limita a proteger os extensômetros de umidade e impurezas do ar. Além de vantagens de preço e tempo, essas luvas podem ser compradas nas lojas de material de construção.

#### 4.6 TEMPO DE CURA DO ADESIVO DOS EXTENSÔMETROS

Os extensômetros podem ser adquiridos e aplicados com ou sem terminais. A escolha depende da finalidade da utilização ou da natureza da carga a ser empregada (estática ou dinâmica). Também leva-se em conta a temperatura de cura do adesivo após a colagem desses sensores na peça, principalmente quando for usado um carregamento dinâmico.

Os sensores com terminais exigem mais atenção na cura do adesivo depois da colagem. O estanho da soldagem dos terminais desses tipos de sensores fica limitado à temperatura até  $150^\circ \text{C}$ . Acima desse valor, o estanho pode alcançar o seu ponto de fusão. Neste caso, os

terminais dos sensores colados na peça seriam desligados e, como consequência, o trabalho realizado seria perdido.

Devido a essa recomendação técnica, efetuou-se cura da célula numa estufa à temperatura de 135° C, durante 10 horas. Após essa etapa, aplicou-se sobre os sensores colados uma camada adicional do mesmo aditivo da colagem. Logo após, colocou-se a peça numa estufa ajustada à temperatura de 145° C. A norma recomenda empregar temperatura 10° C acima da usada na cura da peça.

#### 4.7 SENSORES DE DEFORMAÇÃO E DESLOCAMENTO USADOS NO DPL

O DPL foi instrumentado com duas células de carga (topo e cone) e um acelerômetro. A do topo localizou-se na extremidade superior da haste, próxima da cabeça de bater. A do cone foi fixada na extremidade inferior da haste e acima do cone. O acelerômetro foi implantado numa posição correspondente a 10 vezes o diâmetro da peça de impacto.

O material de ensaio foi preparado num tambor de plástico rígido com 80 cm de altura de areia de rio natural seca. Após a compactação, houve uma redução volumétrica mensurada em 8cm de altura do tambor. A vibração para compactar a areia foi produzida por golpes de martelo de borracha com massa de 1 kg.

Na execução dos ensaios do DPL instrumentado, o equipamento foi cravado num tambor com 72 cm de altura de areia compactada, 60 cm de diâmetro e volume de, aproximadamente, 200 litros de areia, como mostra a Figura 21.

A Figura 21 constitui a imagem de um tambor que contém areia de rio, conhecida como areia lavada. O material desse tambor compõe o tipo de solo que será utilizado nos ensaios de laboratório com o equipamento DPL CEFET instrumentado.

**Figura 21** - Tambor de areia de rio para ensaio do DPL CEFET instrumentado.



Fonte: O próprio autor (2013).

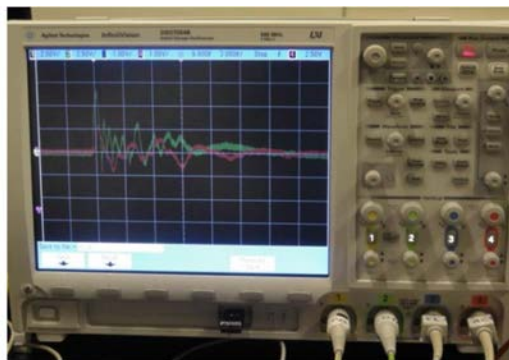
Preparado o local de ensaio, o DPL foi sendo cravado na areia por impacto de um martelo, gerado por uma massa de 10 kg. Esta se deslocava em queda livre de uma altura de 50 cm, transformando a energia potencial, quando em repouso, instantes antes da queda livre, em energia cinética, transferida ao sistema no impacto. no instante do impacto com a cabeça de bater, esta energia se transformou em trabalho mecânico, expresso pela força atuante na secção da peça.

Considerando que força gera tensão, a propagação da onda de tensão mecânica gera deformações na secção da haste. Os sensores colados na peça transformam essa tensão de deformação mecânica em sinal de tensão elétrica de modo que os extensômetros indicam a força atuante na secção e o acelerômetro indica a aceleração adquirida pelas partículas no instante da deformação. Portanto, duas grandezas são determinadas: força e aceleração.

Os resultados de medidas de força só foram considerados como dados para serem usados na pesquisa depois que cada célula de carga passou por um processo de linearização. Nesse processo, foram utilizados: 1 osciloscópio, 1 prensa mecânica elétrica motorizada, 1 fonte de tensão elétrica simétrica, 1 placa amplificadora com filtro, e 2 células de carga.

A Figura 22 mostra um osciloscópio utilizado nos ensaios da pesquisa. Esse equipamento é o modelo DSO 7054B Agilent. O aparelho é digital, possui 4 canais (largura de banda 500 MHz), e visor luminoso em tela de LCD de 12,1 polegadas. Sua taxa de amostragem é de 4 GSa/s (*gigassamples* por segundo).

**Figura 22** - Osciloscópio utilizado nos ensaios com DPL CEFET instrumentado.



Fonte: O próprio autor (2013).

Além de mostrar na tela os sinais de força de deformação e aceleração em forma de ondas, o osciloscópio gera arquivos com os dados numéricos desses sinais. Dispõe de recurso de retardo de disparo, que possibilita operação de captura de sinal resultante de um impacto, como é o caso de impacto de martelo num equipamento DPL. Os dados salvos podem ser recuperados, depois exportados para outros arquivos e podem ser operacionalizados por análise numérica.

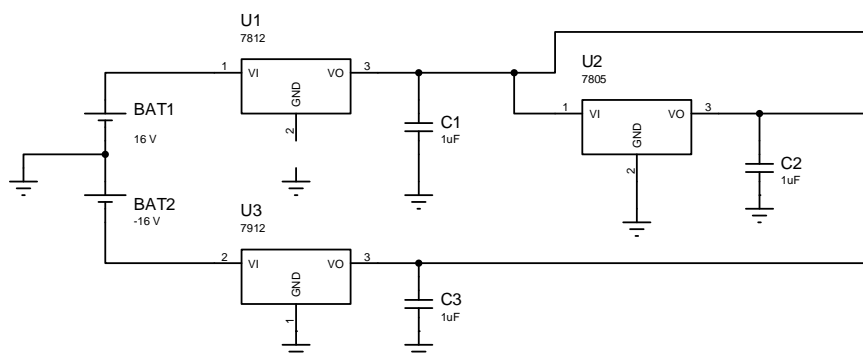
A prensa mecânica elétrica tem capacidade para 5t, é utilizada para ensaio de CBR. O anel que compõe o conjunto de medida dessa prensa tem uma constante  $k = 1,931$  e a subdivisão do extensômetro mecânico é de 0,001mm. O motor para o acionamento é especificado para 127/220 V, 11/4.8 A, 1.740 rpm e FS = 1,25.

Cada célula foi alimentada por uma fonte de tensão simétrica ajustada para 15 V (+15 V e -15 V), como pode ser conferido na imagem mostrada na Figura 5.7. Anteriormente, a fonte simétrica foi construída com duas baterias recarregáveis de 9 V.

Esse tipo de fonte foi usado nos primeiros ensaios com DPL instrumentado e gera os primeiros dados para análise da qualidade dos sinais captados. A vantagem dessa fonte é a sua portabilidade, facilidade na montagem dos circuitos, alternativa nos ensaios de campo, quando o osciloscópio for substituído por um microprocessador.

O circuito para regulagem de tensão foi constituído com CI 7812; 7912 e 7805, como se apresenta no esquema da Figura 23. Essa Figura apresenta o esquema básico de uma fonte de alimentação. Ela garante um nível estável de tensão para alimentação da placa amplificadora do sistema eletrônico do equipamento DPL.

**Figura 23** - Esquema da fonte de alimentação da placa amplificadora.



Fonte: o próprio autor.

Esse tipo de fonte foi usado nos primeiros ensaios com DPL instrumentado e gera os primeiros dados para análise da qualidade dos sinais captados. A vantagem dessa fonte é a sua portabilidade, facilidade na montagem dos circuitos, alternativa nos ensaios de campo, quando o osciloscópio for substituído por um microprocessador.

A desvantagem é a limitação da sua capacidade de carga. Observou-se nos ensaios que, depois de oito repetições, o nível de tensão começou a oscilar, comprometendo a qualidade dos sinais. Uma alternativa viável para resolver a questão da energia elétrica acumulada seria utilizar bateria de moto, de automóvel ou ainda placa solar com conversor específico.

O circuito apresentado tem por finalidade manter o nível de tensão em 5 V. Funciona como uma fonte de tensão para o circuito de alimentação da ponte de Wheatstone, onde estão ligados os sensores de deformação da célula de carga.

A placa amplificadora foi construída em dois módulos, associados com um filtro rejeita faixa. Neles, foram utilizados os seguintes componentes:

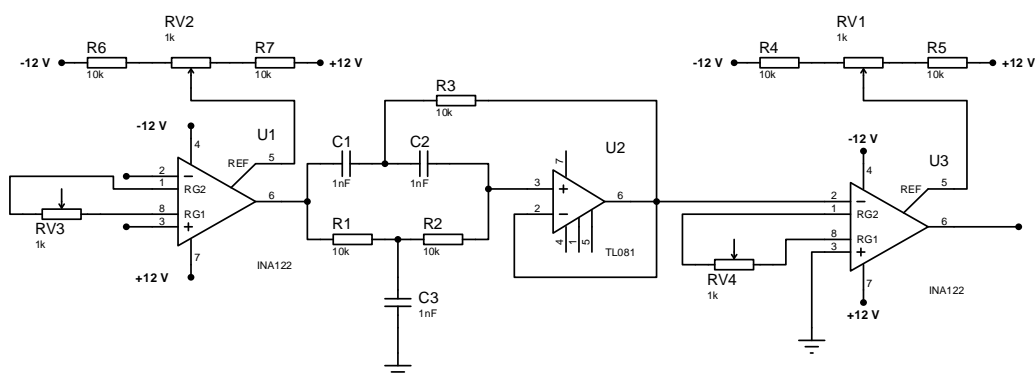
- Resistores: 8 k $\Omega$ ; 10 k $\Omega$ ; 12 k $\Omega$ ; 22 k $\Omega$ ; 47 k $\Omega$ ; 100 k $\Omega$  / 680  $\Omega$ ; 560  $\Omega$ ; 820  $\Omega$ ;
- Capacitores: 180 nF; 330 nF / 100  $\mu$ F;
- Amplificador para instrumentação: INA: 122;
- Filtro Rejeita Faixa em 60 Hz: TL081.

O CI empregado na placa amplificadora, tanto no primeiro módulo como no segundo, foi INA 122. É um amplificador de instrumentação de precisão, usado para a aquisição precisa de sinal diferencial com baixo ruído. Em seu projeto, são associados dois amplificadores operacionais de excelente desempenho e baixa corrente de repouso. Sua

utilização é ideal para instrumentação portátil e sistema de aquisição de dados. Um exemplo é o projeto de construir uma unidade eletrônica para um equipamento DPL.

A Figura 24 mostra a placa amplificadora montada em dois módulos. O primeiro eleva a amplitude do sinal de entrada, da ordem de microvolts ( $\mu\text{V}$ ) para milivolts ( $\text{mV}$ ) na saída. O segundo módulo eleva o pico do sinal de entrada de milivolts ( $\text{mV}$ ) para dezena de  $\text{V}$  na saída do sistema.

**Figura 24** - Esquema da placa amplificadora.



Fonte: o próprio autor (2013)

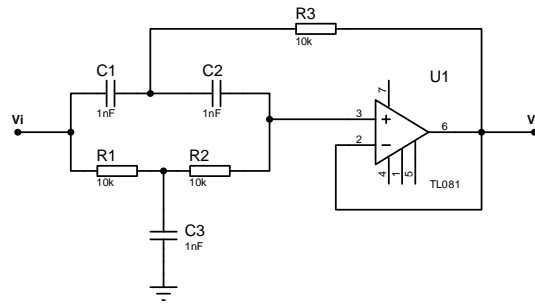
O INA 122 pode ser operado a partir de fontes de tensão duais de 2,2 V a 36 V, corrente de repouso de 60  $\mu\text{A}$ . Na amplificação, um único resistor externo fixa um ganho de 5 V/V para 10.000 V/V. Oferece baixa tensão de *offset* (250  $\mu\text{V}$  Max) e desvio de tensão previsto para 3  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  Max; exerce excelente desempenho de rejeição de modo comum. Dispõe de pacotes que incluem 8 pinos, DIP plástico e SO-8 de montagem em superfície, especificados para temperatura entre  $-40^\circ\text{C}$  e  $+85^\circ\text{C}$ , e ainda com opção estendida de temperatura industrial.

O Filtro TL081 constitui uma unidade que foi associada entre o primeiro e o segundo módulo na placa de amplificação. A Figura 25 mostra o circuito de um filtro ativo RF (Rejeita Faixa), implementado com estrutura VCVS (Voltage-Controlled Voltage Source). Essa estrutura apresenta algumas vantagens que a tornam muito usual na prática: possui boa estabilidade, baixa impedância de saída, facilidade de ajuste de ganho e de frequência, e requer poucos componentes externos.

Quando se utiliza esse tipo de filtro, recomenda-se atenção no dimensionamento dos seus componentes. O  $Q_0$  (fator de qualidade) está intimamente relacionado com os valores dos componentes passivos do circuito. Um outro fato muito importante a ser observado é que esse

tipo de circuito possibilita ganho unitário. A Figura 25 apresenta o esquema básico de um filtro rejeita faixa. Esse filtro atua associado a placa amplificadora do sistema eletrônico adaptado ao equipamento DPL.

**Figura 25** - Filtro Rejeita Faixa (RF) da placa amplificadora.



Fonte: o próprio autor (2013)

Outro aspecto que não pode ficar esquecido é que o  $Q_0$  não deve assumir valor numérico superior a 10. No dimensionamento dos componentes ativos e passivos para o circuito do filtro, seu valor foi menor que a unidade,  $1 < Q_0 < 0,6666$ .

Após estabelecer valores para  $f_{c1}$  e  $f_{c2}$ , calculou-se o valor de  $f_0$ .

$$f_0 = \sqrt{f_{c1} \cdot f_{c2}} \quad (4.1)$$

$$f_0 = \sqrt{30 \cdot 120}$$

$$f_0 = 60 \text{ Hz}$$

Logo após, determinou-se o valor da frequência angular, em função de  $f_0$ .

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad (4.2)$$

$$\omega_0 = 2\pi \cdot 60$$

$$\omega_0 = 120 \cdot \pi \text{ rd / s}$$

Com o valor da frequência angular  $\omega_0$ , obteve-se o valor do fator de qualidade  $Q_0$

$$Q_0 = \frac{f_0}{f_1 - f_2} \quad (4.3)$$

$$Q_0 = \frac{60}{120-30}$$

$$Q_0 = 0,6666$$

Para calcular os valores de  $R_1$  e  $R_2$ , calculou-se antes o valor de capacitância do capacitor que seria utilizado no circuito, em função do limite estabelecido para o fator de qualidade, que não deve ser superior a 10.

$$C = \frac{10}{f_0} \quad (4.4)$$

$$C = \frac{10}{60}$$

$$C = 0,01666 \mu F$$

$$R_1 = \frac{1}{2Q_0\omega_0 C} \quad (4,5)$$

$$R_1 = \frac{1}{2 \cdot 2/3 \cdot 120 \cdot \pi \cdot 1/6 \cdot 10^{-6}}$$

$$R_1 = \frac{2}{120 \cdot \pi \cdot 1/6} \cdot 2/3 \cdot 10^6$$

$$R_1 = 11,94 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{2Q_0}{\omega_0 C} \quad (4.6)$$

$$R_2 = \frac{2}{120 \cdot \pi \cdot 1/6 \cdot 10^{-6}} \cdot 2/3$$

$$R_2 = \frac{2}{120 \cdot \pi \cdot 1/6 \cdot 10^{-6}} \cdot 2/3$$

$$R_2 = \frac{8000}{120 \cdot \pi}$$

$$R_2 = 21,22 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.7)$$

$$R_3 = \frac{11,94 \cdot 21,22}{11,94 + 21,22}$$

$$R_3 = 7,64 \text{ k}\Omega$$

Para estabelecer a faixa de rejeição, a frequência  $f_0$  foi ajustada através dos resistores  $R_1$  e  $R_2$ . Duas foram as propostas estudadas para esse tipo de filtro: a primeira abrange uma faixa de frequência:  $f_{c1} = 50$  Hz e  $f_{c2} = 250$  Hz; já a segunda foi estudada para faixa de frequência:  $f_{c1} = 30$  Hz e  $f_{c2} = 120$  Hz. A segunda proposta de filtro mostrou-se mais eficiente para eliminar ruídos indesejáveis no intervalo de frequência de 60 Hz.

#### 4.8 ACELERÔMETRO

O acelerômetro foi incluído ao projeto de instrumentação do DPL. Instalado na haste do equipamento, ele determinou a aceleração de partículas no instante em que ocorre uma deformação em dada secção da peça. Esta é produzida por uma força ou por uma onda de tensão gerada por um impacto, como é o caso do choque do martelo na cabeça de bater do DPL.

Neste modelo, o circuito eletrônico já vem acoplado ao *chipset*, não sendo necessário utilizar uma placa. O sinal de saída do acelerômetro varia de 0 a 5 V, com variação de  $\pm 2,5$  V de ação e reação da onda no domínio do tempo.

Para garantir a alimentação de qualidade e mínima oscilação, foi adaptado junto ao acelerômetro um regulador de tensão estabilizado em 5 V.

Esse conjunto foi encapsulado com adesivo *epoxy* para proteger o sensor MENS. Outra finalidade foi facilitar a instalação do acelerômetro na haste do DPL. Antes do encapsulamento, construiu-se uma pequena caixa acrílica, em forma de prisma. Nela, após o preparo e a cura do adesivo *epoxy*, obteve-se o acelerômetro encapsulado em forma de prisma.

O seu ajuste à haste foi executado por meio de cinta metálica ajustável. Na alimentação do regulador de tensão e circuito do acelerômetro, foi utilizada uma bateria recarregável de 9 V / 250 mAh.

Nesta pesquisa foi utilizado um acelerômetro com sensor do tipo MEMS, o ADXL 193, instalado num modelo embarcado, como pode ser identificado na Figura 26.



Na outra extremidade da haste, adaptou-se uma luva de junção; em seguida, utilizou-se a segunda luva alongada, a que tem furo lateral, por onde foi transferido o cabo da célula do cone para o exterior. Nesta segunda luva, conectou-se a célula de carga do topo, e nesta adaptou-se a terceira luva alongada que, por sua vez, foi aparafusada na cabeça de bater. E, finalmente, nesta atarraxou-se o guia para martelo.

O equipamento foi testado para verificar as condições mecânicas do conjunto. As conexões ficaram bem ajustadas; a montagem do equipamento foi executada com segurança, sem deixar folgas entre as roscas das conexões, porque, além do risco de causar danos irreparáveis na estrutura física da peça, estas folgas alteram a qualidade do sinal gerado.

Na questão de natureza física, a folga pode contribuir para deformar e até mesmo quebrar roscas de conexões no ato do impacto do martelo; gera instabilidade no equipamento quando o martelo é liberado em queda livre, produzindo oscilações que contribuem para o seu deslocamento irregular, que tende a se deslocar fora do prumo.

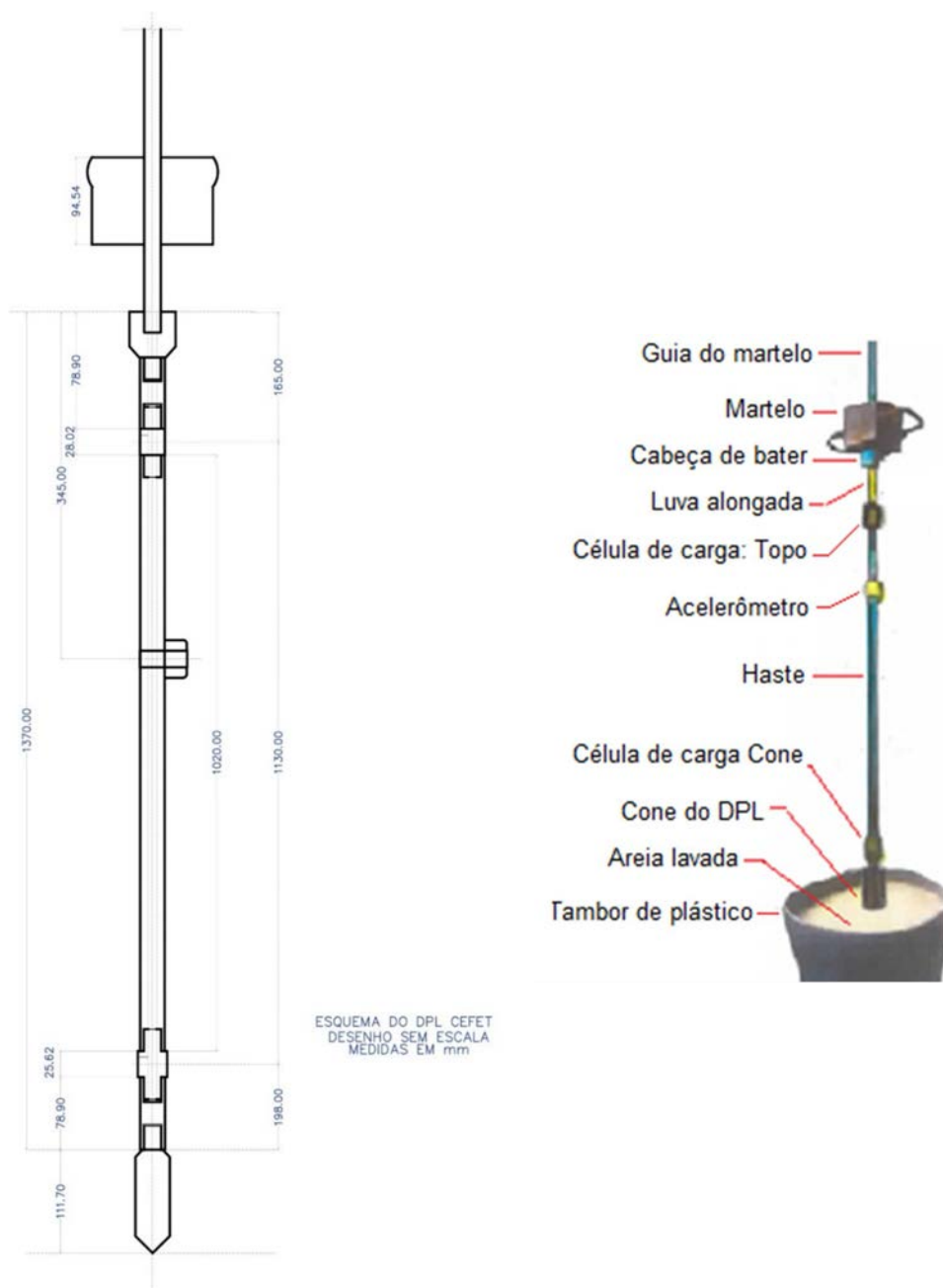
Outro problema que pode ser gerado quando há folga nas conexões é quando há a necessidade de se realizar torque no equipamento DPL. Essa operação deve ser executada cada vez que o equipamento cravado no solo avançar 1 m de profundidade. A folga entre peças pode não só danificá-las como também provocar a perda da ponteira do equipamento no interior do solo, durante o ensaio ou no instante de retirá-lo.

Além disso, pode alterar a impedância da haste nessa região, porque altera o espaço e a continuidade dos elementos que compõem o conjunto, interferindo na propagação da onda ao longo das peças, que se deslocam da cabeça de bater até atingir o cone e o solo. Nos experimentos, ficou demonstrado que um equipamento com folga gera sinal distorcido, sem qualidade, que mascara dados com as informações. Esta alteração ficou fácil de ser observada, pois os sinais gerados puderam ser mostrados na tela do osciloscópio

A atenção teve que ser redobrada durante a montagem da célula no DPL, por causa dos sensores. Embora disponha de proteção externa em metal ou PVC, uma pancada, pressão mecânica produzida por uma ferramenta como chave de boca (morsa), pode danificar os sensores.

A Figura 27 mostra um DPL instrumentado cravado no tambor de areia utilizado nos ensaios.

**Figura 27-** DPL CEFET instrumentado com célula de carga e acelerômetro.



Fonte: o próprio autor (2013).

Cuidou-se para manter a integridade do cabo da célula que estava interligada com a ponte de Wheatstone. Foi ela que deu origem aos circuitos de alimentação e de sinal. As ligações elétricas e eletrônicas de cada célula foram de fundamental importância para o sucesso do experimento, visto que o circuito elétrico alimentado pela fonte simétrica é o mesmo que transporta alimentação elétrica à ponte. Antes de concretizar essa ligação,

verificou-se a polaridade da fonte simétrica para evitar inversão de polaridade, que poderia alterar o funcionamento de alguns componentes eletrônicos que são sensíveis à inversão de polaridade.

Os sinais gerados nos sensores de deformação foram transferidos aos dispositivos de entrada das placas amplificadoras. Os sinais entregues nas saídas das placas e os gerados nos acelerômetros foram conduzidos distintamente a cada canal de um osciloscópio e projetados na tela.

O projeto obteve êxito ao captar e arquivar os sinais de força e de aceleração, e depois determinar a velocidade das partículas na seção instrumentada. Através da integração do produto da força pela velocidade, num tempo  $t = 2l/c$ , pode-se calcular a energia transferida para as hastes do equipamento quando for gerado um impacto do martelo do DPL.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 ENSAIOS DE LINEARIZAÇÃO – CALBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA

Antes de realizar os ensaios com o equipamento DPL instrumentado, para gerar sinais e produzir os dados que foram utilizados no desenvolvimento da tese, realizou-se a linearização das células de carga instaladas no Topo e no Cone do DPL.

Na Tabela 2, estão relacionados em duas colunas: a grandeza força aplicada e a tensão elétrica resultante. Nesta tabela, estão indicados os resultados dos ensaios de linearização da célula de carga elétrica do topo. Também estão incluídos os ensaios 1 e 2.

**Tabela 2** – Resultados dos ensaios de Linearização da Célula de carga: TOPO

**A tabela não deve ser delimitada à direita e à esquerda, por traços verticais.**

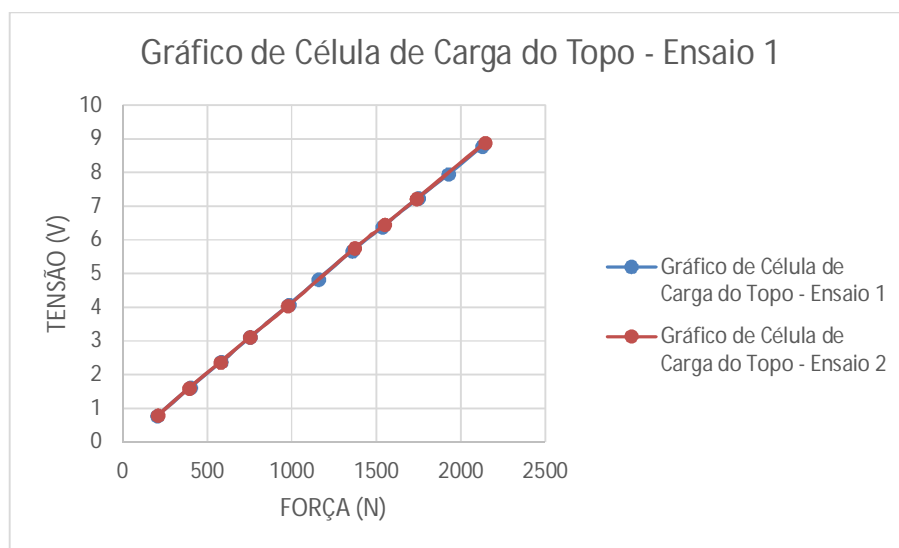
ENSAIO 1		ENSAIO 2	
FORÇA (N)	TENSÃO (V)	FORÇA (N)	TENSÃO (V)
202,755	1,3977	206,617	0,7909
399,717	2,6474	391,993	1,600
581,231	3,7845	577,369	2,3652
753,090	4,9175	753,090	3,1181
984,810	6,2013	977,086	4,0347
1158,600	7,3296	1372,090	5,7476
1355,600	8,5181	1550,600	6,4515
1535,100	9,7100	1737,900	7,2130
1747,600	10,8455	2143,400	8,8744
1927,100	11,792		
2126,000	8,7700		

Fonte: o próprio autor (2013).

No ensaio 1 realizaram-se 11 procedimentos de carregamento com carga estática progressiva, variável à razão de 200 N. Os dados reais dos carregamentos foram aplicados com os valores indicados entre 202,755 N e 2126 N. O ensaio 2 foi executado com 9 carregamentos com carga estática variável, à razão de 200 N aproximadamente. Os valores aplicados estão situados no intervalo entre 206,617 N e 2143,400 N.

Com os dados obtidos, foram construídos os gráficos que expressam em cada ponto a tensão mecânica atuante em cada seção da célula de carga em função de tensão elétrica indicada na saída da placa amplificadora. A Figura 28 mostra os gráficos que foram construídos com os dados dos ensaios 1 e 2 e a linearização da célula de carga elétrica instalada no topo de um DPL.

**Figura 28** – Linearização da Célula de Carga - Topo



Fonte: o próprio autor (2013).

Os ensaios 1 e 2 mostram que a intensidade da força mecânica empregada em cada estágio resultou de carregamento estático e foi gerada por uma prensa elétrica motorizada. No laboratório de solo essa prensa é utilizada no ensaio de CBR. Ela foi utilizada nesses ensaios de linearização, porque estava devidamente calibrada, conforme especificações do IMETRO, assegurando, neste caso, maior credibilidade nos resultados produzidos.

Antes do início dos ensaios, a prensa elétrica foi ajustada para transmitir um carregamento crescente à razão de 200 N. Em cada etapa do ensaio, a carga foi sendo

acrescentada até aproximadamente 2000 N. Um carregamento estático de 2500 N, foi o limite de carga que pode ser aplicada com segurança na célula de carga elétrica, sem correr risco de provocar descolamento dos sensores.

Na Tabela 3, apresentam-se relacionados em duas colunas: a grandeza força empregada e tensão elétrica resultante. Nessa tabela, estão indicados os resultados dos ensaios de linearização da célula de carga elétrica do cone e também estão incluídos os ensaios 1 e 2.

**Tabela 3** – Resultados dos ensaios de Linearização da Célula de carga: CONE

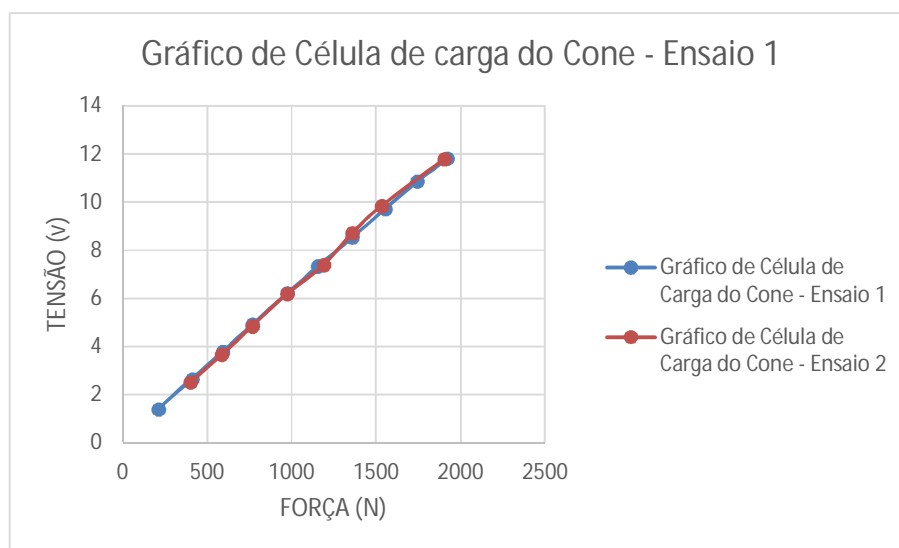
<b>ENSAIO 1</b>		<b>ENSAIO 2</b>	
<b>FORÇA (N)</b>	<b>TENSÃO (V)</b>	<b>FORÇA (N)</b>	<b>TENSÃO (V)</b>
210,479	1,3977	401,648	2,5162
409,720	2,6474	585,093	3,6468
592,817	3,7845	766,607	4,8369
768,538	4,9175	973,224	6,1872
975,155	6,2013	1189,900	7,3836
1156,700	7,3296	1359,400	8,7113
1357,500	8,5181	1533,200	9,8361
1554,500	9,7100	1902,000	11,778
1743,700	10,8455		
1921,300	11,792		

Fonte: o próprio autor (2013).

A finalidade do ensaio foi verificar se os dados gerados comprovam que as deformações mecânicas na célula de carga são proporcionais às forças atuantes. Isto é, se as deformações mecânicas foram proporcionalmente expressas pelas tensões elétricas indicadas pelos sensores da célula de carga. A deformação na haste é a resposta à força mecânica imposta estaticamente transmitida pela prensa mecânica elétrica, aplicada sobre cada célula de carga que foi submetida ao ensaio.

Através desses gráficos, foram calculados os parâmetros para verificar e comprovar a proporcionalidade entre tensão elétrica do sinal originado da deformação e a tensão mecânica que a produziu, como consequência da força atuante na seção da haste. A Figura 29 apresenta os gráficos construídos com os dados dos ensaios 1 e 2. Eles mostram a linearização da célula de carga elétrica instalada no cone de um instrumento DPL.

**Figura 29** – Linearização da célula de carga: topo



Fonte: o próprio autor (2013).

Como a grandeza força é representada por um sinal de natureza elétrica e com amplitude muito pequena, empregou-se uma placa amplificadora. Com ela, o valor máximo do sinal elevou-se da ordem de microvolt para milivolt, quando o sinal passou pelo primeiro estágio do amplificador; e logo após, elevou-se desta para algumas dezenas de volts, quando o sinal passou pelo segundo estágio da amplificação. Com esses novos valores, depois da amplificação, os dados puderam ser lidos e interpretados com mais confiabilidade e segurança nas correlações. Esses resultados podem ser conferidos nas Tabelas 2 e 3.

## 5.2 CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA COM CARREGAMENTO ESTÁTICO E CRESCENTE

Os ensaios e testes realizados com células de carga e acelerômetros produziram dados tanto com carga estática quanto com força dinâmica. Os resultados das células de carga devem ser analisados mais detalhadamente, porque envolveram uma série de atividades construtivas das células de carga, montagem das unidades eletrônicas no DPL e procedimentos nos ensaios.

Um detalhe importante a ser observado, foi a construção da célula de carga. A do topo foi montada numa luva de junção, com diâmetro 26,8mm; a do cone com diâmetro 22,8mm. Essa redução foi providencial para que o diâmetro da célula de carga elétrica do cone ficasse menor que o diâmetro do cone. Essa folga foi planejada para prevenir possível um possível contato e atrito do solo com a célula, quando o cone for cravado no solo.

Essa diferença construtiva, no entanto influenciou diretamente na capacidade de carga e deformação mecânica da célula do cone - fato observado e comprovado nos ensaios de linearização dessas células de carga. Os dados mostram que as deformações, na célula do cone, expressas por tensão elétrica, são maiores que as produzidas na célula de carga do topo, quando foram submetidas a forças estáticas aproximadamente iguais nos ensaios executados.

A comparação dos resultados para a mesma célula de carga do topo, relacionados na Tabela 2, mostra, para o primeiro carregamento do ensaio 1;  $F_1 = 202,755$  N; deformação = 0,7763 V; com o primeiro carregamento do ensaio 2:  $F_2 = 206,617$  N; deformação = 0,7909 V. Nota-se que numericamente, o acréscimo de força representa 1,905% e o acréscimo na deformação foi de, aproximadamente, 1,88%, praticamente a mesma variação em porcentagem, porque essa deformação ocorreu no regime elástico da mesma peça.

Comparando-se os dados dos ensaios que estão relacionados na Tabela 3, obtidos com a célula do cone, onde  $F_1 = 210,479$  N; deformação = 1,3977 V, com ensaio 1 da célula do topo, observou-se que o acréscimo de força aplicada resultou em 3,809%, enquanto que o acréscimo na deformação foi 21 vezes maior; o valor chegou a 80,005%. Tomando como base a lei de Hooke, observa-se que ocorreu maior deformação na célula de carga do cone, com forças atuantes praticamente iguais, porque essa célula foi construída com luva de junção com diâmetro 4 mm menor.

Com os dados das Tabelas 2 e 3, novas comparações foram efetuadas, entre força e deformação da célula do topo e célula do cone. Sendo F aplicada ao cone 768,538 (N) e

4,9175 (V); para o topo, F aplicada 753,09 (N) a deformação resultou em 3,1051 (V). Esses resultados mostraram variação de 2,05% a mais na intensidade da força e 58,36% de acréscimo na deformação.

Foram comparados os valores da força 1554,5 N com deformação de 9,71 V para o ensaio do cone. Os dados estão na Tabela 3; força de 1535,1 (N) com deformação de 6,3768 (V) para ensaio do topo, os dados estão na Tabela 2. Concluiu-se que houve um aumento na intensidade da força em 1,24%, por causa do carregamento na célula do cone em relação ao do topo mas a deformação gerou um aumento de 52,27% na célula do cone, em relação à célula do topo.

A explicação para o decréscimo na variação da deformação, embora a força atuante sobre cada célula tenha aumentada, está na força interna de reação da peça à deformação. Como já explicado pela lei de Hooke, se a força interna de reação da peça, não equilibrar a externa, a peça se destrói. Portanto essa deformação permaneceu no regime elástico da peça.

Esses ensaios foram realizados com certos cuidados para não gerar sobrecarga na célula e danificar os sensores. A linearização era importante e necessária, porém era fundamental preservar a integridade de cada célula de carga, porque o objetivo principal do projeto era realizar experimentos e testes com cargas dinâmicas.

### 5.3 RESULTADOS DE ENSAIOS DO DPL COM CARGA DINÂMICA

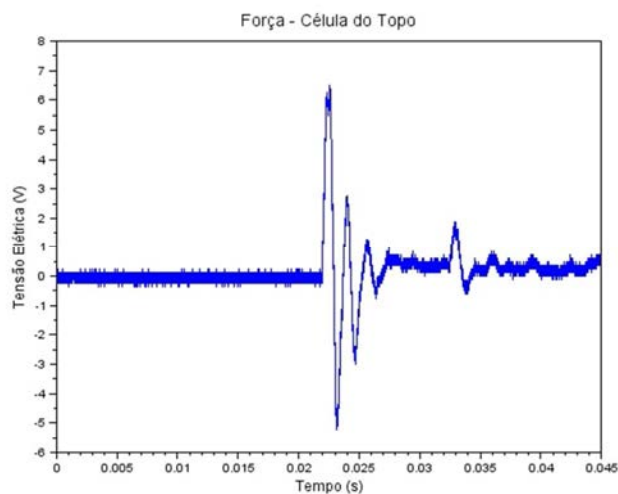
Dados e sinais produzidos com o DPL instrumentado, mostram como as células de carga se comportam. Quando sujeitas a carregamento dinâmico, produzem valores e os sinais assumem comportamentos muito diferentes dos que são encontrados nos ensaios com carregamento estático. Há uma diferença na forma de carregamento entre o ensaio estático e o dinâmico.

No carregamento estático (ou dinâmico com velocidade constante) há contato direto e um aumento proporcional do carregamento do cilindro da prensa na célula de carga. Enquanto que no carregamento dinâmico a célula de carga é atingida por uma tensão que é proporcionado por propagação de uma onda de tensão, criada pelo impacto de uma massa de 10kg em queda livre. O atrito do martelo com a haste guia, produz pequenas vibrações que geram ruídos. Por essa razão, junto com o sinal de força está associada uma série de dados que são desnecessários. O mesmo ocorre com o sinal de aceleração.

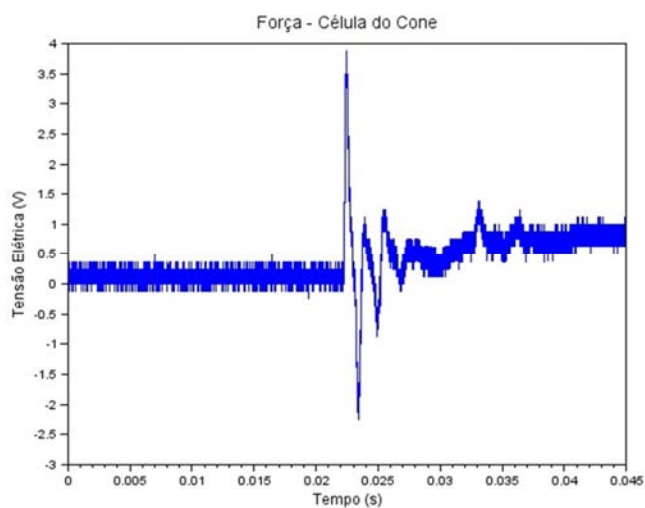
Esses dados adicionais não contribuem com informações úteis que devem ser transferidos pelos sinais de força e aceleração, quando se quer determinar a grandeza velocidade e energia em dada seção da haste ou no cone do equipamento. Esses dados são considerados indesejáveis, porque são produzidos e associados aos sinais registrados no osciloscópio, durante o deslocamento do martelo do DPL.

Dados de Sinais de força e aceleração, não podem ser utilizados numa integração numérica, quando composto por todos os dados numéricos dos ruídos, como são os sinais captados no osciloscópio. Sem a seleção dos dados indesejáveis, o programa do Scilab produz resultados de medidas eletrônicas que não representam as reais. Como pode ser observado, cada sinal mostrado nas Figuras 30, 31 e 32, os sinais dos gráficos foram reproduzidos com todos os dados, como foram reproduzidos com todos os dados, como foram captados no osciloscópio.

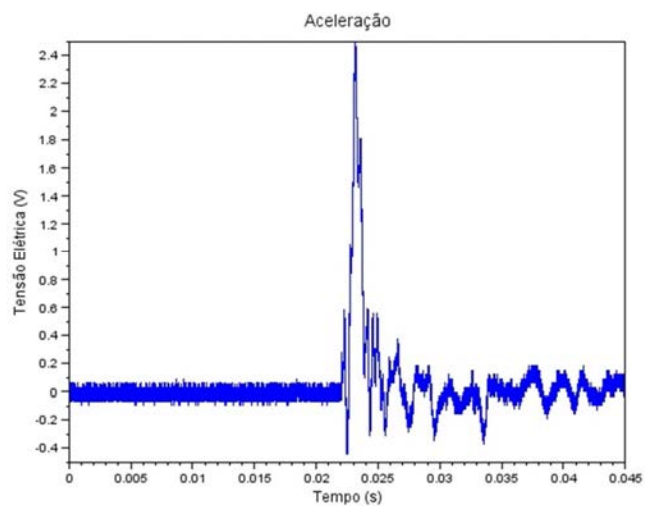
**Figura 30** – Sinal de Força da Célula de carga – Topo



Fonte: o próprio autor (2014).

**Figura 31** – Sinal de Força da Célula de carga – Cone

Fonte: o próprio autor (2014).

**Figura 32** – Sinal de Aceleração gerado no Acelerômetro

Fonte: o próprio autor (2014).

Com recursos do Scilab, os sinais de força e aceleração foram tratados por meio de manipulação de dados numéricos. Depois da captura do sinal em cada canal do osciloscópio e

a transformação em arquivo dos dados referentes ao sinal, o primeiro procedimento foi proceder à leitura do arquivo no aplicativo Scinote do Scilab.

O arquivo é apresentado com cabeçalho que identifica o eixo e número do canal de onde originou o sinal. A horizontal expressa os dados com unidade em segundos e o eixo vertical expressa - os com unidades em volts.

O segundo procedimento é a preparação dos dados na forma matricial, designado por uma matriz M, N e O, cada uma constituída por duas colunas. O terceiro procedimento é salvar cada arquivo numa pasta adequada para um sistema de arquivos no universo do Scilab.

Esses arquivos podem ser salvos com extensão csv ou sce. Cada figura é representada no eixo horizontal pela grandeza tempo, expressa em segundos, e o eixo vertical representa a grandeza tensão elétrica que tem as mesmas unidades por causa dos sensores, mas representam grandezas diferentes.

Na célula de carga, a variação de tensão mecânica, caso dos straingages, é convertida em tensão elétrica, e variação de posição, caso do acelerômetro, é transformada em tensão elétrica. Na correlação com célula de carga, 1 Volt equivale a 2531 N. No caso do acelerômetro, 1 Volt equivale a 1225,75 m/s<sup>2</sup>.

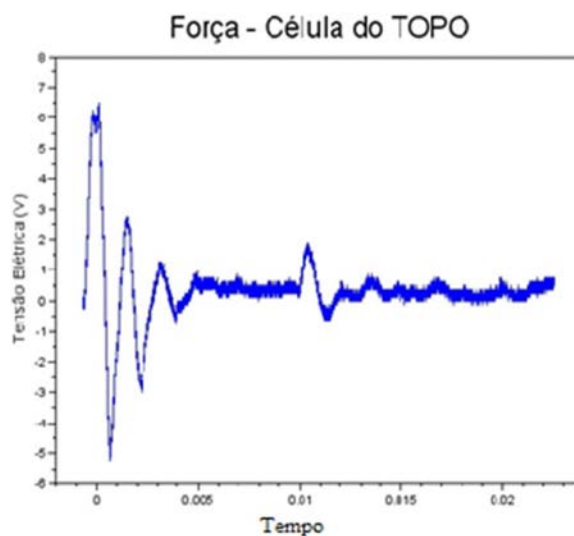
Os dados referentes a cada sinal mostrado na tela do osciloscópio, foram capturados e salvos em arquivos. Posteriormente, pode ser feita a leitura de cada arquivo no Scinote do Scilab ou ainda, transportando-os para Excel. Utilizando recursos do Scilab eliminaram-se alguns dados que estavam associados ao sinal de força e sinal de aceleração.

Quando se captura alguns desses dados, a posição do zero no eixo que contém o domínio, nem sempre é adequado para análise, leitura e interpretação do gráfico. Cada matriz pode ser analisada através do console do Scilab, o que permite examinar o tamanho da matriz, a extensão do domínio e o ponto da amplitude máxima do sinal.

Neste caso, deve-se observar que a matriz representa um sinal no domínio do tempo e amplitude representada pela tensão gerada numa célula de carga ou num acelerômetro. Para visualização do sinal, executa-se no console o arquivo preparado. O console mostrará que a execução foi feita não apresentando erro. Caso apresente algum o console mostrará onde ocorreu.

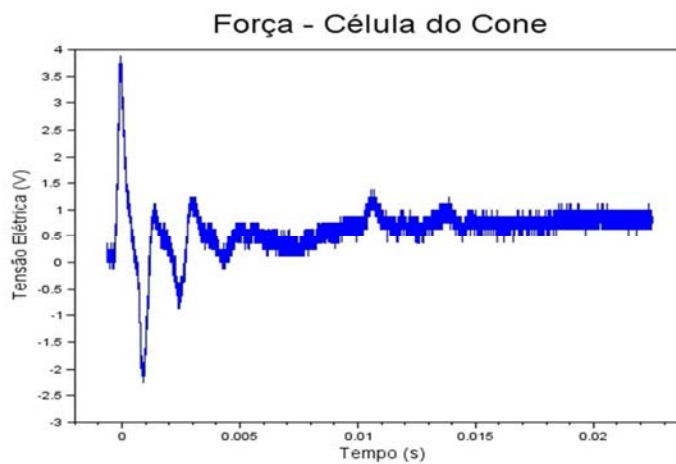
As Figuras 33, 34 e 35 mostram o sinal de força e aceleração, onde se pode observar a posição do zero no domínio depois da seleção dados numéricos com Scilab.

**Figura 33** – Sinal de Força da Célula de carga - Topo

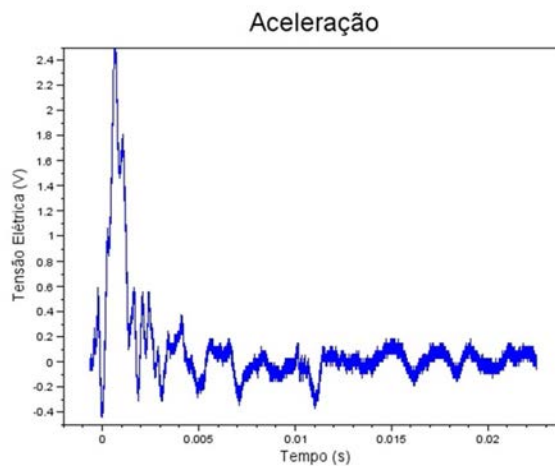


Fonte: o próprio autor (2014).

**Figura 34** – Sinal de Força da Célula de carga do cone, após uso do Scilab para seleção de dados numéricos.



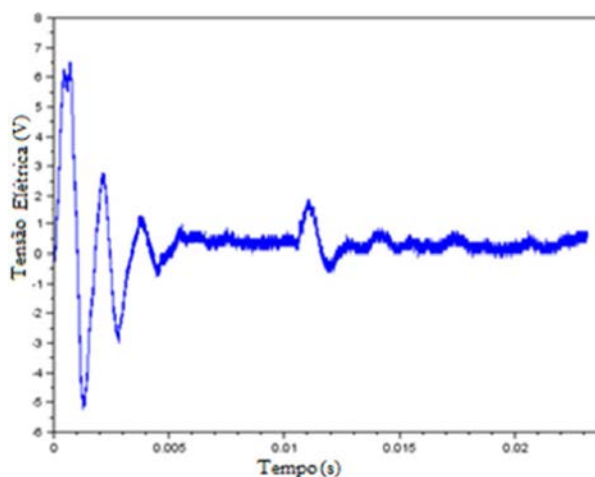
Fonte: o próprio autor (2014).

**Figura 35** - Sinal de Aceleração do Acelerômetro

Fonte: o próprio autor (2014).

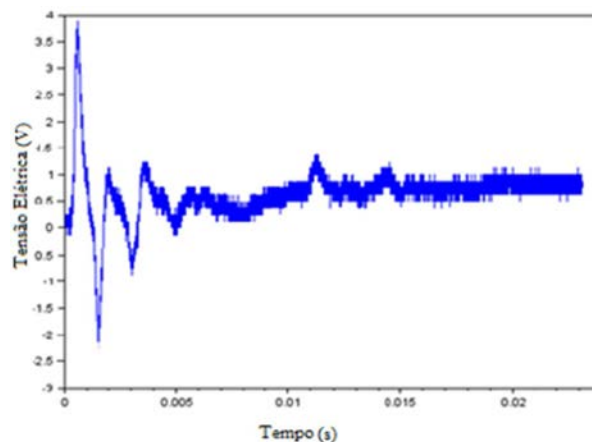
Após tratamento dos sinais, para eliminar os dados indesejáveis, utilizando recurso do Scilab, cada sinal apresentou deslocamento de zero no eixo do domínio do tempo. Essa correção deve ser efetuada para evitar possíveis erros na análise e interpretação de cada um desses sinais. Os gráficos gerados após correção da posição do zero do domínio, se apresentam como mostrados nas Figuras 36, 37 e 38.

**Figura 36** – Sinal de Força da Célula de carga - Topo. Após ajuste de zero do domínio.



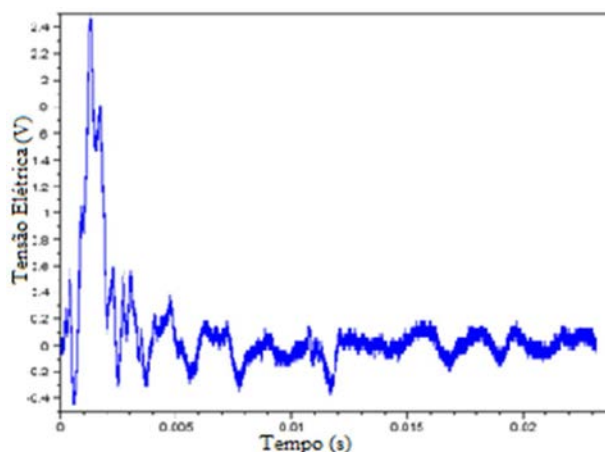
Fonte: o próprio autor (2014).

**Figura 37** – Sinal de Força - Cone. Após ajuste de zero do domínio



Fonte: o próprio autor (2014).

**Figura 38** - Sinal do Aceleração, após correção de zero do domínio.



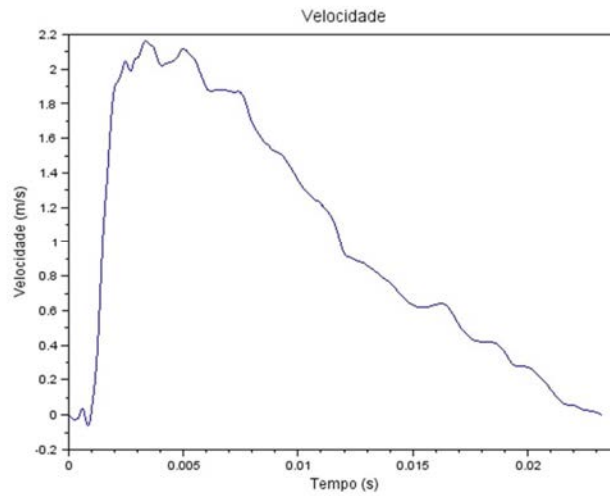
Fonte: o próprio autor (2014).

A correção da posição do zero do domínio exige um arranjo matemático. Basta considerar a variável do domínio como sendo pela diferença dessa variável do domínio, menos o mínimo do domínio. Justifica-se essa diferença pelo fato da posição anterior do ponto do domínio, começar com número negativo. Para visualização do sinal, executa-se no console o arquivo preparado.

Na manipulação dos dados dos sinais de força e aceleração, além de técnicas, propriedades e operações, recomenda-se especial cuidado e atenção nos procedimentos. A eliminação de dados de ruídos que acompanha um sinal, não deve comprometer os dados do

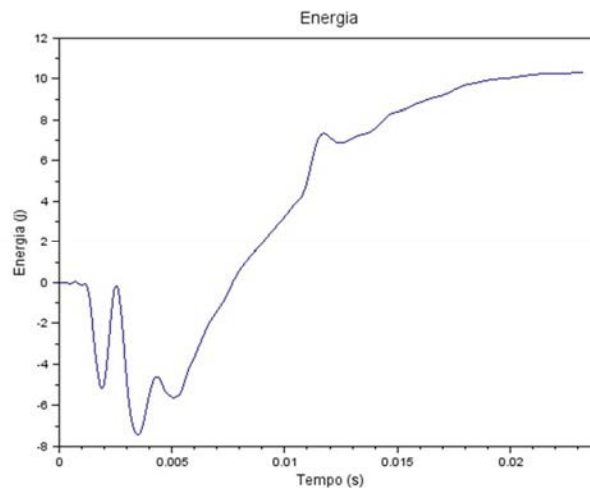
próprio sinal, o que pode conduzir a falsos resultados. Uma aplicação desse fato é o caso de se calcular a velocidade com integração da aceleração

**Figura 39** – Sinal de Velocidade resultante da integração do sinal de aceleração



Fonte: o próprio autor (2014).

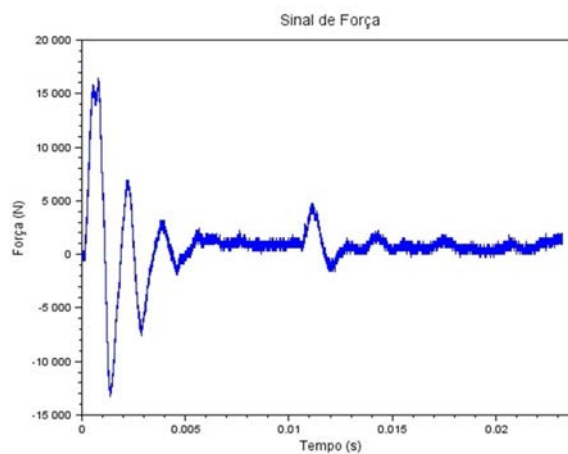
**Figura 40** – Energia que alcança o cone do DPL



Fonte: o próprio autor (2014).

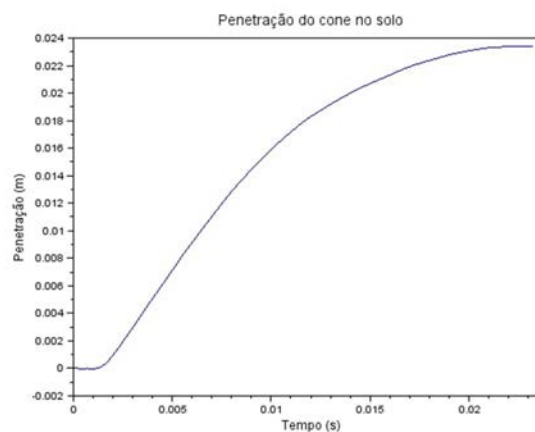
Compare o gráfico da Figura 36 com o da Figura 41. Eles foram reproduzidos com dados do mesmo arquivo. Os dados foram expressos na forma matricial para uso com o programa do Scilab. Observe que a imagem do sinal de Força na Figura 36 diverge da imagem do sinal da Figura 41, quando se considera intervalo de domínio, a partir de zero. A explicação dessa diferença é a matriz. A que reproduziu o sinal da Figura 36, tem algumas linhas a menos que a matriz que reproduziu o sinal da Figura 41. Na seleção dos dados indesejáveis dos ruídos, eliminou alguns dados do sinal de Força como mostrado no texto.

**Figura 41** – Sinal de Força, após eliminação de dados de ruídos



Fonte: o próprio autor (2014).

**Figura 42** – Sinal de Penetração do cone do DPL no solo



Fonte: o próprio autor (2014).

Outro procedimento muito importante, quando eliminam os dados dos ruídos, consiste na operação para manter a matriz que reproduz o sinal de Força com o mesmo número de linhas da matriz que reproduz o sinal de aceleração. Caso contrário, se torna impossível a operação de integração do produto da força pela velocidade no domínio do tempo - operação necessária para determinar a energia em certo ponto da seção da haste ou do cone de um DPL.

A Tabela 4 relaciona os resultados que foram obtidos com o programa do Scilab, para processamentos dos dados que transmitem informações numéricas e reproduzem os sinais de força e aceleração. Com o uso de instrução específica, escrita com recursos do programa Scilab, integrou-se o sinal de aceleração para medir a grandeza velocidade.

**Tabela 4** – Comparação entre medida real e virtual de penetração do cone do DPL

ARQUIVO	$\Delta P$ - REAL	$\Delta P$ - ELETRÔNICA	$\Delta P$ - %
ARQ2-020712T	22	23	4,54
ARQ4-020712T	24	25	4,16
ARQ19-280712N	19	19,5	2,63
ARQ6-020712T	9	9,5	5,55
ARQ9-020712T	11	11,5	4,54
ARQ20-280712N	17	18	5,88
ARQ10-020712T	12	13	8,33
ARQ11-020712T	16	17	6,25
ARQ22-280712N	18	19	5,55
ARQ14-020712T	15	15,5	3,33

Fonte: o próprio autor (2014).

O resultado da integração do produto da força pela velocidade resulta na obtenção da energia que alcança o cone e a profundidade da penetração deste no solo, proporcionada por essa parcela de energia. Como pode ser analisada, a Tabela 4, apresenta relacionadas em duas colunas, os resultados das medidas reais e eletrônicas da penetração, no solo, do cone de um DPL instrumentado

Os resultados de algumas medidas de penetração, obtidas com dados de arquivos selecionados e processados no Scilab, foram comparados com as medidas reais, realizadas com trena de fita e trena a laser. Foram tomados cuidados redobrados no processamento desses dados, para assegurar certo grau de confiabilidade na comparação entre a medida de penetração do cone do DPL no solo, medida real e medida eletrônica.

Por verificar o grau de confiabilidade, como pretendido na pesquisa, selecionaram-se arquivos com dados dos ensaios realizados em sequências diferentes e produzidos em campanhas e dias diferentes, períodos e horários. Para compilar essas informações, fez-se uma simplificação, como mostrado na Tabela 4.

ARQ2-020712T – Significa arquivo número dois, com dados de sinal, força e aceleração, obtidos nos ensaios realizados no dia 02.07.2012, período da tarde.

ARQ19-280712N – Significa arquivo número 19, com dados de sinal, força e aceleração, gerados nos ensaios realizados no dia 28.07.2012, período noturno.

Os resultados obtidos com utilização do osciloscópio e do programa do Scilab na operação e tratamento de sinais, mostraram valores numéricos, que quantificaram a quantidade de energia que efetivamente chega no cone do equipamento. É essa parcela de energia que promove a penetração do cone do DPL no solo.

Utilizando esses recursos, tornou-se viável avaliar a penetração do cone no solo, porque se conseguiu realizar a medida da grandeza força utilizando célula de carga e mensurar a grandeza velocidade, obtida com a integração da aceleração, medida com sensor de deslocamento, instalado no acelerômetro.

Analisando as Figuras 43 e 44, retiraram-se dados para a verificação de algumas grandezas. Na Figura 40 pode-se ler a intensidade da Força mecânica (Força de Tensão de Compressão),  $F = 16\,000\text{N}$ , no instante que decorrer 0,5 ms de propagação da onda de Tensão mecânica e na Figura 41 pode ser lido o módulo da velocidade de propagação de partículas na haste do DPL -  $V = 2,15\text{m/s}$ , quando for decorrido um intervalo de tempo de 3,02ms.

Verificação da medida do comprimento do DPL instrumentado. Referenciada da cabeça de bater até a ponta do cone do instrumento.

$$\text{Medida Real} - L = 1,37\text{m}$$

Cálculo da Medida Eletrônica

$$t = \frac{2L}{c}$$

$$L = \frac{tc}{2} \quad L = \frac{5120 \times 5^{-4}}{2} \quad L = 1,28\text{m}$$

### 3.4.3.1 Área da seção transversal

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (3.36)$$

$$A_e = \frac{\pi (d_e)^2}{4} = \frac{\pi (0,02661)^2}{4} = 5,56 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$$

de – diâmetro externo da haste  $d_e = 0,03661 \text{ m}$

$$A_i = \frac{\pi (d_i)^2}{4} = \frac{\pi (0,018)^2}{4} = 2,554 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$$

di – diâmetro interno da haste  $d_i = 0,018 \text{ m}$

$$A = A_e - A_i = 3,02 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$$

Impedância

$$Z = \frac{E \cdot A}{c} \quad Z = \frac{21 \cdot 10^{10} \cdot 3,02 \cdot 10^{-4}}{5120} \quad Z = 12386,71 \text{kg/s}$$

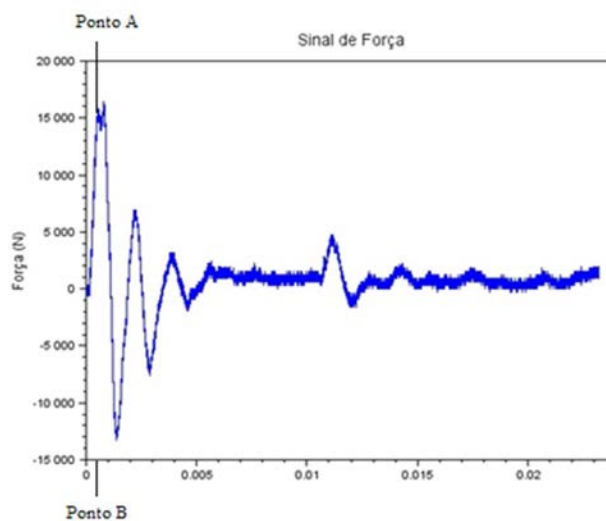
Força

$$F = \frac{VE \cdot A}{c} \quad F = \frac{2,15 \times 21 \cdot 10^{10} \times 3,02 \cdot 10^{-4}}{5120} \quad F = 26 \, 631 \text{N}$$

Força – em função da Velocidade e da Impedância

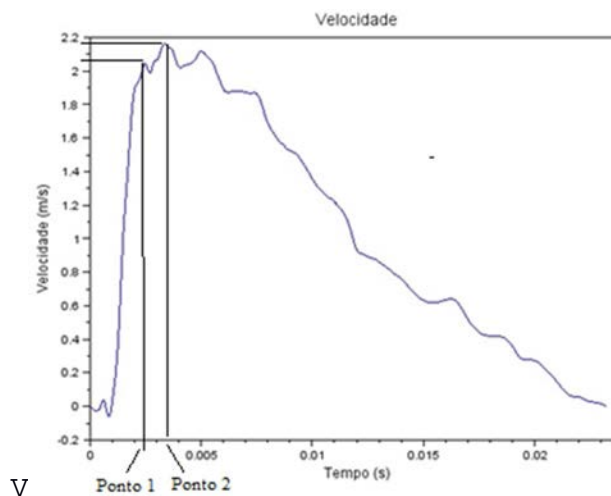
$$F = VZ \quad F = 2,15 \times 12386 \quad F = 26629,9 \text{N}$$

**Figura 43** – Dados obtidos do sinal de Força



Fonte: o próprio autor (2014).

**Figura 44** – Dados obtidos do sinal de Velocidade



Fonte: o próprio autor (2014).

A tabela 5 apresenta alguns resultados de medida eletrônica, comparada com medida real. As medidas reais foram realizadas no laboratório e as medidas eletrônicas foram obtidas com operações numéricas de dado de sinais de força e aceleração, utilizando o programa Scilab

**Tabela 5** – Comparação entre medida real e eletrônica de penetração do cone do DPL, produzidos dados ruins, por falta de bons ajustes nos componentes do equipamento

ARQUIVO	$\Delta P$ - REAL	$\Delta P$ - ELETRÔNICA	$\Delta P$ - %
03	31	25	19,35
04	18	9,5	47,22
05	18	9,5	47,22
06	14	7,5	46,42
08	14	6,5	46,42

Fonte: o próprio autor (2014).

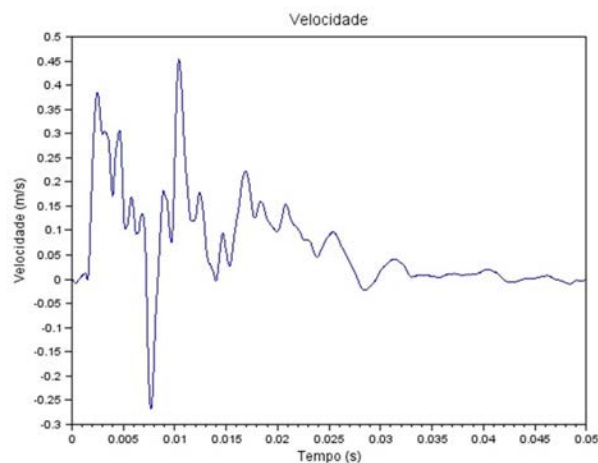
Os resultados da tabela 5 chama muito atenção pela discrepância entre os resultados de medidas reais e eletrônicas. Esses dados foram processados para informar com medidas práticas, que o equipamento DPL, quando instrumentado, exige muita atenção nos procedimentos de ensaios.

Dados experimentais obtidos nos ensaios mostram que os dados dos sinais podem resultar alterados, ruins ou muito ruins. Os principais problemas identificados que prejudicam a qualidade dos sinais foram:

Caso 1 – Deficiência no ajuste do equipamento DPL: Não pode haver folgas nas peças que compõem o equipamento. Usa-se chave apropriada e morsa para apertar os componentes. O conjunto deve se comportar como uma peça contínua e uniforme, caso contrário o equipamento pode gerar sinais com dados que não são confiáveis como os que são mostrados na tabela 5. Há caso nessa tabela em que a variação da medida eletrônica para a medida real, alcança 47%. Houve, portanto, uma total depreciação do equipamento por causa de falha na preparação do equipamento para os ensaios. Tratando-se do acelerômetro, há danos na qualidade do sinal de aceleração, quando há folga entre o bloco de encapsulamento do acelerômetro e haste do DPL.

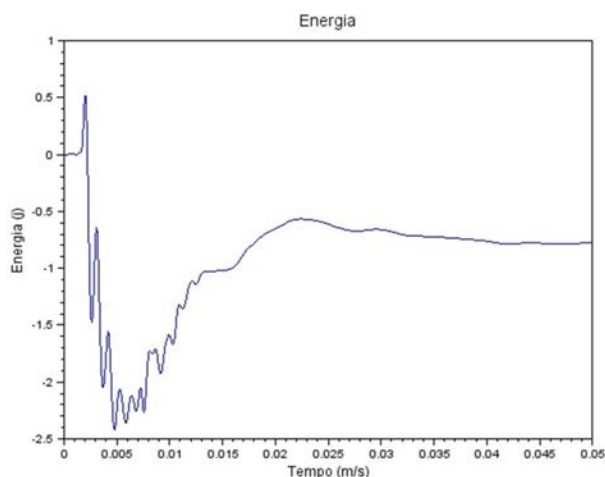
Caso 2 – Trata-se de problema grave na construção da célula de carga, como colagem defeituosa, cura da colagem na temperatura não apropriada ou defeito no acelerômetro. A Figura 45 ilustra bem uma situação de problema no acelerômetro. Como pode ser observado, o gráfico da grandeza velocidade, foi gerado por integração do sinal de aceleração.

**Figura 45** – Sinal de Velocidade resultante da integração de sinal com defeito

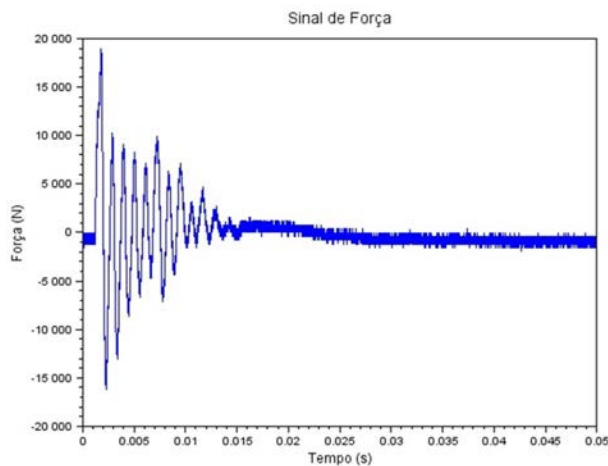


Fonte: o próprio auto (2014).

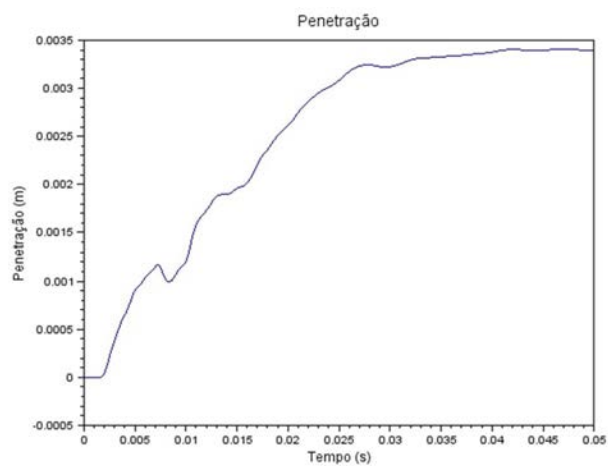
**Figura 46** – Sinal de Energia resultante de sinal gerado com defeito



Fonte: o próprio autor (2014).

**Figura 47** – Sinal de Força gerado na Célula de carga com defeito construtivo

Fonte: o próprio autor (2014).

**Figura 48** – Sinal distorcido de Penetração do cone do DPL no solo

Fonte: o próprio autor (2014).

A Figura 46 está distorcida e dificulta a análise dos seus dados, lembrando que a energia é reproduzida como resultado da integração do produto da força pela velocidade. Observando a qualidade do sinal de força, na Figura 47 e penetração na Figura 48, está justificado porque esses gráficos não contribuem para transmitir informações e mostrar porque os sensores devem assegurar uma boa qualidade de sinal.

O conhecimento de perda de energia em instrumento como o DPL, é determinante para a formulação racional e a estimativa da capacidade de se avaliar a resistência de um solo à penetração dinâmica com esse instrumento.

Belincanta et al (1994), desenvolveram um artigo com temas sobre fundamentos e métodos de medidas de energia dinâmica no SPT, afirmaram: “apesar da existência de normas e especificações para ensaio de SPT como NBR6484, ASTM D-1586 e IRTP – International Reference Test Procedure da ISSMFE), a padronização desse equipamento é altamente dependente da avaliação da energia que é transferida às hastes em cada golpe do martelo”. Tanto no Brasil como no exterior, nas medições de energia dinâmica transferidas, após impacto do martelo às hastes, se avalia-se a energia efetiva que vai chegar no amostrador quando cravado no solo.

Padronização, normas, e principalmente a medição a energia transmitida, energia efetiva que crava o cone no solo e conhecimento de perdas de energia no DPL têm despertado interesse de vários pesquisadores. Na opinião de Nilson & Cunha (2004), a utilização do DPL deve alterar o quadro geotécnico do mercado. Como pode ser averiguado nos trabalhos (ÁVILA; CONCIANI, 2005; FIGUEIREDO; CUNHA, 2011; CONCIANI, 2011).

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSÕES

A instrumentação do equipamento DPL, com um sistema eletrônico, para avaliar a resistência do solo à penetração, alcançou o objetivo do trabalho.

A precisão da medida de resistência do solo à penetração, avaliada em função de menor erro admissível, está condicionada à qualidade do sinal de força e aceleração.

A qualidade do sinal gerado na célula de carga fica condicionada a fatores como: qualidade técnica dos sensores de deformação, construção da célula de carga, qualidade do adesivo, preparação e tempo de cura da peça após colagem.

A qualidade do sinal produzido depende ainda da boa fixação dos componentes do equipamento. A célula de carga deve ficar bem atarraxada na haste e no cone do equipamento. Qualquer folga, mesmo que seja mínimo, interfere na qualidade de medida da força, porque gera sinal de menor qualidade.

Para uma boa qualidade do sinal de aceleração, além da qualidade técnica, o acelerômetro deve ser rigidamente fixado na haste do equipamento por cinta metálica. Qualquer flexibilidade poderá resultar em movimento relativo entre o acelerômetro e haste, interferindo diretamente na qualidade do sinal de aceleração e outras grandezas que variam uma em função da outra, como: velocidade, energia, penetração.

O programa do software do Scilab, foi determinante para manipulação de dados numéricos, matrizes, alteração e eliminação de dados indesejáveis de sinais e recursos na produção de gráficos. e operações com matrizes e vetores.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Construir célula de carga do topo e do cone do DPL, usando luva de conexão com o mesmo diâmetro, para facilitar a avaliação da perda de energia entre o topo e o cone do instrumento.

Construir célula de carga utilizando sensores de outros fabricantes, com garantia de qualidade para facilitar comparação de desempenho entre essas células

Realizar experimentos mais detalhados para avaliar parâmetros como: sensibilidade, histerese, precisão.

Pesquisar e estudar processo de avaliar linearidade dinâmica.

Instrumentar o equipamento DPL com novos componentes eletrônicos para transmissão de dados sem fio. Uma proposta seria utilizar um microprocessador como o C8051F350 que pode gerenciar dados para transmissão sem fio associado a um módulo ZibBee

Participar de um grupo de estudos para aprofundar a aprendizagem e divulgar o Scilab como um poderoso software, que é livre e dispõe de recursos que não deixa nada a desejar aos vários outros pagos.

## REFERÊNCIAS

- ABELEV, A.; TUBBS, K.; VALENT, P. Numerical investigation of dynamic free-fall penetrometers in soft cohesive marine sediments using a finite difference approach. In: OCEANS 2009, MTS/IEEE BILOXI – MARINE TECHNOLOGY FOR OUR FUTURE: GLOBAL AND LOCAL CHALLENGES, 2009, Biloxi. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2009. 10 p.
- ABOUT - MATAR, H.; COBLE, G. G. SPT dynamic analysis and measurements. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering – ASCE**, Reston, v. 123, n. 10, p. 921-928, 1997.
- ASSOCIAÇÃO ESPANHOA DE NORMALIZAÇÃO ASSOCIAD- AENOR-CEN – INTERNETIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO; EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – CEN. **EN ISO 22476-2**: geotechnical investigation and testing, field testing. part 2: dynamic probing. Geneva: [s.n.], 2005. 30 p. Quando não tem local de edição usa-se [s.n.]
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **D6951 – 03**: standard test method for use of the dynamic cone penetrometer in shallow pavement applications. Washington: [s.n.], 2003. 7 p.
- ÁVILA, S. P.; CONCIANI, W. Primeiras experiências com cone dinâmico em Mato Grosso. In: SEMINÁRIO MATO-GROSSENSE DE HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL, 1., 2005, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: [s.n.], 2005. 1CD-ROM.
- ÁVILA, S. P.; CONCIANI, W. Previsão de capacidade de carga de solos através de correlação de dados obtidos com cone dinâmico (DPL). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 13., 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABMS, 2006 a. 1CD-ROM.
- ÁVILA, S. P.; CONCIANI, W. Breve comparativo entre dois equipamentos utilizados para o ensaio de campo de cone dinâmico (DPL). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS, 2., 2006, Nova Friburgo. **Anais...** Nova Friburgo: ABMS, 2006b. 1CD-ROM.
- BELINCANTA, A. **Avaliação de fatores intervenientes no índice de resistência à penetração do SPT**. 1998. 2 v. Tese (Doutorado)- Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade de São Paulo- USP, São Carlos, 1998.
- BELINCANTA, A. **Energia dinâmica no SPT**: resultados de uma investigação teórica - experimental. 1998. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo- USP, São Paulo, 1985.
- BELINCANTA, A.; ALVIN, F. M.; NAVAJA, S.; RAMIRES SOBRINHO, R. Métodos para medida de energia dinâmica no SPT. **Solos e Rochas**, São Paulo. v. 17, n. 2, p. 93-110, ago 1994,
- BELINCANTA, A.; CINTRA, J. C. A. Fatores intervenientes em variantes do método abnt para a execução do SPT. **Solos e Rochas**, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 119-133, ago 1998.

BORGES, F. F. **Fusão de sensores de baixo custo aplicado à seleção e classificação automatizada de mangas para exportação**. 2011. 213 f. Tese (Doutorado) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

CAVALCANTE, E. H. **Investigação teórica-experimental sobre o SPT**. 2002. 410 f. Tese (Doutorado)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2002.

CAVALCANTE, E. H.; DANZIGER, B. R.; DANZIGER, F. A. B. On the energy reaching the sampler during SPT. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF STRESS WAVE, 8., 2008, Lisboa. **Proceedings...** Lisboa: [s.n.], 2008.

DA SILVA, D. F.; MIGUEL, M. G.; BELINCANTA, A. Estudo preliminar de estimativa de capacidade de carga de estacas através de ensaios DPL e DPSH em Londrina-PR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 13., 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABMS, 2006. 1 CD-ROM.

DIEMER, F.; GITIRANA JR., G. F. N; VARGAS, C. L. A. Avaliação sazonal e especial da resistência do talude de uma voçoroca utilizando um penetrômetro dinâmico, em Goiânia-Go. In: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO CENTRO-OESTE, 3.; SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS- GEOCENTRO, 6., 2013, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: ABMS, 2013. v. 1, p. 70 – 77.

DEUTSHES INSTITUT FUR NORMUNG – DIN. **DIN 4094-2**: dynamic and static penetrometer: application and evaluation. Berlin: [s.n.], 1980.

FIGUEIREDO, L. C.; CUNHA, R. P.; CONCIANI, W. Algumas experiências com o DPL em Mato Grosso. In: SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE, 5.; SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO DO CENTRO-OESTE, 2., 2011, Brasília. **Anais...** Brasília: Ipanema, 2011. p. 37-42.

FIGUEIREDO, L. C.; CUNHA, R. P.; CONCIANI, W. An overview on existing dynamic cone penetration test research to the Central Area of Brazil. In: COUTINHO, R. Q.; MAYNE, P. W. (Ed.). **Geotechnical and geophysical site characterization 4**. Boca Raton: CRC, 2012. v. 1. p. 1669-1675.

FIGUEIREDO, L. C.; CUNHA, R. P.; CONCIANI, W. Medida de energia do DPL utilizando acelerômetro, em Cuiabá-MT. In: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO CENTRO-OESTE- GEOCENTRO, 3.; SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS, 6., 2013, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: ABMS, 2013. v. 1, p.70 – 77.

FIGUEIREDO, L. C.; CUNHA, R. P.; CONCIANI, W. Algumas experiências com o DPL em Mato Grosso. V In: SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE, 5.; SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO DO CENTRO-OESTE, 2., 2011 Brasília. **Anais...** Brasília: Ipanema, 2011. p. 37-42.

FREITAS JÚNIOR, J. L. **Desenvolvimento de um monitor de vibrações utilizando sensores de tecnologia micro eletromecânica: MEMS**. 2005. 100 f. Dissertação (Mestrado)-

Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.

HASMAT, A. **Correlation of static cone penetration test results an dynamic probing test results**: research study fot the data of south limurg. – the Netherlands. 2000. 76 f. Dissertação (Mestrado) – International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences – ITC, Delft, 2000.

IBAÑEZ, S. J.; SAGASETA, C.; LOPEZ, V. Measuring energy in dynamic probing. In: COUTINHO, R. Q.; MAYNE, P. W. (Ed.). **Geotechnical and geophysical site characterization 4**. Boca Raton: CRC, 2012. v. 1. p. 399-404.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING - ISSMFE. **Report of the ISSMFE technical committee on penetration testing of soils**: TC 16 with reference test procedures, CPT, SPT, DP, WST. Linköping: Swendish Geotechnical Institute, 1989. 49 p.

KOVACS, W. D.; SALOMONE, L. A. SPT hammer energy measurement. **Journal of the Geotechnical Engineering**, Reston, v. 108 GT4, p. 599-620, 1982.

LEANG, K. K.; SHAN, Y.; SONG, S.; KIM, K. J. Integrated sensing for IPMC actuators using strain gages for under water applications. **Transactions on Mechatronics**, Piscataway, v. 17, n. 2, p. 345-355, abr. 2012.

LIU, C.; GONG, D. Design of a new - type resistance **strain gage based** on C8051F350 and **zib bee**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER APLICATION AND SYSTEM MODELING – ICCASM, 2010, Taiyuan. **Proceedings...** Taiyuan: [s.n.], 2010. v. 3, p. 22 – 24.

LUKIANCHUK, J. A.; ESQUIVEL, E. R.; BERNARDES, G. P. Interpretation of force and acceleration signals during hammer impact in SPT tests. In: PAN-AMERICAN ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHICAL ENGEIERING, 14., 2011, Toronto. **Proceedings...** Toronto: SSMGE, 2011. 1 CD-ROM.

LUKIANCHUK, J. A. **Interpretação de resultados do ensaio de SPT com base em instrumentação dinâmica**. 2012. 364 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MARTINS, J. B.; MIRANDA, T. F. F. S. Ensaio de penetração nos solos graníticos da região Norte de Portugal: algumas correlações. **Revista UM**, Portugal, v. 17, p. 8 -12, maio 2003.

MATOS, A. P. **Desenvolvimento de um módulo TIOM (IEEE. P 1451.6) com nó de rede NCAP**. 2012. Dissertação (Metrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

MEUNIER, J.; SULTAN. N.; JEGOU, P.; HARMEGNIES, F. Penfeld seabed penetrometer. In: OCEANS 2005 EUROPE INTERNACIONAL CONFERENCE, 2005, Brest. **Proceedings..** Piscataway: IEEE, 2005. v. 2, p. 1309-1314.

MIGUEL, M. G.; GOMES, C. L. M.; SILVA, D. F.; PEROLLI, K. D. Caracterização geotécnica do solo laterítico de Londrina/PR por meio de ensaios dinâmico e estático, 11/2005. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 11., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABGE, 2005. v. 1, p. 1830 – 1833.

NILSON, T. U. Experiências iniciais com o DPL Nilson. In: SEMINÁRIO DE GEOTECNIA DO CENTRO OESTE, 1., 2003, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: ABMS, 2003. 4 p. 1CD-ROM.

NILSON, T. U. Comparações entre DPL Nilson e SPT. IV In: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL, 4., Curitiba, 2004. **Anais...** Curitiba: Palotti, 2004. p. 61-68.

NILSSON, T. U.; CUNHA, R. Advantages and equations for pile design in Brazil via DPL tests. In: GEOTECHNICAL AND GEOPHYSICAL SITES CHARACTERIZATION, proceedings of the Second International Conference on Site Characterization – ISC, Porto, 2004, **Anais...** Porto, 2004. v. 2, p. 1519-1523

NILSON, T. Parameter approach from DPL test. In: HUANG, A-B.; MAIYNE, P. W. (Ed.). Geotechnical and geophysical site characterization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SITE CHARACTERIZATION - ICS, 3., 2008, Taipei. **Anais...** Boca Reton: CRC, 2008. 1 CD-ROM.

NILSSON, T. U. **O penetrômetro portátil DPL Nilsson 2001**. Hortolândia: Thomas Nilson Engenharia, 2011. Disponível em: <[www.nilsson.com.br](http://www.nilsson.com.br)>. Acesso em: 30 nov. 2011. 10 p.

NOGUEIRA, J. B.; ROHN, S. A. Determinação de Mini-CBR através do ensaio de Penetrômetro Dinâmico Leve – DPL. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 23., 1990, Florianópolis. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPV, 1990. p. 61 – 73.

ODEBRECHT, E. **Medidas de energia no ensaio do SPT**. 2003. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ODEBRECHT, E. et al. Energy efficiency for standard penetration test. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Reston, v. 10, n. 131, p. 1.252-1.263, 2005.

PALACIOS, A. **The theory and measurement of energy transfer during standard penetration test sampling**. 1977. 390 f. Thesis (Doctoral in Philosophy) - University of Florida, Gainesville, 1977.

QUINTERO, J. A.; MANCOSU, R. D. Comparison and characterization of a typical strain gage against another using the printed method. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THERMA, MECHANICAL AND MULTIPHYSICS SIMULATIONS AND EXPERIMENTS IN MICRO-ELETRONIC SAND MICRO-SYSTEMS, EUROSIM E, 11., 2010, Bordeaux. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2010. 6 p.

RIBEIRO JUNIOR, I.; SARTO, M. B.; CONCIANI, W. Estudo comparativo entre as previsões de capacidade de carga para estacas curtas feitas a partir de dados de SPT e DPL.

In: SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS, 3., 2007, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: CEFETMT, 2007.

RÖHM, S. A.; NOGUEIRA, J. B. Determinação de Mini-CBR com o Penetrômetro Dinâmico Leve – PDL. **Solos e Rochas**, São Paulo, v. 16, n.1 p. 199-206, 1993.

SANCHEZ, P. F.; BOSZCZOWKI, R. B.; LACERDA, L. A.; LOYOLA, R. D. Estudo da viabilidade de uso do Penetrômetro Dinâmico Leve (DPL) para projetos de fundações de linhas de transmissão em solos do estado do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG, 2010, Gramado. **Anais...** Curitiba: ABMS, 2010. 8 p.

SCHMERTMANN, J. H.; PALACIOS, A. Energy dynamic of SPT. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Reston, v. 105, n. GT8, p. 909-926, 1979.

SILVA, E. R.; OLIVEIRA, W. C.; ARRUDA, L. O.; BONADIMAN, R.; QUINTERO, J. A.; MANCOSU, R. D.; SILVA NETO, J. M. Finite element simulation of inkjet printed strain gage on polyimide substrates applied to flexible boards. In: ELETRONICS PACKAGING TECHNOLOGY CONFERENCE- EPTC, 11., 2009, Singapore. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2009. p. 607-611.

SILVA, D. F.; MIGUEL, M.; BELINCANTA, A. Estudo preliminar de estimativa de capacidade de carga de estacas através de ensaios DPL e DPSH em Londrina/Pr. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA- COBRAMSEG, 13., 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABMS, 2006. p. 1370-1374

SILVA, J. P. **Estudos preliminares para a implantação de trincheiras de infiltração**. Brasília: GDM, 2007.

SOUSA, J. F.; FONSECA, A. V. Previsão de assentamentos de fundações diretas, com base nas correlações entre ensaios de carga em placa e ensaios de penetração (estática e dinâmica). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA- COBRAMSEG, 13., 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABMS, 2006. v. 2, p. 1019-1024.

SOUZA, D.; SANTOS, A. C.; CONCIANI, W. Estudo comparativo entre resultados de ensaios DPL com hastes construídas com tubo mecânico com diferentes espessuras de paredes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17., 2008, Búzios. **Anais...** Búzios: Cobramseg, 2008. 1CD-ROM.

STARK, N.; KOPF, A.; HANFF, H.; STEGMANN, S. Geotechnical investigations of sandy seafloors using dynamic penetrometers. In: OCEANS MTS/IEEE BILOXI – MARINE TECHNOLOGY FOR OUR FUTURE: GLOBAL AND LOCAL CHALLENGES, 2009, Biloxi. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2009. 10 p.

STOLL, R. D.; TUE – FENG, S.; BITTE, I. Seafloor properties from penetrometer tests. **IEEE Journal & Magazines**, Piscataway, v. 32, n.1, p. 57 – 63, 2007. DOI: 10.1109

STOLL, R. D.; AKAL, T. XBP: tool for rapid assessment of seabed sediment properties, *Sea Technol. Sea Technology*. **IEEE Journal**, Piscataway, v. 40, n. 2, p. 47 – 51, 1999.