



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS II - CAMPINA GRANDE

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A ENERGIA TRANSFERIDA
ÀS HASTES DO SPT E A RESISTÊNCIA DO SOLO

FRANKSLALE FABIAN DINIZ DE ANDRADE MEIRA

CAMPINA GRANDE

MARÇO - 2002

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DOS CURSOS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A ENERGIA TRANSFERIDA ÀS HASTES DO
SPT E A RESISTÊNCIA DO SOLO

FRANKSLALE FABIAN DINIZ DE ANDRADE MEIRA

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil - CCPGEC da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA.**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA

Campina Grande - PB

Março - 2002

DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca – UFPB/Campus II

M514
2002

Meira, Frankslele Fabian Diniz de Andrade

Estudo comparativo entre a energia transferida às hastes do SPT e a resistência do solo/ Frankslele Fabian Diniz de Andrade Meira. – Campina Grande: UFPB, 2002.

118p. : il.

Dissertação (Mestrado). UFPB/DEC
Inclui bibliografia

1. Geotecnia – Instrumentação e Ensaio de Campo
2. SPT
3. Torque
4. Energia do SPT

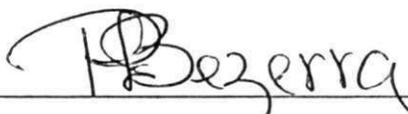
CD: 624.131.38

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A ENERGIA TRANSFERIDA ÀS HASTES DO SPT E A RESISTÊNCIA DO SOLO.

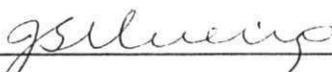
FRANKSLALE FABIAN DINIZ DE ANDRADE MEIRA

Dissertação Defendida e Aprovada em: 15/03/2002.

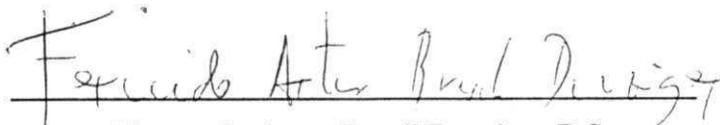
BANCA EXAMINADORA:



**Raimundo Leidimar Bezerra, D.Sc.
(Orientador)**



**João Batista Queiroz de Carvalho, Ph.D.
(Examinador interno)**



**Fernando Artur Brasil Danziger, D.Sc.
(Examinador externo)**

Campina Grande - PB

DEDICATÓRIA:

A presente dissertação é dedicada aos meus pais **Francisco Ribeiro Meira e Eulália de Andrade Meira** pela alegria de ser seu filho, os quais sempre acreditaram no meu empenho e que, com sacrifício, deram-me uma boa formação. Aos meus irmãos **Fabiano, Fabíola, Diniz e Kim** que me apoiaram nos momentos difíceis de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primordialmente a Deus, por estar sempre ao meu lado, dando-me força e perseverança para enfrentar os obstáculos da vida em busca dos objetivos com dignidade.

Ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba (CPGEC-UFPB/Campus II), por me prestigiar com a vaga no curso.

Ao meu orientador Professor D.Sc. Raimundo Leidimar Bezerra, pelos ensinamentos técnicos e sugestões que foram indispensáveis durante todo o curso, bem como ao longo deste trabalho.

Ao doutorando Erinaldo Hilário Cavalcante, pela paciência e compreensão nas informações práticas de operação dos equipamentos SPT e SPT-T para obtenção e tratamento dos dados, bem como no desenvolvimento desta dissertação.

Ao Professor D.Sc. Wilson Conciani, pela ajuda fornecida na elaboração deste trabalho, e pelas sugestões que foram indispensáveis.

A todos os professores e funcionários do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPB/Campus II da Área de Geotecnia pelos ensinamentos, orientações e contribuições ao longo do curso.

À ATECEL (Associação Técnica Científico Ernesto Luiz de Oliveira Júnior) pelo apoio financeiro no início desse curso e nas viagens para obtenção dos dados utilizados nesta dissertação.

Aos responsáveis pelas sondagens da ATECEL (Associação Técnico Científico Ernesto Luiz de Oliveira Júnior) no nome do funcionário José Constante e seus companheiros de trabalho.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo apoio financeiro fornecido para realização desta dissertação.

À Área de Geotecnia da COPPE/UFRJ pelo empréstimo do sistema de aquisição de dados, SPT ANALYZER e a Fundação Universitária José Bonifácio (FUJB) pela aquisição da aparelhagem.

Aos laboratoristas da área de Geotecnia José Nivaldo Sobreira e Rui Pereira de Oliveira, passando-me conhecimentos acerca dos ensaios realizados, e à bibliotecária D. Mauriza Bezerra de Araújo pela ajuda durante todo o curso de mestrado.

Ao amigo Alex Jussileno Bezerra, pelo incentivo e amizade durante todo o curso de pós-graduação.

Finalizo, agradecendo sinceramente aos meus amigos de turma do curso de Pós-Graduação que compartilharam comigo momentos realmente inesquecíveis, e a todos àqueles que direta ou indiretamente foram responsáveis pela realização desta dissertação.

ÍNDICE

ITEM	PÁGINA
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xv
LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS	xvii
RESUMO	xix
ABSTRACT	xx
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	
1.1	1
1.2	5
1.2	5
1.2	6
1.2	6
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1	8
2.2	14
2.2.1	14
2.2.2	16
2.2.3	24
2.3	25
2.3.1	25
2.3.2	27
2.3.2.1	30
2.3.3	36
2.3.3.1	37
2.3.4	40

2.3.5	Equação Teórica da energia e da eficiência apresentada por Fairhurst (1961).....	44
2.3.6	Equação Teórica da energia e da eficiência apresentada por Palacios (1977) e Shmertmann & Palacios (1979).....	45
2.3.7	Energia de uma onda longitudinal de tensão nas hastes.....	46
2.3.7.1	Mecanismo de transferência de energia para as hastes no ensaio SPT....	46
2.3.8	Determinação da energia incidente na composição de hastes do SPT....	54

CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E DA CAMPANHA DE ENSAIOS REALIZADAS

3.1	Generalidades.....	60
3.2	Localização dos Furos de Sondagem.....	60
3.3	Descrição da Aparelhagem Utilizada.....	67
3.3.1	SPT- Standard Penetration Test.....	67
3.3.2	Sistema de aquisição de dados do SPT- SPT ANALYZER.....	71
3.3.3	SPT com medida de torque (SPT-T).....	74
3.4	Descrição Geológica da Região	75
3.4.1	Características geotécnicas dos locais.....	76

CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1	Generalidades.....	84
4.2	SPT e SPT-T.....	85
4.3	Variação da Energia com a Profundidade.....	91
4.3.1	Correção dos métodos EF2 e E2F.....	91
4.3.2	Medição de energia transferida às hastes.....	93
4.4	Correlações Estatísticas Obtidas.....	97
4.4.1	Generalidades.....	97
4.4.2	Correlações obtidas entre os parâmetros N_{SPT} e T	98
4.4.3	Correlações entre os parâmetros do SPT, do SPT-T e as energias obtidas pelos métodos EF2, E2F e EFV.....	99
4.4.3.1	Correlações obtidas entre N_{SPT} , e as energias obtidas pelos métodos EF2 e E2F.....	99
4.4.3.2	Correlações obtidas entre N_{SPT} e a energia obtida através do método EFV.....	101

4.4.3.3	Correlações entre T e as energias obtidas pelos métodos EF2 e E2F.....	102
4.4.3.4	Correlações obtidas entre T e a energias obtida pelo método EFV.....	104
4.5	Considerações Finais.....	106

**CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE
DA PESQUISA**

5.1	Conclusões.....	107
5.2	Sugestões para Continuidade da Pesquisa.....	108

CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 110

APÊNDICES: A e B

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1	Configuração tradicional do SPT (avanço de sondagem por desagregação e lavagem, e ensaio de penetração dinâmica, respectivamente) segundo Velloso e Lopes (1997).....	9
Figura 2.2	Conjunto torquímetro-adaptador (Alonso, 1994).....	13
Figura 2.3	Eficiência de energia cinética do sistema de corda e tambor em rotação (cathead) medida no instante de impacto do martelo (Kovacs, 1980).....	18
Figura 2.4	Variação da eficiência de energia cinética em função do sistema operacional do martelo do SPT bem como do número de voltas da corda em torno do tambor (Skempton, 1986).....	18
Figura 2.5	Variação da eficiência de energia cinética em função do sistema operacional do martelo do SPT, dos diâmetros do tambor e da corda, e do número de voltas da corda no tambor (Tokimatsu, 1988).....	19
Figura 2.6	Comportamento da eficiência de energia cinética, E_{rv} , e dinâmica transferida às hastes, E_{π} (Kovacs & Salomone, 1982).....	21
Figura 2.7	Eficiência de energia transferida através da composição de hastes (E_{π}/E_{rv}) em função do tempo de retorno da onda de tensão ao topo (Kovacs & Salomone, 1982).....	23
Figura 2.8	Ilustração do fenômeno da propagação de uma onda longitudinal de compressão uniforme em uma composição de hastes de comprimento infinito, segundo Timoshenko & Goodier, (1970).....	28
Figura 2.9	Ilustração esquemática da propagação de uma onda longitudinal de tensão em um conjunto de hastes (Belincanta, 1985).....	31
Figura 2.10	Ilustração esquemática dos sentidos de propagação de ondas longitudinais de tensão.....	34
Figura 2.11	Ilustração esquemática da propagação de uma onda de deslocamento numa barra em função do tempo (Clough & Penzien, 1975, segundo Danziger, 1991).....	35
Figura 2.12	Condições de contorno para a solução geral da equação diferencial linear da propagação de ondas longitudinais de tensão (Clough & Penzien, 1975, segundo Danziger, 1991).....	37

Figura 2.13 Ilustração do impacto de um martelo sobre um conjunto de hastes (Palacios, 1977).....	41
Figura 2.14 Mecanismo esquemático da propagação de ondas de tensão no SPT (Palacios, 1977 e Schmertmann & Palacios, 1979).....	48
Figura 2.15 Variação da eficiência dinâmica transferida às hastes com o comprimento da composição (Palacios, 1977).....	50
Figura 2.16 Variação da eficiência de energia dinâmica transferida às hastes em função do comprimento da composição e da combinação martelo – haste (Palacios, 1977).....	51
Figura 2.17 Registro típico de força em função do tempo, com ilustração do intervalo de tempo adotado por Belincanta (1985;1998) para cálculo da energia incidente numa composição de comprimento l.....	52
Figura 2.18 Ilustração do layout da instrumentação usada por Belincanta (1985).....	57
Figura 2.19 Curvas de força e velocidade em função do tempo obtidas a partir dos registros do PDA e os valores de energia transmitida para hastes (Belincanta, 1985).....	57
Figura 2.20 Registro de força em função do tempo obtido com equipamento e instrumentação usados nos Estados Unidos (Palacios, 1977).....	58

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Localização da cidade de João Pessoa onde foram executadas as sondagens.....	61
Figura 3.2 Planta de situação do terreno onde foram efetuadas as sondagens no Bairro de Mandacaru.....	61
Figura 3.3 Planta de situação do terreno experimental da ATECEL localizado no Bairro do Bessa	62
Figura 3.4 Croqui de locação dos furos de sondagem efetuada no bairro de Mandacaru.....	63
Figura 3.5 Croqui de locação do furo de sondagem efetuado no bairro do Bessa área experimental da ATECEL.....	64
Figura 3.6 Croqui de locação dos furos executados no bairro do Bessa, elevatória 15.....	65

Figura 3.7	Croqui de locação dos furos executados no bairro do Renascer, elevatória 14.....	66
Figura 3.8	Foto da composição básica da aparelhagem do SPT utilizada nas campanhas de ensaio.....	67
Figura 3.9	Ilustração do tipo de martelo utilizado nas campanhas de ensaio realizadas pela equipe da ATECEL.....	68
Figura 3.10	Foto do amostrador bi-partido usado nas campanhas de ensaio.....	68
Figura 3.11	Foto da sapata cortante usada nas campanhas de ensaio.....	69
Figura 3.12	Foto do tambor utilizado para levantamento e soltura do martelo.....	69
Figura 3.13	Foto da cabeça de bater utilizada nas sondagens.....	70
Figura 3.14	Fotos do sistema de aquisição de dados (SPT ANALYZER) utilizado nas campanhas de ensaio.....	72
Figura 3.15	Fotos dos acelerômetros utilizados na campanha dos ensaios.....	72
Figura 3.16	Fotos da instrumentação do SPT ANALYZER utilizada nas campanhas de ensaio.....	73
Figura 3.17	Fotos do torquímetro utilizado nas campanhas de ensaio.....	74
Figura 3.18	Fotos do pino adaptador do torquímetro para aplicação do torque às hastes.....	75
Figura 3.19	Perfil de Sondagem do Furo 01 do Bairro de Mandacaru	79
Figura 3.20	Perfil de Sondagem do Furo 02 do Bairro de Mandacaru.....	80
Figura 3.21	Perfil de Sondagem do Furo 03 do Bairro do Bessa.....	81
Figura 3.22	Perfil de Sondagem do Furo 04 do Bairro do Bessa.....	82
Figura 3.23	Perfil de Sondagem do Furo 05 do Bairro do Renascer.....	83

CAPÍTULO 4

Figura 4.1	Variação da resistência à penetração (N_{SPT}) com a profundidade a partir de cinco sondagens realizadas em João Pessoa.....	88
Figura 4.2	Variação dos valores do torque máximo (T) com a profundidade a partir de cinco sondagens realizadas em João Pessoa.....	89
Figura 4.3	Variação do índice do torque com a profundidade a partir das sondagens realizada em João Pessoa.....	90
Figura 4.4	Ilustração da seção instrumentada.....	92
Figura 4.5	Fator de correção para a energia obtida em função do registro de força..	92

Figura 4.6	Registro típico de força e de velocidade obtidos nas campanhas de ensaios em João Pessoa.....	94
Figura 4.7	Valores da energia calculada através do método EF2 versus comprimento das hastes, obtidos das campanhas de ensaios executadas em bairros da cidade de João Pessoa-PB.....	95
Figura 4.8	Valores da energia calculada através do método E2F versus comprimento das hastes, obtidos das campanhas de ensaios executadas em bairros da cidade de João Pessoa-PB.....	95
Figura 4.9	Valores da energia calculada através do método EFV versus comprimento das hastes, obtidos das campanhas de ensaios executadas em bairros da cidade de João Pessoa-PB.....	96
Figura 4.10	Correlação entre o torque e o índice de resistência à penetração.....	99
Figura 4.11	Correlação entre os valores de energia obtidos pelo método EF2 e os valores de N_{SPT} a partir das sondagens realizadas em João Pessoa.....	100
Figura 4.12	Correlação entre os valores de energia obtidos pelo método E2F e os valores de N_{SPT} a partir das sondagens realizadas em João Pessoa.....	101
Figura 4.13	Correlação entre os valores de energia obtidos pelo método EFV e os valores de N_{SPT} a partir das sondagens realizadas em João Pessoa.....	102
Figura 4.14	Correlação entre os valores de energia obtidos pelo método EF2 e os valores de T a partir das sondagens realizadas em João Pessoa.....	103
Figura 4.15	Correlação entre os valores de energia obtidos pelo método E2F e os valores de T a partir das sondagens realizadas em João Pessoa.....	104
Figura 4.16	Correlação entre os valores de energia obtidos pelo método EFV e os valores de T a partir das sondagens realizadas em João Pessoa.....	105

APÊNDICE B

Figura B.1	Correlação entre EF2 e N_{SPT} para a sondagem 1, efetuada no bairro de Mandacaru.
Figura B.2	Correlação entre E2F e N_{SPT} para a sondagem 1, efetuada no bairro de Mandacaru.
Figura B.3	Correlação entre EFV e N_{SPT} para a sondagem 1, efetuada no bairro de Mandacaru.

- Figura B.4 Correlação entre EF2 e N_{SPT} para a sondagem 3, efetuada no bairro do Bessa, no terreno da ATECEL.
- Figura B.5 Correlação entre E2F e N_{SPT} para a sondagem 3, efetuada no bairro do Bessa, no terreno da ATECEL.
- Figura B.6 Correlação entre EFV e N_{SPT} para a sondagem 3, efetuada no bairro do Bessa, no terreno da ATECEL.
- Figura B.7 Correlação entre EF2 e N_{SPT} para a sondagem 4, efetuada no bairro do Bessa, Elevatória 15.
- Figura B.8 Correlação entre E2F e N_{SPT} para a sondagem 4, efetuada no bairro do Bessa, Elevatória 15.
- Figura B.9 Correlação entre EFV e N_{SPT} para a sondagem 4, efetuada no bairro do Bessa, Elevatória 15.
- Figura B.10 Correlação entre EF2 e N_{SPT} para a sondagem 5, efetuada no bairro Renascer, Elevatória 14.
- Figura B.11 Correlação entre E2F e N_{SPT} para a sondagem 5, efetuada no bairro Renascer, Elevatória 14.
- Figura B.12 Correlação entre EFV e N_{SPT} para a sondagem 5, efetuada no bairro Renascer, Elevatória 14.
- Figura B.13 Correlação entre EF2 e o torque para a sondagem 1, efetuada no bairro de Mandacaru.
- Figura B.14 Correlação entre E2F e o torque para a sondagem 1, efetuada no bairro de Mandacaru.
- Figura B.15 Correlação entre EFV e o torque para a sondagem 1, efetuada no bairro de Mandacaru.
- Figura B.16 Correlação entre EF2 e T para a sondagem 3, efetuada no bairro do Bessa, terreno da ATECEL.
- Figura B.17 Correlação entre E2F e T para a sondagem 3, efetuada no bairro do Bessa, terreno da ATECEL.
- Figura B.18 Correlação entre EFV e T para a sondagem 3, efetuada no bairro do Bessa, terreno da ATECEL.
- Figura B.19 Correlação entre EF2 e o torque para a sondagem 4, efetuada no bairro do Bessa, Elevatória 15.
- Figura B.20 Correlação entre E2F e o torque para a sondagem 4, efetuada no bairro do Bessa, Elevatória 15.

- Figura B.21 Correlação entre EFV e o torque para a sondagem 4, efetuada no bairro do Bessa, Elevatória 15.
- Figura B.22 Correlação entre EF2 e o torque para a sondagem 5, efetuada no bairro do Renascer – elevatória 14.
- Figura B.23 Correlação entre E2F e o torque para a sondagem 5, efetuada no bairro do Renascer – elevatória 14.
- Figura B.24 Correlação entre EFV e o torque para a sondagem 5, efetuada no bairro do Renascer – elevatória 14.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1	Fatores Afetando o N do SPT, segundo Décourt (1989).....	15
Tabela 2.2	Valores da eficiência de Energia Transferida às Hastes do SPT em função do tipo de martelo, Segundo Clayton (1990).....	22

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1	Constantes de calibração dos sensores usado na instrumentação.....	73
Tabela 3.2	Características dos segmentos de hastes utilizadas nas calibrações.....	74
Tabela 3.3	Coluna estratigráfica da região de João Pessoa (SUDENE, 1978).....	76

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1	Valores de N, T e T/N obtidos a partir do SPT e do SPT-T no bairro de Mandacaru, em João Pessoa – Sondagem 1.....	85
Tabela 4.2	Valores de N, T e T/N obtidos a partir do SPT e do SPT-T no bairro de Mandacaru, em João Pessoa – Sondagem 2.....	86
Tabela 4.3	Valores de N, T e T/N obtidos a partir do SPT e do SPT-T no bairro do Bessa, no terreno pertencente à ATECEL®, em João Pessoa – Sondagem 3.....	86
Tabela 4.4	Valores de N, T e T/N obtidos a partir do SPT e do SPT-T no bairro do Bessa, Elevatória 15, em João Pessoa – Sondagem 4.....	87
Tabela 4.5	Valores de N, T e T/N obtidos a partir do SPT e do SPT-T no bairro do Renascer, Elevatória 14, em João Pessoa – Sondagem 5.....	87

APÊNDICE A

Tabela A.1	Valores de Energia e de sua Eficiência obtidos do Ensaio SPT com o SPT ANALIZER e do SPT-T no bairro de Mandacaru, área metropolitana de JP.	
Tabela A.2	Valores de Energia e de sua Eficiência obtidos do Ensaio SPT com o SPT ANALIZER e do SPT-T no bairro de Mandacaru, área metropolitana de JP.	
Tabela A.3	Valores de Energia e de sua Eficiência obtidos do Ensaio SPT com o SPT ANALIZER e do SPT-T no bairro do Bessa, área metropolitana de JP.	

Tabela A.4 Valores de Energia e de sua Eficiência obtidos do Ensaio SPT com o SPT ANALIZER e do SPT-T no bairro do Bessa, área metropolitana de JP.

Tabela A.5 Valores de Energia e de sua Eficiência obtidos do Ensaio SPT com o SPT ANALIZER e do SPT-T no bairro Renascer, área metropolitana de JP.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Seção transversal do martelo do SPT.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
Al	Atrito lateral em um determinado trecho da composição de hastes.
A/D	Analógico/Digital.
Cathead	Tambor em rotação para levantamento e soltura de martelo do SPT.
C_i	Fator de correção da energia que é refletida no amostrador (onde é calculada através dos registros de força em função do tempo, levando-se em consideração as posições de instalação das duas células elétricas, seção superior e inferior).
C_s	Fator de correção da energia incidente (onde é calculada através dos registros de força em função do tempo, levando-se em consideração a posição de instalação próximo à extremidade superior da tenção).
CPT	Cone Penetration Test.
Donut	Martelo americano do tipo cilíndrico vazado.
dry sample	Amostra colhida do amostrador SPT.
E	Módulo de Elasticidade.
Eab	Energia absorvida pelo amostrador, referente à primeira reflexão da onda longitudinal de compressão incidente.
Ehi	Energia cinética do martelo no instante do impacto, estimada através da força máxima de compressão referente ao impacto (F_{imp}) registrada na curva de força em função do tempo.
Entru.	Energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente.
E.P	Erro Padrão (estatística).
E[*]	energia nominal.
E_i	Energia dinâmica incidente, referente a primeira onda de compressão incidente.
E_{it}	Energia dinâmica incidente, até o tempo t (a partir do impacto do martelo).
E_{rr}	Eficiência de energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente.

E_{rv}	Eficiência de energia cinética máxima, contida no martelo no instante de impacto.
ESOPT	European International Symposium on Penetration Testing.
F	Força seccional incidente nas hastes.
f_s	Atrito lateral unitário.
H	altura de queda do martelo.
L	comprimento do martelo.
M	massa do martelo.
N_{SPT}	índice de resistência à penetração (N).
NBR	Norma Brasileira.
PMT	Pressuremeter Ménard Testing.
R	Coefficiente de correlação (estatística).
R^2	Coefficiente de determinação (estatística).
SPT	Standard Penetration Test.
SPT-T	Standard Penetration Test with torque measurement.
T	Torque medido.
z	Profundidade.
Z	Impedância.
Z_h	Impedância das hastes.
Z_m	Impedância do martelo.

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A ENERGIA TRANSFERIDA ÀS HASTES DO SPT E A RESISTÊNCIA DO SOLO

RESUMO

Este trabalho apresenta e discute resultados de uma campanha de ensaios onde foram medidos, simultaneamente, o índice de resistência à penetração (N_{SPT}), o torque (T) e a energia transferida às hastes do SPT (Standard Penetration Test). Foram realizadas sondagens em três localidades da cidade de João Pessoa, sendo executados 5 furos de sondagens.

Para aquisição de dados da energia transferida às hastes, utilizou-se um sistema portátil de aquisição de dados, o SPT ANALYZER. O cálculo da energia foi feito através de três diferentes métodos, o EF2, o E2F e o EFV.

Os valores das energias obtidas através dos métodos EF2 e E2F apresentam a tendência de uma relação entre essas energias transferidas às hastes e o comprimento, até aproximadamente os 14m, enquanto que para comprimentos maiores os valores da energia praticamente não variam. Pelo método EFV, observa-se que a tendência encontrada revela que os valores da energia praticamente não dependem do comprimento das hastes.

Os dados obtidos mostram a existência de uma correlação linear significativa entre N_{SPT} e T. Os parâmetros estatísticos obtidos a partir das correlações propostas entre os valores de EF2, E2F e EFV, com o N_{SPT} e com T mostram que não existem relações significativas entre estas variáveis.

As pesquisas com o SPT-T, simultaneamente às medidas de energia transferida às hastes, estão em fase preliminar. Por isso, sente-se a necessidade da realização de estudos adicionais para ampliar o banco de dados formado.

A COMPARATIVE STUDY BETWEEN ENERGY TRANSFERED TO SPT RODS AND SOIL STRENGT

ABSTRACT

This thesis presents and discuss the results from an investigation carried out in the determination of standard penetration test index (N_{SPT}), torque (T) and the energy transferred to the STP rods. Tests were done at three places in João Pessoa city where five boreholes were used.

To obtain data from the energy transferred to SPT rods it was used a mobile system of data acquisition named SPT analyzer. The calculation of the amount of energy was done using three different methods: EF2, E2F and EFV.

The energy values obtained from methods EF2 and E2F revealed the trend to a relationship between energy transferred to SPT rods and theirs length till approximately 14m, beyond this depth the values of energy transferred practically did not changed. For EFV method it was observed that the values of energy practically did not changed despite the rods length considered.

The results obtained showed significant linear correlation between NSPT e T. The statistics parameters obtained from the proposal correlations among EF2, E2F and EFV against NSPT and T revealed a non significative correlations among these parameters.

The investigations using SPT-T simultaneously to measuring of energy transferred to SPT rods, are in starting fase. For this reason, there is a need for studies to be carried out in order to increase the existing amount of data.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Generalidades

Em toda obra de Engenharia de Fundações constitui pré-requisito o conhecimento das condições do subsolo referente ao local onde a obra será implantada.

A pouca importância dada às fases de investigação, bem como ao projeto geotécnico, tem resultado em insucessos e aumento de custos das obras de fundações de diversos empreendimentos. A pressa em construir e a omissão das precauções de reconhecimento do solo podem levar a decisões equivocadas, surpresas desagradáveis, modificações de projetos e, algumas vezes, até mesmo desastres (Vicente, 2000).

No Brasil, a utilização de sondagens de simples reconhecimento com medida de resistência à penetração constitui-se na técnica de investigação mais utilizada. O SPT (“Standard Penetration Test”) tem-se mostrado eficiente nas investigações geotécnicas, tornando-se, assim, um ensaio de campo de uso corrente na obtenção de parâmetros necessários à elaboração de projetos geotécnicos em geral.

Empenhados na melhoria de qualidade dos resultados obtidos com o SPT, pesquisadores têm apresentado formulações para determinação das energias cinética e dinâmica que fazem parte deste ensaio. Dentre eles, podem-se citar Kovacs et al. (1977), Palacios (1977), Schmertmann & Palacios (1979) e Belincanta (1985).

Kovacs et al. (1978) iniciaram de uma maneira sistemática e científica determinar a energia cinética do martelo no instante do impacto, através da velocidade máxima alcançada pelo martelo. Simultaneamente às medidas da energia cinética, surgem as medidas de energia realmente transferida às hastes. Essas medições começaram a ser feitas nos Estados Unidos, por Palacios (1977) e Schmertmann & Palacios (1979). No Brasil, a primeira pesquisa deve-se a Belincanta (1985). Em função da popularidade do SPT e da sua ampla utilização em projetos de fundações, Ranzini (1988) propôs complementá-lo com a medida do torque

necessário para vencer o atrito lateral entre o amostrador padrão e o solo. Assim foi idealizado o SPT-T.

A medida do torque, simultaneamente à realização do ensaio com SPT tradicional, possibilita uma aplicação direta da medida do atrito lateral, cujo parâmetro (f_s) pressupõe-se não ser afetado pelos mesmos fatores que influenciam nos valores do N_{SPT} (Alonso, 1996). Segundo Décourt & Quaresma Filho (1994), as medidas de torque não introduzem modificações nos procedimentos tradicionais do SPT, sendo apenas uma parte adicionada após a medição da resistência à penetração.

Assim, o SPT com a medição do torque fornece duas resistências independentes, permitindo uma medida estática da resistência que não é afetada por fatores que influenciam diretamente na resistência dinâmica determinada no SPT tradicional (Ranzini, 1994).

Preocupados com a qualidade dos dados obtidos com o SPT, os integrantes do Comitê Técnico (TC-16), em 1988 na cidade de Orlando, e do comitê reunido durante o XII ISSMFE (XII International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering) em 1989, na cidade do Rio de Janeiro, recomendaram a aferição da aparelhagem em termos de energia transferida às hastes, além de contemplarem o SPT com um procedimento internacional de referência, IRTP, 1988 (ISSMFE, 1989).

A aferição do SPT é de grande importância, principalmente por causa do uso dos resultados em correlações empíricas. Correlações entre o torque e o índice de resistência à penetração foram feitas inicialmente por Décourt & Quaresma (1991), depois por Alonso (1994), os quais apresentaram correlações lineares entre estes valores para diferentes locais na cidade de São Paulo/SP e também nos Campus da USP/ São Carlos e UNICAMP/Campinas.

Segundo Morgano & Liang (1992) a transferência de energia em uma composição de hastes pode ser estudada através dos teoremas de trabalho-energia, adotando-se algumas hipóteses simplificadoras, tais como material elástico linear, seção transversal uniforme e propagação dimensional da onda. Por definição, um incremento de trabalho é realizado quando uma força variável “F” em função do tempo “t” age provocando um deslocamento $\Delta\delta$, ou seja,

$$W = F(t) \cdot \Delta\delta \quad (1.1)$$

ou

$$W = F(t) \cdot v(t) \Delta t \quad (1.2)$$

onde $v(t)$ é a velocidade das partículas.

Portanto, a energia transferida do início ($t_1 = 0$) até um tempo (t_2) pode ser escrita como sendo:

$$W = E_t = \int_{t_1=0}^{t_2} F(t) \cdot v(t) dt \quad (1.3)$$

Palacios (1977) e Schertmann & Palacios (1979) não conseguindo medir os registros de velocidade por não dispor de tecnologia adequada, por conta dos acelerômetros da época não fornecerem registros confiáveis, calcularam a energia apenas com os registros de força, ou seja, relacionando a força com a velocidade através de um fator de proporcionalidade chamado de impedância (Z):

$$F = V \cdot Z \rightarrow Z = \frac{Ea}{c} \quad \text{logo, tem-se:} \quad V = \frac{F}{Z} = \frac{FEa}{c}$$

Substituindo-se na Equação 1.3, obtém-se:

$$W = E_u = \frac{c}{aE} \int_{t_1=0}^{t_2} F^2 dt \quad (1.4)$$

Para determinar experimentalmente a energia transferida às hastes do SPT, Belincanta (1985) instrumentou a composição de hastes através de uma combinação de células de carga e acelerômetros junto à extremidade superior da composição, obtendo registros de força e de velocidade.

Existem três métodos correntes para se determinar a energia dinâmica transferida às hastes, calculadas pelas Equações 1.5, 1.6 e 1.7, em função da força seccional, ou a tensão, e a velocidade de partículas, e de propagação da onda, onde F e v representam a força e a

velocidade de partículas em função do tempo, registradas na seção instrumentada. Os registros de força são obtidos através da instalação de medidores de deformação, denominados de “strain-gauges”. Para a aquisição dos registros de velocidade são instalados acelerômetros numa determinada seção da haste.

$$EFV = E_t = \int_0^t Fv dt \quad (1.5)$$

$$EF2 = E_{t_1} = \frac{c}{aE} \int_0^t F^2 dt \quad (1.6)$$

Utilizam-se as Equações 1.5 havendo disponibilidade dos registros de força e de velocidade em função do tempo na seção instrumentada (método EFV).

O método EFV, é também chamado de EMX (energia máxima transferida às hastes), por integrar os registros de força e de velocidade até o valor máximo de energia. Essa metodologia conduz a resultados mais corretos, conforme demonstrado por Belincanta (1985), Abou-Matar & Goble (1997) e Cavalcante (2002), devido aos resultados obtidos não serem afetados por possíveis perdas de proporcionalidade entre a força e a velocidade. No entanto, depende da sensibilidade, bem como estabilidade dos acelerômetros instalados.

Com frequência tem sido usada a Equação 1.6 chamado “método F²” ou EF2, para obtenção do cálculo da energia transferida às hastes.

O cálculo da energia pelo método EF2, conforme recomendações da norma ASTM D4633 (1986), considera o registro da força elevada ao quadrado em função do tempo, até a força anular-se pela primeira vez. Todavia, este método só é válido, quando o índice RAT, que representa a relação entre o tempo correspondente ao “cutoff” do registro de força (tempo de força zero pela primeira vez a partir do instante do impacto) e o tempo correspondente a $t = 2l/c$, situa-se entre $0,9x 2l/c$ e $1,2x 2l/c$ (ASTM D4633/86).

Outro método que vem sendo utilizado no caso da onda cessar muito além do tempo $t = 2l/c$, ou seja valores de RAT (índice percentual) acima de $1,2x 2l/c$, é o método E2F, que

é calculado com o mesmo registro de força ao quadrado (como no método EF2), porém só até o tempo $t = 2l/c$ (Likins, 2000, citado por Cavalcante, 2002).

$$E2F = E_{it} = \frac{c}{aE} \int_0^{2l/c} F^2 dt \quad (1.7)$$

Schmertmann & Palacios (1979) evidenciaram que a resistência do solo não influencia a energia (ENTHRU) transferida às hastes. No entanto, outros estudos têm mostrado que pode haver alguma influência de N_{SPT} em E_i (Morgano & Liang, 1992).

No início dos anos noventa, Belincanta (1994) apresentou um trabalho sobre energia dinâmica no SPT, abordando o mecanismo de transferência da energia contida no martelo no instante do impacto, para as hastes do SPT. Neste trabalho, é salientada a importância da medida desta energia transferida às hastes, essencialmente quando se busca a padronização internacional nos ensaios de penetração dinâmica, apresentando metodologias para determinação da energia contida na primeira onda longitudinal de compressão incidente, bem como da eficiência relativa à energia padrão (E^*).

Dentro deste contexto foi que surgiu a necessidade de se fazer esta pesquisa, procurando-se relacionar os parâmetros obtidos através do ensaio SPT e SPT-T com os valores das energias obtidos nos métodos EF2, EF2 e EFV, utilizando-se o SPT ANALYZER em sondagens realizadas no litoral Paraibano.

1.2 – Objetivos

1.2.1 – Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é comparar a energia transferida às hastes do SPT (medida com o SPT Analyzer) com os valores de resistência do solo, à partir dos resultados do ensaio de simples reconhecimento de solos com medida de resistência à penetração (N_{SPT}) e torque (T).

1.2.2 – Objetivos Específicos

Especificamente, objetiva-se com este trabalho: a formação de um banco de dados (SPT e SPT-T), de forma a ampliar e incentivar novas pesquisas na Paraíba e em outras regiões brasileiras, difundindo as potencialidades desses ensaios; a aquisição e análise do índice de resistência à penetração (N_{SPT}), de torque (T), e do índice de torque (T/N) nas sondagens realizadas e a correlação dos resultados com as energias dos métodos EF2, E2F e EFV obtidas com o SPT ANALYZER, despertando para o problema da padronização do SPT, minimizando assim as discrepâncias existentes nas práticas brasileiras.

1.3 – Estrutura do Trabalho

O presente trabalho é composto por seis capítulos e dois apêndices. Os conteúdos dos diferentes assuntos de que tratam os capítulos serão expostos nos parágrafos seguintes.

O Capítulo 1 apresenta uma introdução, que trata dos fundamentos da pesquisa, os objetivos a serem alcançados e a organização dos assuntos.

O Capítulo 2 trata da revisão bibliográfica, ou seja, dos fundamentos teóricos básicos nos quais a pesquisa está fundamentada.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos, descrevendo informações importantes, tais como: localização dos furos de sondagem, as características geológicas, as características geotécnicas, descrição dos equipamentos utilizados e procedimentos para execução dos ensaios.

O Capítulo 4 trata da apresentação e análise dos dados obtidos com as campanhas de ensaios. Com base nos parâmetros obtidos, apresentam-se as comparações com os resultados encontrados por outros pesquisadores e as correlações obtidas com os dados da campanha com o SPT ANALYZER.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e algumas sugestões para novas pesquisas.

O Capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas utilizadas nesta dissertação.

No Apêndice A são apresentados as Tabelas A1, A2, A3, A4 e A5 com os dados do SPT e SPT-T, e das energias dos diversos métodos (EF2, E2F e EFV) obtidos com o SPT ANALYZER. As Figuras B1 a B24 contendo os gráficos das correlações de N_{SPT} e T versus as energias dos métodos (EF2, E2F e EFV) para cada furo de sondagem efetuado estão apresentadas no Apêndice B.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. – Histórico do SPT e SPT-T

O surgimento do ensaio de penetração dinâmica, denominado SPT (“Standard Penetration Test”), deve-se ao engenheiro norte-americano Charles R. Gow que, em 1902, com o objetivo de melhorar os procedimentos de sondagem da época, provocou uma evolução no processo de obtenção de amostras, que antes era por circulação d’água, passando para a retirada de amostras através da cravação de um barrilete amostrador. Por isso, Fletcher (1965) estabelece o ano de 1902 como o marco inicial do fim do processo de obtenção de amostras através de circulação d’água, tendo início o processo de cravação dinâmica, facilitando a obtenção das mesmas.

No início desta fase, o processo de investigação era baseado na cravação de um tubo de diâmetro nominal de 25,4mm, com aproximadamente 450mm de comprimento, como mostrado na Figura 2.1, sob queda de um martelo de 50 kg de massa, o que tornava possível a obtenção de amostras de melhor qualidade, retirando com isto na profundidade desejada amostras do tipo “dry sample” (Hvorslev, 1949). Entretanto, não excluía por completo os efeitos prejudiciais à amostra quando esta era retirada do tubo, visto que o corpo ainda não era bipartido.

Com o desenvolvimento do amostrador bipartido por L. Hart e F. A. Flecher em 1927 tornou-se possível a obtenção de amostra do solo ensaiado e maior facilidade na sua coleta. Isso trouxe um grande avanço na obtenção de amostras de melhor qualidade, visto que a operação de retirada da amostra foi facilitada (era necessário apenas, que fossem removidas as duas extremidades rosqueadas, sapata cortante e a cabeça do amostrador), preservando boa parte do estado natural do solo (Palmer & Stuart, 1957).

A partir da criação da seção de Estruturas e Fundações do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A), em 1935, tiveram início no Brasil as sondagens de

simples reconhecimento de solos. Após a volta de Odair Grillo de seus estudos realizados na Harvard University, em 1936, a seção de solos e fundações do IPT começou a se estruturar e, no final de 1938, adotou para suas sondagens o revestimento de 51mm (Teixeira, 1977, 1993; Vargas, 1989).

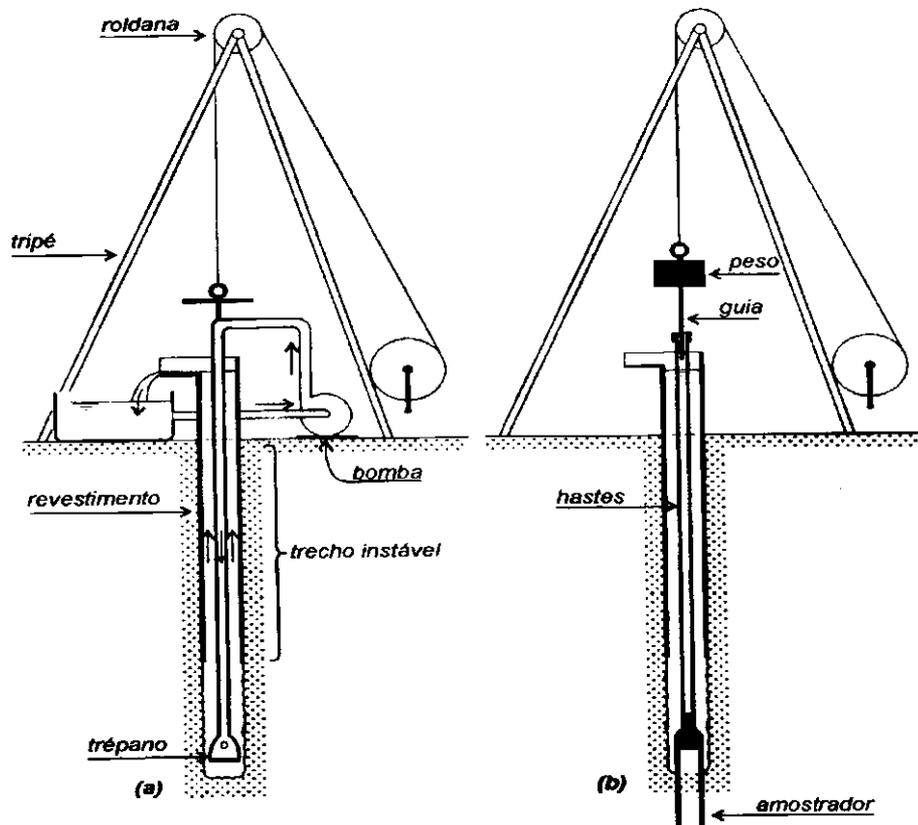


Figura 2.1 – Configuração tradicional do SPT (avanço da sondagem por desagregação e lavagem, e ensaio de penetração dinâmica, respectivamente) segundo Velloso e Lopes (1997).

No Brasil, a realização das medidas de resistência com amostrador padrão começaram a ser feitas pelo IPT em 1943, de forma experimental, e em 1944, de maneira mais sistemática, segundo relatos de Nápoles Neto (1961).

Em 1948 acontece o lançamento do livro “Soil Mechanics in Engineering Practice” escrito por Terzaghi & Peck que traz excelentes contribuições. Nele foram discutidos vários aspectos do SPT, e um dos quais as primeiras correlações entre a resistência à penetração e a compacidade relativa de areias.

O livro publicado por Terzaghi & Peck faz ainda importantes recomendações quanto ao próprio equipamento e quanto aos procedimentos de ensaio. Essas recomendações foram

quase que totalmente absorvidas pelas normas elaboradas para o ensaio, tanto internacionalmente quanto no Brasil. Descreve os procedimentos de execução da sondagem de simples reconhecimento de solos com perfuração por circulação de água, utilizando as primeiras especificações: revestimento com 63,5mm de diâmetro, hastes com 25,4mm de diâmetro e amostrador do tipo Raymond, com 51mm e 35mm de diâmetro externo e interno, respectivamente (Belincanta, 1998).

Kovacs (1981) dá como meados do ano de 1950 a época de aceitação generalizada da definição do índice de resistência à penetração dinâmica, N_{SPT} , tendo relação com os registros feitos por Terzaghi & Peck (1948), bem como os de Hvorslev (1949).

Em 1957, segundo Belincanta (1998), a ânsia internacional em normalizar o SPT e outros ensaios penetrométricos, estáticos ou dinâmicos, acelerou-se. Para isso, organizou-se um comitê durante a realização do Congresso Internacional de Londres, onde se fez presente o professor Milton Vargas. Porém, não se obteve resultados satisfatórios no tocante à normalização, pois a maioria presente considerava tal acontecimento impossível, surgindo resistências à padronização de tais ensaios.

A primeira tentativa de normalização D1586-58T da ASTM (American Society for Testing and Materials), apesar de definir que os primeiros 152 mm de um total de 457 mm seriam como de assentamento do amostrador, não deixou claro o que seria a resistência à penetração. Já em 1963, essa dúvida foi esclarecida com a edição da segunda tentativa D1586-63T, a resistência à penetração N corresponde ao número de golpes necessários para cravar o segundo e terceiro intervalos de 152 mm, porém continuando a chamar de assentamento a cravação dos primeiros 152mm. Posteriormente, em 1967, essa tentativa tornou-se norma definitiva, preservando os 152 mm iniciais de penetração como intervalo de assentamento do amostrador (Belincanta, 1998).

Na década de 70, nos Estados Unidos, surgiram as primeiras pesquisas com base científica para avaliação dos fatores que interferem no ensaio de penetração dinâmica, SPT.

No início dos anos setenta, De Mello (1971) fez uma análise do SPT abordando problemas relacionados à energia transmitida no impacto e à energia utilizada para a penetração do amostrador no solo.

Durante a realização do 4º Congresso Pan-americano de Mecânica dos Solos, realizado em Porto Rico, em 1971, De Mello (1971) valoriza o SPT durante a apresentação do “State of the Art: The Standard Penetration Test”. Em seguida, Schmertmann (1974) junta-se à sua opinião. Décourt (1989) faz considerações sobre o trabalho de De Mello (1971), considerando-o o marco internacional de uma nova era “Standard Penetration Test”.

A Associação Brasileira de Mecânica dos Solos (ABMS) em 1977 envia para a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), para discussão e aprovação da proposta de norma do SPT, que se tornou oficialmente a 1ª norma brasileira, em 1979, com a denominação de “Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos”, MB 1211/79, tendo posteriormente recebido a denominação NBR 6484 (1980) segundo Belincanta (1998).

No final dos anos setenta, nota-se uma maior preocupação com o problema dos fatores que interferem no ensaio, trazendo para o SPT um enriquecimento através de diversas sugestões, objetivando a determinação das energias cinética imediatamente antes do impacto e dinâmica transferida às hastes. São marcos referenciais Kovacs et al. (1977), Palacios (1977), Schmertmann & Palacios (1979).

Palacios (1977) e Schmertmann & Palacios (1979) desenvolvem toda uma metodologia com aplicação da equação da onda para estudar a dinâmica do SPT.

Schmertmann (1979) considera importante o entendimento da estática do SPT, estabelecendo relações entre a penetração do amostrador do SPT e a penetração do CPT (Cone Penetration Test) como ponto de partida para uma melhoria do conhecimento da dinâmica envolvida no ensaio. Nota-se, assim o início da preocupação com a energia transferida às hastes no impacto do martelo, sendo essa energia calculada com base na teoria newtoniana aplicada ao impacto entre corpos rígidos, possuindo um certo coeficiente de restituição (De Mello, 1971).

Sendo o SPT um ensaio de penetração muito popular em todo mundo, em 1988 surge a idéia de complementá-lo com medida de torque (T), que foi proposto inicialmente por Ranzini (1988), não causando nenhuma alteração no procedimento do SPT. Entretanto, no Brasil só em 1991 na cidade de São Paulo é que foram executados os primeiros ensaios SPT-T (Décourt & Quaresma, 1991). O torque aplicado no topo das hastes, como mostrado na Figura 2.2, faz com que o amostrador que está em contato com o solo sofra uma rotação, provocando a ruptura na interface solo-amostrador.

Ranzini (1994) apresenta a segunda parte do primeiro trabalho de 1988 relacionados à medida de torque, recomendando-o para a obtenção do “atrito lateral” (f_s) no amostrador, além do seu emprego como “aferidor” do SPT.

A expressão 2.1 foi desenvolvida inicialmente por Ranzini (1988), e foi posteriormente corrigida (Ranzini, 1994).

$$f_s = \frac{T}{(40,5366 \cdot h - 17,4060)} \quad (2.1)$$

sendo:

- ✓ f_s = tensão de atrito lateral (kgf/cm²);
- ✓ T = torque máximo (kgf.cm);
- ✓ h = penetração do amostrador (cm).

A Equação 2.2 é a equação geral apresentada por Ranzini (1994), que foi modificada considerando-se o atrito lateral constante, na superfície cilíndrica e na parte inferior do amostrador.

$$f_s = \frac{T}{2\pi \left\{ R^2 h - \frac{1}{3} \left[h_0 (R - r)(2R + r) - r^3 \right] \right\}} \quad (2.2)$$

sendo:

- ✓ R = raio externo do amostrador, que é igual a 2,54 cm (NBR 6484);
- ✓ r = raio mínimo da boca do amostrador, que é igual a 1,095 cm (NBR 6484);
- ✓ h_0 = altura do chanfro tronco-cônico, que é igual a 1,90 cm (NBR 6484).

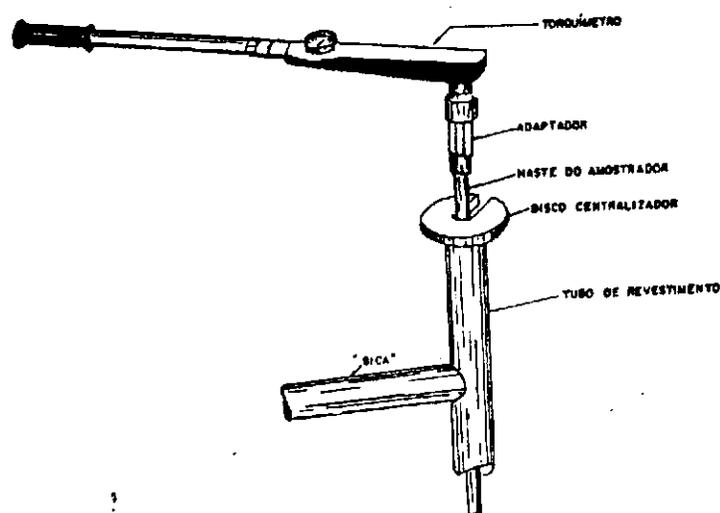


Figura 2.2 - Conjunto torquímetro-adaptador (Alonso, 1994).

Soares (1999) utiliza o SPT-T e o PMT (pressiômetro de Ménard) para avaliação da sua operacionalidade e dos parâmetros com eles obtidos, mostrando que a sua operação é bastante simples, e verificou, estatisticamente que os parâmetros obtidos com o torque (T) e com o índice de torque (T/N) não forneceram boas correlações com o (PMT), devido à grande dispersão dos pontos.

Os pesquisadores têm estudado a utilização do SPT-T para obtenção de parâmetros utilizados em projetos geotécnicos, dentre os quais podem-se citar: Ranzini (1988), Alonso (1994, 1996), Décourt (1989, 1991, 1992, 1996), Décourt & Quaresma Filho (1991, 1994), Carvalho et al. (1999), Soares (1999), Peixoto & Carvalho (2000). Entretanto, ainda sente-se a necessidade de mais informações através de pesquisas acerca de tal ensaio, para tornar mais confiáveis as relações entre os parâmetros obtidos.

Belincanta et al. (1994) mostram a importância da energia transferida às hastes no instante do impacto, buscando a padronização internacional nos ensaios de penetração.

No ano de 2000 foi desenvolvido um trabalho na Feagri-Unicamp de grande importância para o aprimoramento do SPT-T, bem como para sua padronização. A utilização de um torquímetro digital, dotado de sistema elétrico automático de aquisição de dados, possibilitou a obtenção da curva torque versus ângulo de rotação, enriquecendo o acervo de trabalhos sobre o assunto (Peixoto & Carvalho, 2000).

Em fevereiro de 2001 é republicada a NBR 6484 sendo incorporada a ela a NBR 7250 - Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos.

Uma pesquisa teórico-experimental sobre o SPT está sendo desenvolvida pelo doutorando Cavalcante (2002) na COPPE/UFRJ, em parceria com a área de Geotecnia da UFPB/Campina Grande, com a utilização de um sistema portátil de aquisição de dados produzido pela empresa americana PILE DYNAMICS Inc (PDI), com a finalidade de monitorar a energia transferida às hastes do SPT. A presente pesquisa originou-se dessa parceria.

2.2 - Fatores Intervenientes na Energia Transferida às Hastes no SPT e SPT-T

2.2.1 - Generalidades

Existem inúmeros fatores que influenciam o SPT. A seguir será apresentado sucintamente alguns fatores intervenientes do SPT à luz da bibliografia citada. Hvorslev (1949) agrupa estes fatores em categorias para facilitar o seu entendimento. Este autor divide-os em três categorias:

- ✓ equipamentos;
- ✓ técnicas de operação;
- ✓ condição do solo.

Os trabalhos de Hvorslev (1949), Teixeira (1974), Kovacs et al. (1977, 1978), Kovacs (1979 e 1981) e Décourt (1989), entre outros, detalham os fatores que afetam o SPT.

Belincanta (1985;1998) traz boas contribuições, aumentando o acervo de informações em torno do assunto. O autor aborda os fatores intervenientes no índice de resistência à penetração do SPT, instrumentando as hastes com a utilização de células elétricas de carga e acelerômetros para obtenção das medidas de força e de velocidade. Porém a tentativa de obtenção foi mal sucedida.

A Tabela 2.1 ilustra, sucintamente, os fatores apresentados por Décourt (1989) que influenciam o N do SPT.

Tabela 2.1 - Fatores Afetando o N do SPT, segundo Décourt (1989).

FATOR	EFEITO no N_{SPT}
Levantamento/soltura do martelo	aumenta/diminui
Variações de altura exata (76 cm)	aumenta/diminui
Falta de lubrificação da roldana	aumenta
Atitude dos operadores	aumenta/diminui
Peso incorreto do martelo	aumenta/diminui
Excentricidade da cabeça de bater	aumenta
Não utilização de haste-guia	aumenta
Leitura imprecisa do número de golpes	aumenta/diminui
Limpeza mal feita do furo	diminui
Falta de cuidado com o nível da lama/água no furo	diminui
Diâmetro do furo acima do recomendado (65-150 mm)	diminui
Uso de bomba com capacidade muito alta	aumenta
Estabilização apenas com lama ao invés de revestimento (em areias)	aumenta
Comprimento da haste	aumenta/diminui
Peso da haste	aumenta/diminui
Amostrador deformado ou dentro do revestimento	aumenta
Peso elevado da cabeça-de-bater	aumenta
Pedregulhos “engasgando” o amostrador	aumenta
Frequência dos golpes: 30 - 40 golpes/min se N ₁₆₀ < 20, 10 - 20 “ “ se N ₁₆₀ > 20, 10 - 20 “ “	não influi aumenta diminui
Coxim de madeira: sem usar novo velho	não altera aumenta diminui
Intervalo de penetração: 0-30 cm ao invés de 15-45 cm 30-60 cm “ “	diminui aumenta
Diâmetro do amostrador	aumenta/diminui
Não utilização do “liner” no amostrador	diminui

2.2.2 - Fatores intervenientes na energia transferida às hastes do SPT

Abordam-se neste item os aspectos mais importantes associados à interferência dos fatores na energia transmitida às hastes durante a execução do SPT.

A energia teórica do martelo, designada por E_T ou E^* , pode ser calculada pela seguinte equação:

$$E_T = P.h \quad (2.3)$$

Sendo:

- ✓ $P \rightarrow$ é o peso do martelo; e
- ✓ $h \rightarrow$ sua altura de queda.

A energia transmitida às hastes imediatamente antes do impacto pode sofrer uma redução, dependendo do sistema utilizado para levantar e liberar o martelo, em virtude de prováveis perdas de velocidade durante a queda.

Segundo Cavalcante (1999), a perda causada pelo atrito entre a haste-guia do martelo e a haste padrão do SPT, ou entre a corda e a roldana, entre a corda e o tambor e, ainda, em decorrência das operações da fase de levantamento e queda do martelo, fazem com que seja reduzida a velocidade no impacto com a cabeça-de-bater. Dessa forma, pode-se calcular a eficiência associada à velocidade de impacto denominada de E_{rv} . Essa eficiência relaciona a energia teórica ou potencial à energia medida imediatamente antes do impacto do martelo no topo da haste.

A eficiência do SPT é a relação entre a energia transmitida às hastes, a que alcança o amostrador, e a energia de queda do martelo padrão (energia potencial).

Segundo Clayton (1990), o índice (E_{rv}) que é representado pela Equação 2.4, também está associado à eficiência dinâmica média do martelo e à variabilidade dos golpes.

$$E_{cv} = \frac{E_m}{E_T} \quad (2.4)$$

A energia disponível (E_m) é determinada imediatamente antes da ocorrência do impacto, a partir da velocidade máxima (v_0), e da massa do martelo (M_m), segundo a Equação 2.5. Esse é considerado o primeiro aspecto indicador de perdas de energia no SPT, visto que E_{cv} é dependente do sistema de martelo.

$$E_m = \frac{M_m v_0^2}{2} \quad (2.5)$$

Serota & Lowter (1973) fizeram comparações entre o sistema “cathead” e o sistema inglês de queda livre “pilcon”, concluindo que com uma volta da corda em torno do tambor não há diferença apreciável na eficiência de energia, enquanto que com duas voltas em torno do tambor a diferença obtida já era considerável.

Na década de setenta, Kovacs (1979) apresenta estudos sistemáticos sobre a velocidade máxima de impacto do martelo durante sua queda no SPT e, partindo destes estudos, determina a energia cinética no impacto.

Observa-se na Figura 2.3, os resultados obtidos por Kovacs (1980), usando o sistema americano tipo “cathead”, em que a eficiência obtida é colocada em função do número de voltas da corda em torno do tambor.

Kovacs (1980) mostrou que para uma ou duas voltas da corda em torno do tambor a eficiência de energia cinética parece constante, porém para três e quatro voltas, ela torna-se consideravelmente menor, contrapondo-se às deduções de Serota & Lowter (1973). Kovacs (1980) demonstrou ainda que se ao invés de duas forem dadas três voltas na corda em torno do tambor, rotacionando-o no sentido anti-horário, ocorre uma redução significativa na sua eficiência, ou seja, esta passaria de 64% para 43%.

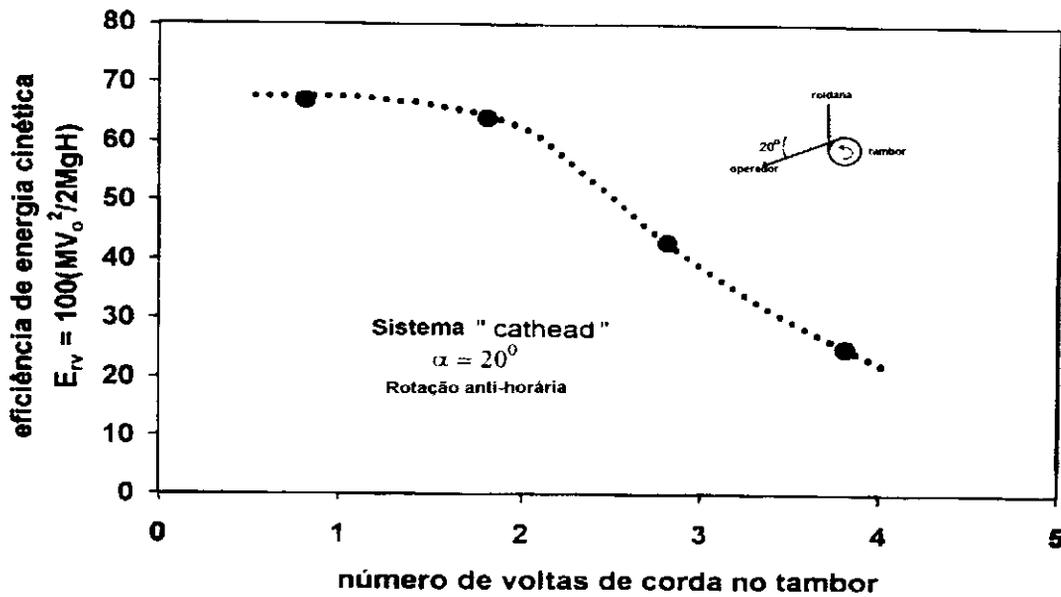


Figura 2.3 – Eficiência de energia cinética do sistema de corda e tambor em rotação (cathead) medida no instante de impacto do martelo (Kovacs, 1980).

Skempton (1986) apresenta um resumo contendo resultados de diversos pesquisadores, sobre a eficiência de energia cinética levando em consideração o sistema de levantamento e soltura do martelo do SPT, conforme mostrado na Figura 2.4.

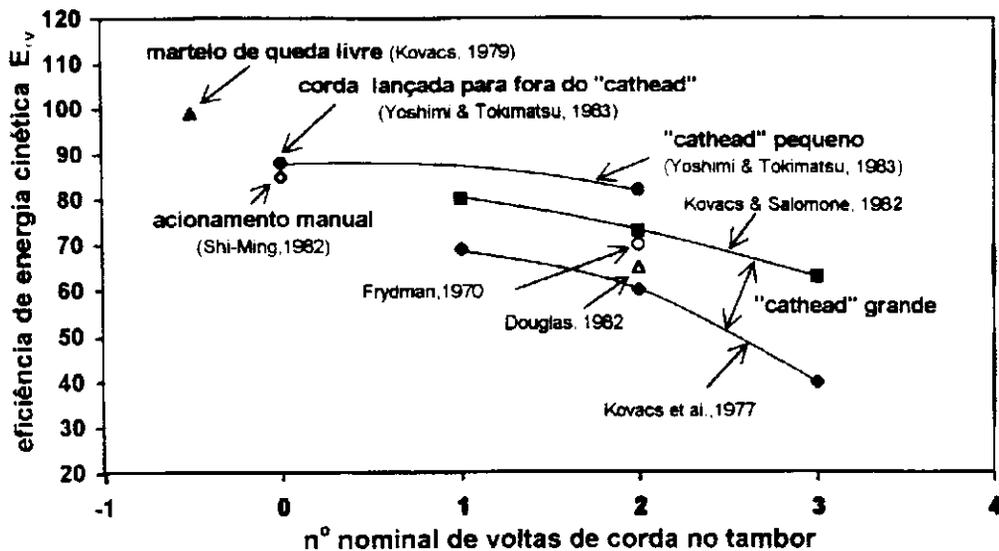


Figura 2.4 – Variação da eficiência de energia cinética em função do sistema operacional do martelo do SPT e do número de voltas da corda em torno do tambor (Skempton, 1986).

As variáveis ilustradas na Figura 2.4 que influenciam na eficiência de energia do SPT são as seguintes: o tamanho do tambor, o número de voltas da corda no tambor e o mecanismo de levantamento do martelo.

Os resultados obtidos por Kovacs et al. (1978), Kovacs & Salomone (1982) e Oh-Oka (1984), citados por Tokimatsu (1988), são ilustrados graficamente na Figura 2.5.

Este demonstra a influência do diâmetro do tambor e da corda na energia de impacto do martelo. Analisando a figura, pode-se observar que as cordas de menores diâmetros situadas nas faixas de 15 mm a 19 mm, com duas voltas no tambor menor (de 125 mm), apresentam os maiores índices de energia disponível no instante do impacto com a cabeça-de-bater. No entanto, não se dá ênfase à idade da corda, que poderá também interferir na transmissão de energia cinética do martelo (Belincanta, 1998). Possivelmente devido ao atrito desenvolvido entre as hastes, percebe-se ainda, que mesmo o martelo de queda livre usado por Oh-Oka (1984), citado por Tokimatsu (1988), nem toda energia teórica é transmitida durante a queda.

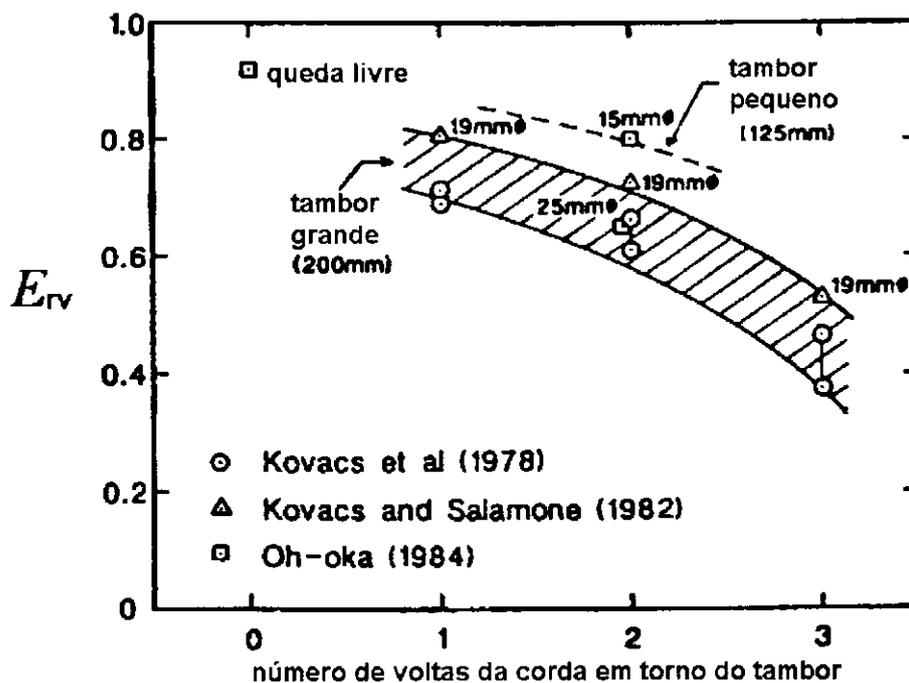


Figura 2.5 – Variação da eficiência de energia cinética em função do sistema operacional do martelo do SPT, dos diâmetros do tambor e da corda, e do número de voltas da corda no tambor (Tokimatsu, 1988).

Segundo Palacios (1977) e Schmertmann & Palacios (1979), um aspecto importante que se soma ao anterior (influência do diâmetro do tambor e da corda na energia de queda do martelo) e reduz a energia efetiva transferida ao amostrador, está associado ao impacto do martelo com a cabeça-de-bater e, conseqüentemente, na propagação da onda de energia incidente na composição de hastes.

A geração de onda de tensão transmitida em impulsos sucessivos ao longo das hastes é provocada pelo impacto do martelo no topo da composição. Logo, a teoria newtoniana de impacto entre corpos não explica completamente as condições de ocorrência do evento, pois é um evento de natureza dinâmica.

A duração dos impulsos de tensão dependem não só do tipo do martelo, mas também das condições da interface martelo-haste e do material constituinte das hastes.

O aspecto importante, comentado por Cavalcante (1999), é o fato da energia incidente na composição ser dependente da interação entre o martelo, a cabeça de bater e as hastes. Nos EUA foi observada uma variação na eficiência de energia transmitida em relação à nominal de queda livre (474J), numa faixa de 30% a 85%. Isso pode fazer com que varie a resistência à penetração do SPT em até três vezes.

Palacios (1977) conduziu uma pesquisa que possibilitou fazer uma avaliação cuidadosa da ocorrência do evento, obtendo conclusões importantes. Suas contribuições trouxeram uma melhor compreensão acerca dos fatores que interferem no SPT e que não eram quantificados.

Schmertman & Palacios (1979) deram significativas contribuições ao entendimento do comportamento dinâmico do SPT. Estes pesquisadores constataram que a resistência à penetração do N_{SPT} é inversamente proporcional apenas à energia contida na primeira onda de compressão incidente transmitida às hastes (ENTHRU).

Palacios (1977) demonstrou a ocorrência de reflexões de ondas de tração durante o instante da chegada da primeira onda no amostrador, podendo assim gerar novos pulsos, dependendo da intensidade da onda de compressão.

A Figura 2.6 mostra a variação das eficiências de energia cinética, E_{TV} , e dinâmica, E_{TV} , segundo Kovacs & Salomone (1982). Na ilustração pode-se observar facilmente a influência do número de voltas da corda em torno do tambor usado na operação do martelo, tendo seu comportamento coerente com as Figuras 2.4 e 2.5.

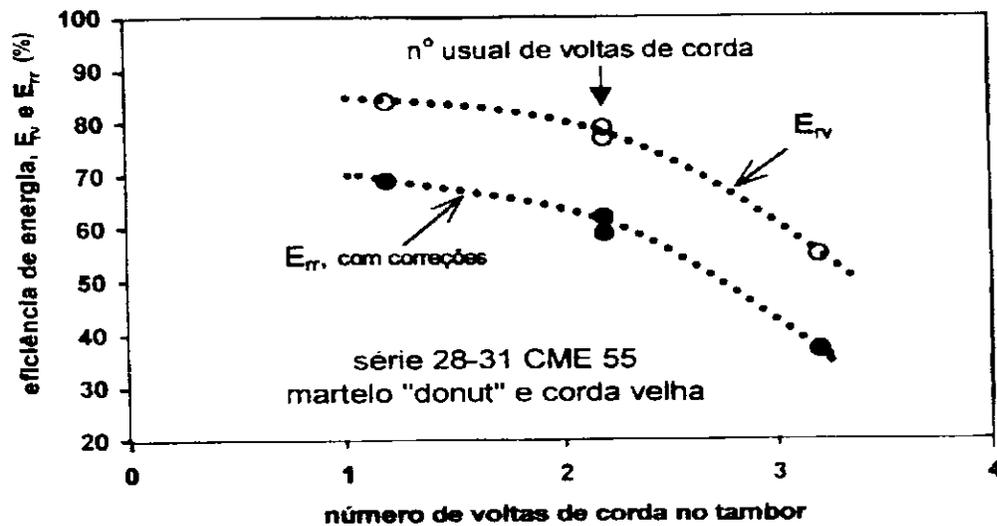


Figura 2.6 – Comportamento da eficiência de energia cinética, E_{TV} , e dinâmica transferida às hastes, E_{TV} (Kovacs & Salomone, 1982).

Na Tabela 2.2 são apresentados dados obtidos por Clayton (1990), mostrando a influência dos vários mecanismos de acionamento dos martelos usados no SPT na eficiência de energia dinâmica transferida às hastes em diversos países. Nesta tabela observa-se que os sistemas mais eficientes são o automático de queda livre inglês, o “donut” japonês operado no sistema “tombi” e o sistema brasileiro de pino-guia (que por sinal apresentou a mesma eficiência dinâmica do sistema inglês de queda livre, ou seja, 73%).

Tabela 2.2 – Valores da eficiência de energia transferida às hastes do SPT em função do tipo de martelo, segundo Clayton (1990).

País	Martelo	Mecanismo Operacional	Eficiência Média (%)	Autor
Argentina	donut	tambor	45	1
Brasil	pino-guia	manual	72;73	3;6
China	automático	queda livre	60	1
	donut	manual	55	2
	donut	tambor	50	1
Colombia	donut	tambor	50	3
Japão	donut	tombi	78;85	1;4
	donut	duas voltas no tambor	65;67	1;2
Inglaterra	automático	queda livre	73	5
Estados Unidos	safety	duas voltas no tambor	55;60	1;2
	donut	duas voltas no tambor	45	1
Venezuela	donut	tambor	43	3

Autores: 1) Seed et al. (1985); 2) Skempton (1986); 3) Décourt (1989); 4) Riggs (1986); 5) Clayton (1990); 6) Belincanta (1998).

Na década de oitenta, Kovacs (1981) e Kovacs & Salomone (1982) fizeram medições de energia cinética do martelo no instante do impacto, bem como da energia transferida às hastes do SPT, conforme mostrado na ilustração da Figura 2.7.

As perdas de energia observadas são consideráveis no martelo cilíndrico vazado do tipo “donut”, entretanto, são menores do que no mecanismo que usa o martelo “safety hammer”.

Segundo Clayton (1990), há martelos ingleses de queda livre com cabeças de bater chegando a pesar até 20 kgf.

Foi constatada uma notória influência da massa da cabeça de bater na eficiência do sistema operacional do SPT adotado correntemente no Brasil (Belincanta, 1998).

2.2.3 – Fatores intervenientes no SPT-T

O torque medido no SPT-T, por ser uma medida estática, parece ser menos sensível aos erros que se cometem no SPT. Entretanto, existem alguns fatores que influenciam predominantemente os valores medidos durante a execução do ensaio.

Um dos erros que pode ser cometido com frequência é a zeragem do torquímetro. A falta de verificação pode falsear as leituras efetuadas.

Antes da aplicação do torque nas hastes é necessário que se faça a verificação do posicionamento do torquímetro, o qual deve estar bem nivelado horizontalmente, pois, caso tenha alguma variação da posição horizontal, pode haver comprometimento dos valores do torque aplicado.

A velocidade com a qual se aplica o torque pelo operador deve ser constante. Isto se faz necessário para que a velocidade angular de aplicação do torque seja a mesma. Porém, às vezes isto é negligenciado, devido a operadores inexperientes e mal treinados. É necessário que a aplicação do torque seja contínua e ininterrupta, de forma que se obtenha valores consistentes. Outro fator influenciante é a falta de atenção do operador durante a leitura, ou seja, erros de leitura. O operador deve fazer a leitura, simultaneamente com a aplicação do torque, tendo cuidado de anotar o valor máximo do torque.

Outro fator importante diz respeito ao estado de conservação da aparelhagem utilizada no SPT-T. Importante citar a influência do estado de conservação das hastes do SPT, pois, caso uma ou mais hastes não se encontrem retilíneas a medida do torque pode ser falseada.

Um amostrador com irregularidades em sua superfície lateral, poderá fazer com que o valor obtido durante a aplicação do torque aumente, devido ao maior atrito gerado no sistema amostrador-solo.

Havendo imperfeições com o adaptador que conecta o torquímetro às hastes (como do sistema de encaixe do torquímetro) haverá possivelmente problemas com a realização do ensaio. Além do mais, quando da aplicação do torque, se as luvas estiverem mal conservadas pode ocorrer o rompimento destas com maior facilidade.

Portanto, os fatores intervenientes no ensaio SPT-T são de fontes de erros menores e mais facilmente evitáveis, podendo ser feito sob uma boa fiscalização na manutenção do estado da conservação da aparelhagem utilizada, bem como treinando a mão de obra disponível.

Segundo Ranzini (1994), pelo fato do torque não sofrer influência dos fatores que de alguma forma intervêm no N_{SPT} , os valores obtidos com do torque seriam mais confiáveis do que a própria resistência à penetração.

2.3 – Energia Transferida às Hastes

2.3.1 – Generalidades

As técnicas de ensaios “in situ” e em laboratório vêm sendo aprimoradas continuamente, porém, não na mesma proporção. Vários pesquisadores, preocupados com a qualidade dos dados obtidos através do SPT, têm lutado pela padronização da eficiência da energia transferida às hastes para melhorar a qualidade, quantificando a energia transferida. Este é um ponto de grande complexidade, devido a problemas que dificultam a padronização, tais como a tendência dos operadores em levantar o martelo quase sempre acima do valor especificado, erros na contagem dos golpes, massa do martelo, peso e rigidez das hastes, estado do amostrador, etc.. Por isto o Comitê Técnico sobre o SPT no ISOPT1- Orlando (1988) e também o ISSMFE (International Society for Soil Mechanics and Foundation Engeneering)- Rio de Janeiro (1989), recomendam a aferição da aparelhagem em termos de energia transferida às hastes.

A aferição do SPT é de grande importância, principalmente por causa do uso dos resultados em correlações empíricas. Correlações entre o torque e o índice de resistência à penetração foram feitas inicialmente por Décourt & Quaresma (1991), seguidos por Alonso (1994), os quais apresentaram correlações lineares entre estes parâmetros para diferentes locais na cidade de São Paulo/SP e também nos Campus da USP/ São Carlos e UNICAMP/Campinas.

Empenhados na melhoria de qualidade dos resultados obtidos com o SPT, pesquisadores apresentam formulações para determinação de medidas de energias cinética e dinâmica que fazem parte deste ensaio. Essas medidas começaram a ser feitas por Kovacs (1977), Palacios (1977), Schmertmann & Palacios (1979). No Brasil, a primeira referência deve-se à Belincanta (1985).

No início dos anos noventa, Belincanta (1994) apresenta novo trabalho sobre energia dinâmica no SPT, abordando o mecanismo da transferência da energia contida no martelo, no instante do impacto, para as hastes do SPT. Nesse trabalho, salienta-se para a importância da medição desta energia transferida às hastes, essencialmente quando se busca a padronização internacional nos ensaios de penetração dinâmica, apresentando metodologias para determinação da energia contida na primeira onda longitudinal de compressão incidente, bem como da eficiência relativa à energia padrão (E^*).

Os trabalhos mais relevantes para o desenvolvimento dos princípios dinâmicos do SPT são devidos a Smith (1960), Fairhurst (1961), Timoshenko & Goodier (1970), Adam (1971), McLean et al.(1975), Palacios (1977), Kovacs et al.(1977), Schmertmann & Palacios (1979), Kovacs & Salomone (1982), Belincanta (1985), entre outros.

Smith (1960) apresentou um método numérico para modelar a transmissão de onda de energia em elementos estruturais esbeltos submetidos a impacto. Fairhurst (1961) apresentou, a partir do impacto entre dois corpos de mesmo material, a teoria básica do princípio de transmissão de energia e Timoshenko & Goodier (1951;1970) apresentaram, a partir do impacto em extremidades de barras prismáticas, os fundamentos para interpretação da transmissão de ondas longitudinais de tensão. Segundo Danziger (1991), o marco do desenvolvimento da aplicação da equação da onda à cravação dinâmica de estacas é

considerado o trabalho apresentado por Smith (1960). Abou-Matar & Goble (1997) indicaram que a mesma metodologia utilizada para avaliação do comportamento dinâmico de estacas também pode ser utilizada para modelar com sucesso o comportamento do SPT.

2.3.2 - Propagação de ondas longitudinais

Para o entendimento deste assunto é importante que se faça a distinção entre a velocidade de partículas (v) e a velocidade de propagação da onda longitudinal de tensão na barra (c). Para o esclarecimento desta diferença recorre-se à ilustração na Figura 2.8.

Na Figura 2.8a nota-se que inicialmente uma pequena zona da haste é comprimida à medida que começa a ser gerada na extremidade da composição uma onda longitudinal de compressão de intensidade uniforme (σ_x). A transferência da tensão de compressão no decorrer do tempo ocorre em zonas sucessivas, conforme mostrado nas Figuras 2.8a e 2.8b. A transmissão de energia de uma zona para outra da onda longitudinal de compressão representa a velocidade de propagação nas hastes conforme mostrado na Figura 2.8c.

Assim, durante um intervalo de tempo Δt , ocorre a transmissão da onda de compressão por uma distância Δx das hastes ($\Delta x = c \cdot \Delta t$) e por uma distância X_n , no intervalo de tempo t_n ($X_n = c \cdot t_n$).

É interessante notar que a zona comprimida da barra coincidirá com o incremento do deslocamento da extremidade esquerda da composição de hastes, quando a zona comprimida sofrer um encurtamento elástico. Pela lei de Hooke, isto é representado pela expressão:

$$\Delta u = \frac{\sigma_x}{E} \Delta x \quad (2.6)$$

ou

$$\Delta u = \frac{\sigma_x}{E} c \Delta t \quad (2.7)$$

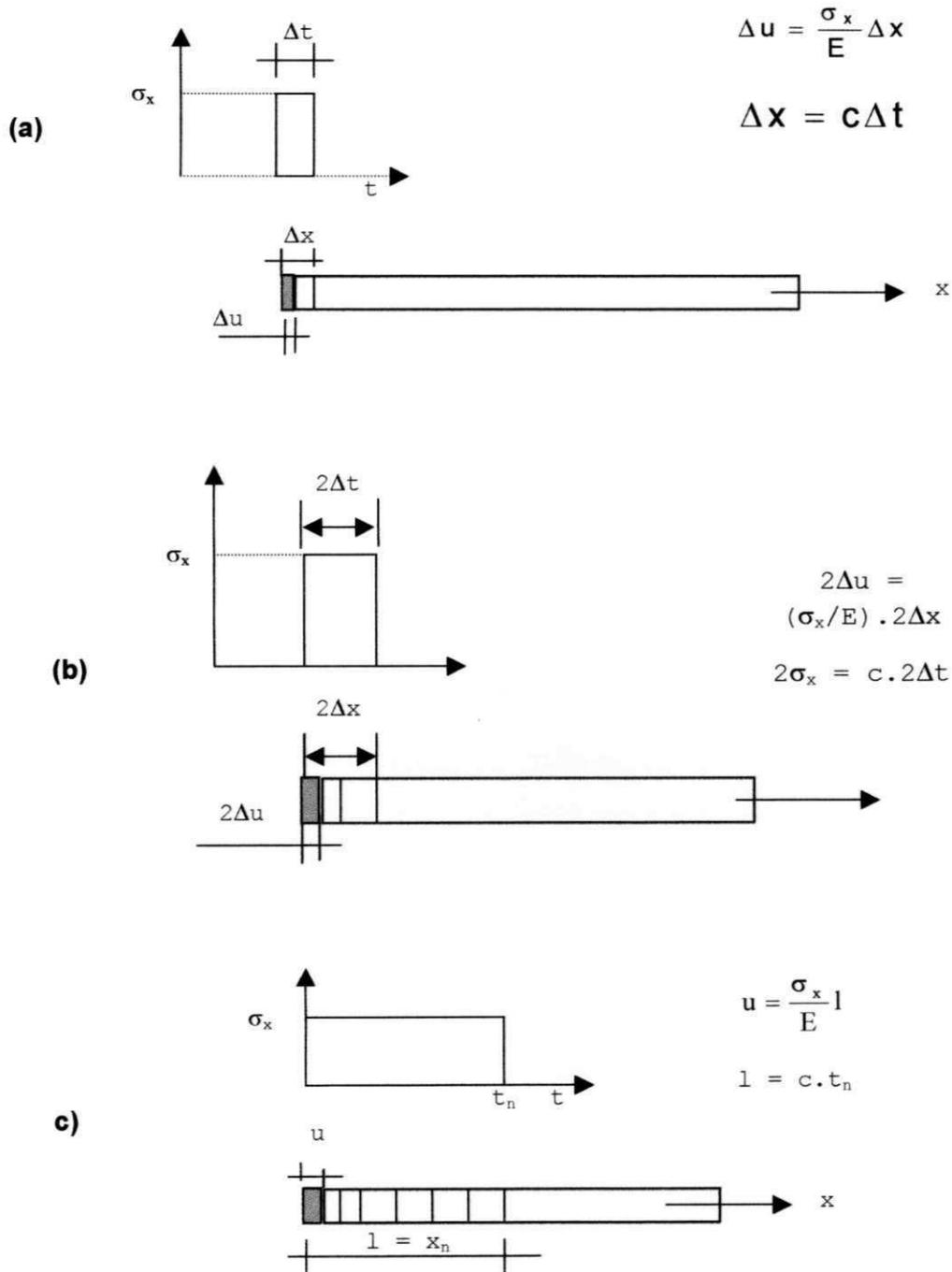


Figura 2.8 – Ilustração do fenômeno da propagação de uma onda longitudinal de compressão uniforme em uma composição de hastes de comprimento infinito, segundo Timoshenko & Goodier (1970).

A velocidade de deformação é obtida, dividindo-se o incremento de deslocamento (Δu) pelo incremento de tempo (Δt). A velocidade de deformação nada mais é do que a própria velocidade de partícula, ou seja:

$$v = \frac{\sigma_x}{E} c \quad (2.8)$$

Interpretando a equação 2.8, observa-se que na propagação de uma onda longitudinal de compressão, a velocidade de partícula terá o mesmo sentido de c , ocorrendo o sentido contrário ao de c quando há propagação de uma onda longitudinal de tração.

Observa-se facilmente que todos os pontos da haste, contidos na zona comprimida da barra, estão sujeitos à mesma velocidade de deformação e que os pontos juntos à frente da onda são acelerados desde a velocidade zero ($v = 0$) até à velocidade final (v).

As partículas do elemento Δx são solicitadas por uma força que corresponde a $\sigma_x \cdot a$, num intervalo de tempo Δt , sendo “ a ” a área da seção transversal das hastes. A partir da aceleração das partículas, desde uma velocidade zero até uma velocidade final v , (ver Figura 2.8a), pode se escrever:

$$\sigma_x \cdot a \cdot \Delta t = a \cdot \Delta x \cdot \rho \cdot v \quad (2.9)$$

ou,

$$\sigma_x \cdot a \cdot \Delta t = a \cdot c \cdot \Delta t \cdot \rho \cdot v \quad (2.10)$$

ou ainda,

$$\sigma_x = c \cdot \rho \cdot v \quad (2.11)$$

Das Equações 2.8 e 2.10, obtém-se:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.12)$$

sendo:

E → módulo de elasticidade das hastes;

ρ → massa específica do material do qual são constituídas.

Analisando-se a equação 2.12, conclui-se que c depende exclusivamente das propriedades do meio em questão (hastes), ou seja, é função apenas do módulo de elasticidade (E) e da massa específica (ρ) do material do qual são fabricadas as hastes. Entretanto, observa-se ainda da equação 2.13 que, além das propriedades do meio, a velocidade v depende também da tensão aplicada (σ_x).

Há uma relação de unicidade entre a tensão ou força e a velocidade de partículas conforme demonstrada na equação 2.13:

$$v = \frac{\sigma_x}{E} c = \frac{\sigma_x a c}{E a} = \frac{F c}{E a} = \frac{F}{Z} \quad (2.13)$$

sendo,

- $Z = \frac{E a}{c} = c \rho a$ → Impedância das hastes (fator de proporcionalidade entre a força e a velocidade)

A impedância depende além das propriedades físicas intrínsecas do material (E ou ρ e c), da área da seção transversal da barra (a).

2.3.2.1 - Equação de propagação de onda longitudinal de tensão em hastes

Seja uma haste sujeita a um estado de tensão proveniente da propagação de uma onda longitudinal de compressão, conforme ilustrado na Figura 2.9. Inicialmente, o elemento infinitesimal “ dx ” da haste estava situado entre x e $x+dx$, sujeito a um estado de tensão. Este elemento sofre deslocamentos que provêm das deformações elásticas do trecho considerado da haste em função do estado de tensões.

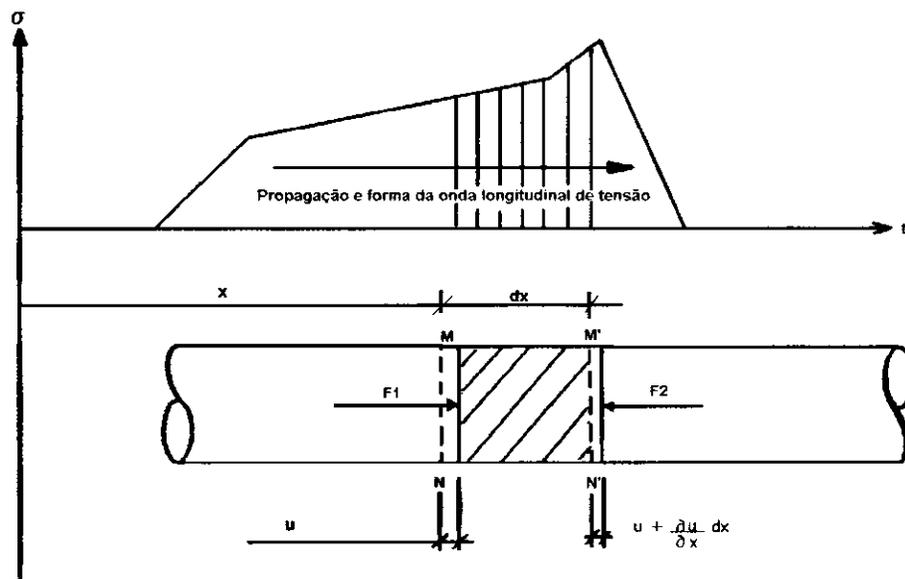


Figura 2.9 – Ilustração esquemática da propagação de uma onda longitudinal de tensão em um conjunto de hastes (Belincanta, 1985).

As forças atuantes F_1 e F_2 nas respectivas seções MN e $M'N'$ podem ser calculadas pela lei de Hooke, com a utilização das deformações específicas:

$$F_1 = Ea \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \tag{2.14}$$

$$F_2 = Ea \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx \right) \tag{2.15}$$

Aplicando a lei de Newton ao elemento infinitesimal das hastes, dx , sujeito a uma aceleração uniforme, a_c , obtém-se:

$$F_2 - F_1 - m \cdot a_c = 0 \tag{2.16}$$

$$Ea \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx \right) - Ea \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) - \rho a dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \tag{2.17}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E/\rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) \tag{2.18}$$

Considerando a equação 2.12, obtém-se:

$$\partial^2 u / \partial t^2 = c^2 (\partial^2 u / \partial x^2) \quad (2.19)$$

A equação diferencial de segunda ordem (Equação 2.19) representa a propagação de uma onda longitudinal de tensão (equação do movimento).

Pode-se demonstrar também, por substituição, que qualquer função do tipo $\sin(w)$, $\cos(w)$, e^w ou w^n , sendo w igual a $(x-ct)$ ou $(x+ct)$, representa uma solução da equação do movimento, tendo como solução geral:

$$u = f(x-ct) + g(x+ct) \quad (2.20)$$

As funções f e g representam duas ondas de deslocamento com propagação em sentidos opostos com velocidade c , sendo funções independentes que poderão preencher por completo as condições de contorno da equação da onda.

Na solução geral atribuída à equação do movimento dada na forma da Equação 2.20, suponha-se que, por exemplo, $g(x+ct) = 0$, então a solução será:

$$u = f(x - ct) \quad (2.21)$$

Com isso, se $u = s$ quando $t = t_1$ e $x = x_1$ e, $u = s$ quando $t = t_2$ e $x = x_2$, como se mostra na Figura 2.10a, pode-se escrever:

$$s = f(x_1 - ct_1) = f(x_2 + ct_2) \quad (2.22)$$

logo,

$$x_1 - ct_1 = x_2 - ct_2 \quad (2.23)$$

portanto,

$$c = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (2.24)$$

Sabendo-se que c é um valor constante e positivo, e $t_2 > t_1$, conclui-se que a Equação 2.21 representa uma onda longitudinal de tensão propagando-se no sentido crescente de x .

Se na Equação 2.20, a parcela $f(x-ct)$ for igualada a zero, obtém-se:

$$u = g(x + ct) \quad (2.25)$$

Conforme mostrado na Figura 2.10b, tem-se:

$$S = g(x_1 + ct_1) = g(x_2 + ct_2) \quad (2.26)$$

$$x_1 + ct_1 = x_2 + ct_2 \quad (2.27)$$

Portanto,

$$c = \frac{x_2 - x_1}{t_1 - t_2} \quad (2.28)$$

Portanto, a Equação 2.20 que é a combinação de duas soluções independentes da equação diferencial linear, representa a solução geral da Equação 2.19. De acordo com a Figura 2.10c, numa dada seção da haste e num certo intervalo de tempo t , através da superposição dos efeitos pode-se obter uma solução final.

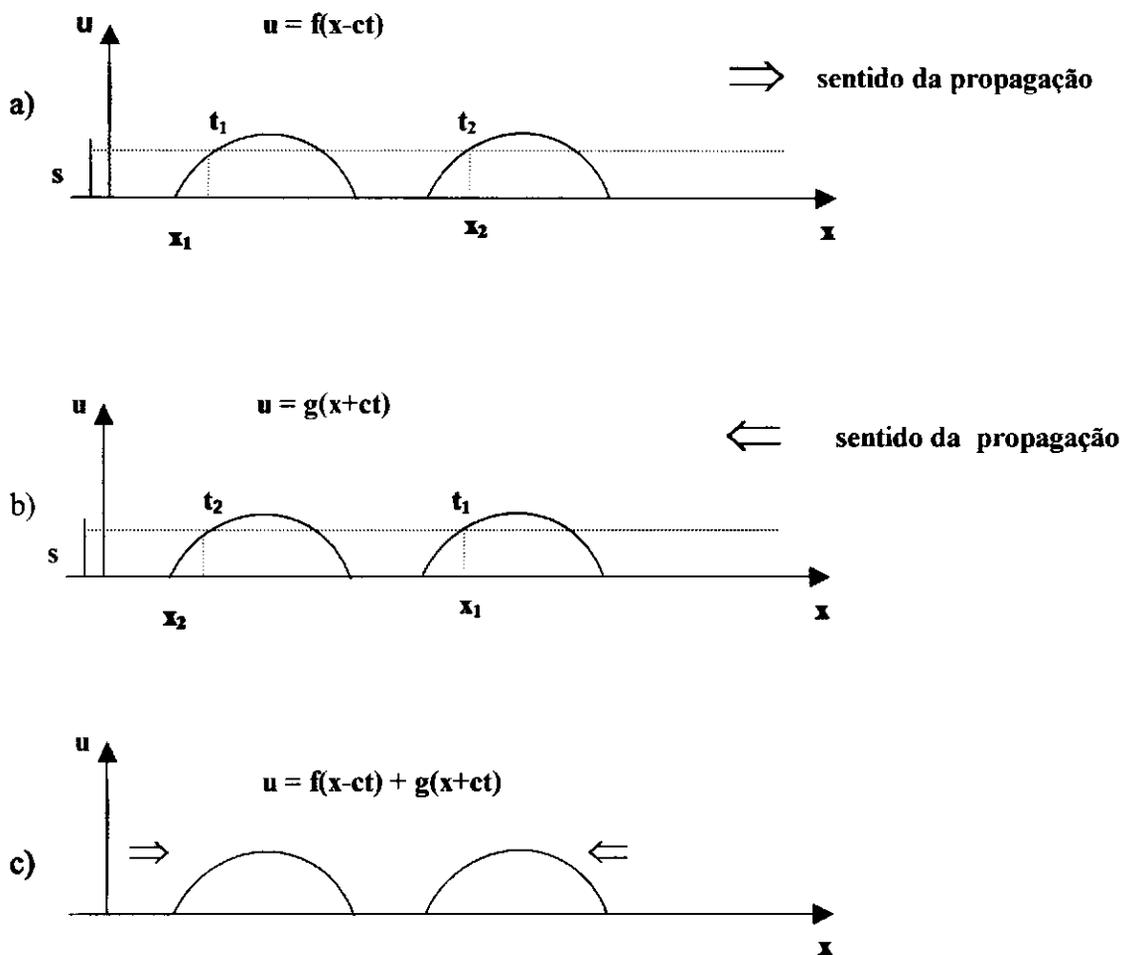


Figura 2.10 – Ilustração esquemática dos sentidos de propagação de ondas longitudinais de tensão.

Clough & Penzien (1975), segundo Danziger (1991) objetivando facilitar a compreensão desse fenômeno, apresenta esquematicamente o mecanismo da propagação de uma onda de compressão incidente numa barra entre dois intervalos de tempo distintos: $t=0$ e $t = \Delta t$, conforme mostrado nas Figuras 2.11a e 2.11b.

Considerando uma nova variável de posição $x' = x - c\Delta t$, tem-se que $f(x - c\Delta t) = f(x')$. Assim, a forma da onda com relação à nova variável x' é mostrada na Figura 2.11b, sendo idêntica à mostrada na Figura 2.11a. Quando a onda avança uma distância $c\Delta t$, num intervalo de tempo Δt , não ocorre nenhuma modificação na forma da onda.

Baseado na Equação 2.20, pode-se obter as funções de força e de velocidade de partícula com a utilização da técnica de diferenciação:

$$F = -Ea \frac{\partial u}{\partial x} = -EA \left[\frac{\partial f(x-ct)}{\partial x} + \frac{\partial g(x+ct)}{\partial x} \right] =$$

$$-EA \left[\frac{\partial f(x-ct)}{\partial(x-ct)} * \frac{\partial(x-ct)}{\partial x} + \frac{\partial g(x+ct)}{\partial(x+ct)} * \frac{\partial(x+ct)}{\partial x} \right]$$

logo,

$$F = -EA \left[\frac{df(x-ct)}{d(x-ct)} + \frac{dg(x+ct)}{d(x+ct)} \right] \tag{2.29}$$

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial f(x-ct)}{\partial t} + \frac{\partial g(x+ct)}{\partial t} = \frac{\partial f(x-ct)}{\partial(x-ct)} * \frac{\partial(x-ct)}{\partial t} + \frac{\partial g(x+ct)}{\partial(x+ct)} * \frac{\partial(x+ct)}{\partial t}$$

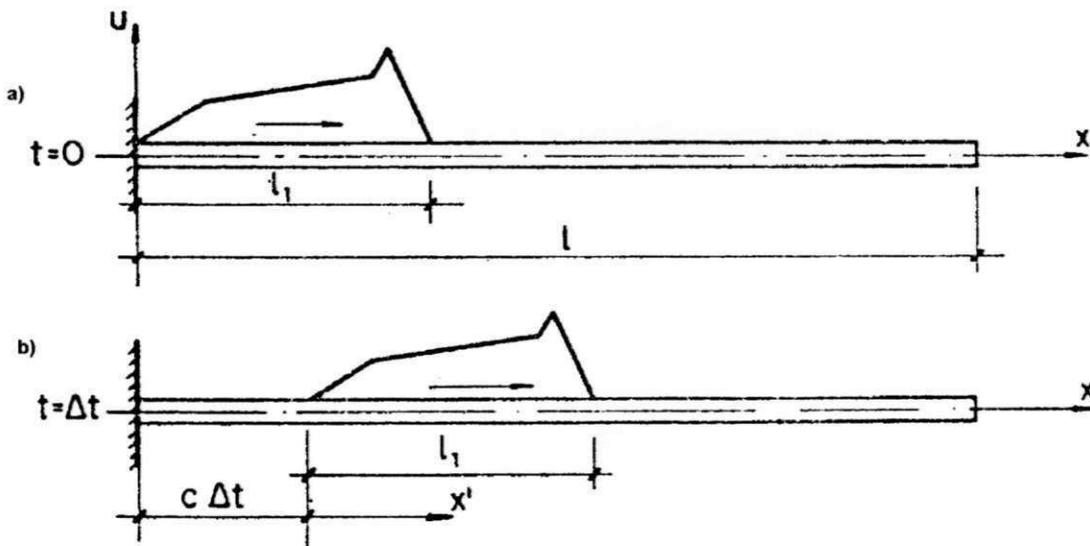


Figura 2.11 – Ilustração esquemática da propagação de uma onda de deslocamento numa barra em função do tempo (Clough & Penzien, 1975, segundo Danziger, 1991).

Portanto,

$$v = -c \frac{df(x-ct)}{d(x-ct)} + c \frac{dg(x+ct)}{d(x+ct)} \tag{2.30}$$

Aplicando-se na extremidade de uma barra, uma força de tração, será produzida e transmitida ao longo da barra uma onda de tração que se propagará com velocidade c . A velocidade de partícula será dada pela Equação 2.13 e terá sentido oposto à direção do eixo x . Portanto, quando se aplica uma tensão de compressão na extremidade de uma barra, as velocidades de propagação da onda e de partículas terão o mesmo sentido. Todavia, quando a tensão é de tração os sentidos de ambas são opostos. Este aspecto é importante para análise das condições de contorno das extremidades da composição do SPT.

2.3.3 - Influência das condições de contorno na transmissão de ondas longitudinais de tensão em hastes

Segundo Clough & Penzien (1975), segundo Danziger (1991), para uma melhor compreensão da propagação de ondas longitudinais de tensão em hastes, faz-se necessária a utilização de flechas indicativas do sentido da propagação, estabelecendo-se uma convenção de sinais.

Consideram-se as forças ou tensões positivas quando forem de compressão e a velocidade e os deslocamentos serão positivos quando tiverem o sentido decrescente na composição de hastes.

Portanto, de acordo com a convenção estabelecida, as Equações 2.11 e 2.18 poderão ser representadas da seguinte forma:

$$\downarrow v = \frac{\sigma_x c}{E} = \frac{\downarrow F}{Z} \quad (\text{onda longitudinal de tensão descendente}) \quad (2.31)$$

$$\uparrow v = \frac{\sigma_x c}{E} = -\frac{\uparrow F}{Z} \quad (\text{onda longitudinal de tensão ascendente}) \quad (2.32)$$

e

$$u = \downarrow f(x - ct) + \uparrow g(x + ct) = \downarrow u + \uparrow u \quad (2.33)$$

Segundo Cavalcante (1999), para estudar a influência das condições de contorno, a função definidora da propagação de uma onda longitudinal de tensão em hastes é dependente

dos efeitos decorrentes de alterações, tais como: mudança de seção transversal, condições das extremidades das hastes, resistência do solo, atrito, etc.

2.3.3.1 – Condições das extremidades das hastes

a) Extremidade livre

Com base no fato de que não haverá nenhuma reação no extremo inferior da haste, ou seja, o estado de tensão final na extremidade inferior da haste é nulo ($R = 0$), pode-se determinar a influência da extremidade livre. A ilustração da Figura 2.12a apresenta essa influência.

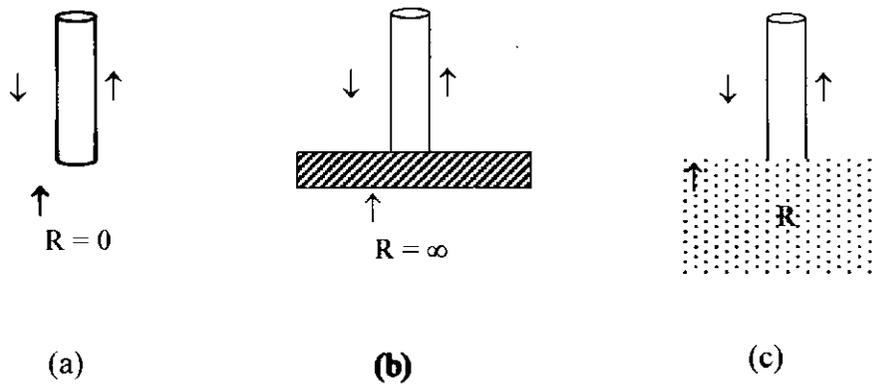


Figura 2.12 – Condições de contorno para a solução geral da equação diferencial linear da propagação de ondas longitudinais de tensão (Clough & Penzien, 1975, segundo Danziger, 1991).

De acordo com a Figura 2.12a tem-se:

$$R = \downarrow F + \uparrow F = 0 \quad \text{ou} \quad \uparrow F = -\downarrow F$$

Logo, percebe-se conforme indicado acima, que a onda longitudinal que atinge a extremidade inferior da haste será refletida com a mesma intensidade, entretanto com sinal contrário. Neste caso, se a onda que atinge a extremidade inferior da composição de hastes for de compressão, a onda que se reflete será de tração e vice-versa.

Através do somatório das velocidades originárias da onda que atinge a extremidade livre das hastes e da onda que se reflete, pode-se determinar a velocidade de partículas nessa extremidade livre, levando-se em consideração o sentido de cada velocidade.

$$v = \downarrow v + \uparrow v = \frac{\downarrow F}{Z} + \left(-\frac{\uparrow F}{Z} \right) = 2 \left(\frac{\downarrow F}{Z} \right)$$

$$v = 2 \downarrow v \quad (2.34)$$

Da Equação 2.34 pode-se concluir que as partículas no trecho de superposição das ondas longitudinais de tensão descendente e ascendente sofrerão uma nova aceleração, ou seja, para que o equilíbrio seja mantido, haverá uma reaceleração e as velocidades das partículas dobram de valor, entretanto com o mesmo sinal.

b) Extremidade fixa

Como ilustrado na Figura 2.12b, pode-se determinar a influência da extremidade fixa, impondo a condição que, devido à elevada resistência, o deslocamento e a velocidade das partículas na extremidade inferior da haste serão nulos. Assim, tem-se:

$$v = \downarrow v + \uparrow v = 0$$

Ou seja,

$$\uparrow v = - \downarrow v \quad (2.35)$$

considerando as Equações 2.33 e 2.34 tem-se:

$$-\frac{\uparrow F}{Z} = -\frac{\downarrow F}{Z} \quad \text{ou ainda} \quad \uparrow F = \downarrow F \quad (2.36)$$

Neste caso, a onda longitudinal de tensão atinge a extremidade inferior do amostrador que está engastada, sofre reflexão com a mesma intensidade e mesmo sinal. Neste caso, se a

onda que atinge a extremidade engastada é de compressão, a onda refletida também será de compressão, porém, a velocidade reflete-se com sinal oposto.

No trecho de superposição, a força atuante pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$F = \downarrow F + \uparrow F = 2 \downarrow F \quad (2.37)$$

Como se viu, na região onde ocorre a superposição, entre as ondas descendente e ascendente, haverá um aumento de tensão, fazendo com que seu valor duplique.

c) Extremidade semi-engastada

A determinação da influência da extremidade semi-engastada parte do esforço final atuante na extremidade inferior do amostrador. Ou seja, depende da resistência equivalente do solo, conforme mostrado na Figura 2.12c. Assim, tem-se:

$$R = \downarrow F + \uparrow F \Rightarrow \uparrow F = R - \downarrow F \quad (2.38)$$

Da equação acima e considerando que a onda longitudinal descendente é de compressão, conclui-se que:

- ✓ se $R = \downarrow F$, não existirá onda longitudinal de tensão refletida na extremidade semi-engastada;
- ✓ se $R < \downarrow F$, a onda longitudinal de tensão refletida na extremidade semi-engastada será de tração;
- ✓ se $R > \downarrow F$, a onda longitudinal de tensão refletida na extremidade semi-engastada será de compressão.

Pode-se mostrar ainda que a velocidade na extremidade da haste pode ser obtida a partir da força incidente, da resistência equivalente do solo e da impedância das hastes, calculada conforme segue:

$$\downarrow v = -\frac{\uparrow F}{Z} = -\frac{1}{Z}(R - \downarrow F) \quad (2.39)$$

Logo, tem-se:

$$v = \downarrow v + \uparrow v = \frac{1}{Z}\downarrow F - \frac{1}{Z}(R - \downarrow F) = \frac{(2\downarrow F - R)}{Z} \quad (2.40)$$

2.3.4 – Impacto de um martelo cilíndrico sobre uma composição de hastes, ambos com comprimento finito – Previsão Teórica.

Considere-se o sistema mostrado na ilustração da Figura 2.13, constituída de um martelo de área de seção transversal plana A e comprimento L, que se desloca na direção da composição de hastes de área de seção transversal plana “a” e comprimento l. O martelo cai de uma altura h e adquire uma velocidade v no instante da ocorrência do impacto.

No impacto, admitindo-se perfeito o contato entre as seções extremas do martelo e da composição de hastes, duas condições serão impostas:

- i) a força na seção de contato do martelo deve ser a mesma da seção de contato das hastes;
- ii) as velocidades das partículas nas extremidades em contato do martelo e das hastes deverão ser as mesmas.

Por convenção, as forças no martelo, que são provenientes da propagação das ondas longitudinais de tensão, serão denotadas de F_m , enquanto que nas hastes serão F_h . Considera-se também que as tensões distribuem-se uniformemente em toda a seção transversal imediatamente após o impacto.

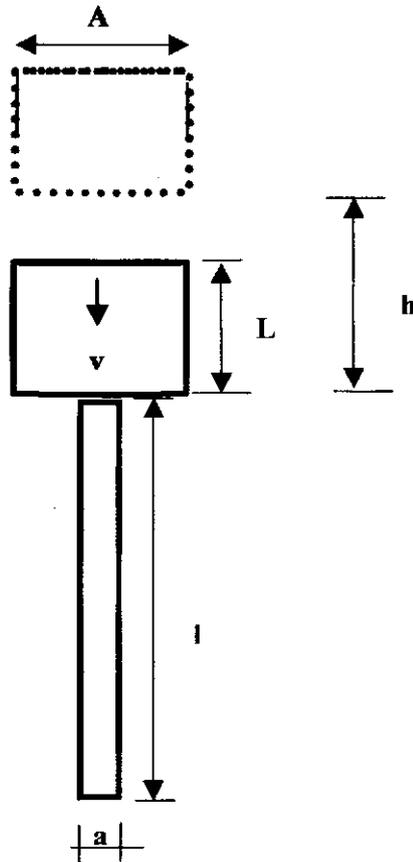


Figura 2.13 – Ilustração do impacto de um martelo sobre um conjunto de hastes (Palacios, 1977).

Após o impacto do martelo sobre as hastes serão geradas duas ondas longitudinais de compressão que se propagam em sentidos opostos e com velocidade c . As condições de compatibilidade de forças e de velocidades logo após o impacto devem ser satisfeitas. De acordo com as condições de compatibilidade de forças e velocidades tem-se:

$$\text{i)} \quad F_{mo} = F_{ho} \quad (2.41)$$

$$\text{ii)} \quad v - v_{mo} = v_{ho} \quad (2.42)$$

sendo:

F_{mo} → forças no martelo logo após o impacto;

F_{ho} → forças nas hastes logo após o impacto;

v_{mo} e v_{ho} → velocidades no martelo logo após o impacto.

Calculando-se as velocidades de partículas e levando em consideração as forças de compressão, bem como as impedâncias, as Equações 2.41 e 2.42 podem ainda ser escritas da seguinte maneira:

$$v - \frac{F_{mo}}{Z_m} = \frac{F_{ho}}{Z_h}$$

$$F_{ho} \left(\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z_h} \right) = v$$

$$F_{ho} = v \left(\frac{Z_m Z_h}{Z_m + Z_h} \right) \quad (2.43)$$

sendo:

Z_m → impedância do martelo;

Z_h → impedância da haste.

A equação final obtida para a força em função do tempo é:

$$F_{hn} = \left[v Z_m Z_h / (Z_m + Z_h) \right] \left[\frac{Z_m - Z_h}{(Z_m + Z_h)} \right]^n \quad (2.44)$$

sendo:

v → velocidade inicial do martelo no instante do impacto;

Z_m e Z_h → impedância do martelo e das hastes, respectivamente;

F_{hn} → força de compressão transmitida à extremidade da composição de hastes no tempo t ;

n → número inteiro dado em função do tempo decorrido após o impacto, de maneira que

$$2n \frac{1}{c} < t < 2(n+1) \frac{1}{c}.$$

Expressando a Equação 2.44 em função da razão de impedância, $r = Z_h/Z_m$, obtém-se:

$$F_{hm} = \left[\frac{vZ_h}{(1+r)} \right] \left[\frac{(1-r)}{(1+r)} \right]^n \quad (2.45)$$

Em conseqüência, para o cálculo da tensão transmitida à extremidade superior da composição de hastes no tempo t , pode-se usar a seguinte expressão:

$$\sigma_{hm} = \left[\frac{Ev}{c(1+r)} \right] \left[\frac{(1-r)}{(1+r)} \right]^n \quad (2.46)$$

As ondas que se desenvolvem nas hastes são sob a forma de impulsos, sendo cada uma delas de intensidade F_{hi} e com tempo de duração $t = 2l/c$.

Através das Equações 2.44 e 2.46, pode-se concluir que, mantendo-se constante a área de seção transversal de um determinado martelo e de uma determinada haste, a amplitude da força ou da tensão transmitida é proporcional à velocidade do martelo, porém independente do seu comprimento. No entanto, a duração de cada impulso de força ou tensão transmitida não depende da velocidade do martelo e sim do seu comprimento L .

A energia total absorvida pela composição de hastes, para um determinado pulso de tensão imposto, constitui-se de:

- i) $E_c \rightarrow$ energia cinética das partículas (E_c) que provém da velocidade com que as partículas são impulsionadas, resultante da passagem da onda de tensão. Isto é:

$$E_c = \frac{1}{2} a c \rho \int_0^t v^2 dt \quad (2.47)$$

- ii) $E_d \rightarrow$ energia de deformação que é acumulada pela ação elástica do elemento da composição submetido aos esforços provenientes da onda longitudinal de tensão, ou seja:

$$E_d = \frac{ac}{2E} \int_0^t \sigma^2 dt \quad (2.48)$$

Substituindo σ por ρcv na Equação 2.48, tem-se:

$$\frac{ac}{2E} \int_0^t \sigma^2 dt = \frac{ac}{2E} \int_0^t \rho^2 c^2 v^2 dt = \frac{1}{2} ac\rho \int_0^t v^2 dt \quad (2.49)$$

Schmertmann & Palacios (1979) mostram com auxílio das Equações 2.47 e 2.49, que a energia total (E_t) incidente nas hastes no tempo t compõe-se de metade de energia cinética e metade de energia de deformação, ou seja:

$$E_{it} = E_{\text{cinética}} (50\%) + E_{\text{potencial}} (50\%) = \frac{ac}{E} \int_0^t \sigma^2 dt$$

ou

$$E_{it} = \frac{c}{aE} \int_0^t F^2 dt \quad (2.50)$$

2.3.5 – Equação teórica da energia e da eficiência apresentada por Fairhurst (1961)

Fairhurst (1961) define pioneiramente a energia teórica transferida as hastes na primeira onda de compressão através de estudos sobre o impacto de um pistão sobre uma barra metálica de ponta cônica para o desmonte de rochas, e apresenta a seguinte expressão matemática:

$$E_{it} = 2a\rho LV^2 \left[\left(\frac{1-K^n}{4r} \right) + \left(\frac{l}{L} - n \right) \left(\frac{K^{2(n+1)}}{1+r} \right) \right] \quad (2.51)$$

onde

$$K = [(1-r)/(1+r)]^2$$

a → área transversal das hastes;

ρ → massa específica do material que constitui as hastes;

L → comprimento do martelo;

V → velocidade do impacto do martelo;

r → razão de impedância ($r = \frac{a}{A}$) e

n → número de intervalo de ciclo de onda de tensão no martelo $\left(\frac{l}{L}\right) \geq n > \left(\frac{l}{L} - 1\right)$

E a partir da energia do martelo imediatamente antes do impacto, apresenta a expressão matemática da eficiência teórica de energia transferida as hastes (η).

$$E_C = \frac{MV^2}{2}$$

$$\eta_{FAIRHURST} = (1 - K^n) + \left(\frac{l}{L} - n\right) \cdot \frac{4rK^{2(n+1)}}{1+r} \quad (2.52)$$

2.3.6 – Equação teórica da energia e da eficiência apresentada por Palacios (1977) e Schmertmann & Palacios (1979)

Palacios (1977) e Schmertmann & Palacios (1979) baseado nos estudos de Fairhurst (1961) aplicou os mesmos conceitos propostos por ele ao SPT, ou seja, a queda de um martelo do SPT sobre a composição de hastes apresentando as seguintes expressões matemáticas para previsão da energia e eficiência teórica transferida as hastes:

$$E_{it} = 2a\rho LV_0^2 \left[\left(\frac{1-K^n}{4r}\right) + \left(\frac{l}{L} - n\right) \left(\frac{K^n}{(1+r)^2}\right) \right] \quad (2.53)$$

E considerando a energia cinética do martelo $E_C = \frac{MV^2}{2}$, tem-se que:

$$\eta_{SCHMERTMANN / PALACIOS} = (1 - K^n) + \left(\frac{ct}{2L} - n\right) \frac{4rK^n}{(1+r)^2} \quad (2.54)$$

sendo $K = [(1-r)/(1+r)]^2$.

2.3.7 – Energia de uma onda longitudinal de tensão nas hastes – Medição

2.3.7.1 – Mecanismo de transferência de energia para as hastes no ensaio SPT

O mecanismo de transferência de energia inicia-se logo após o impacto de um martelo atuando sobre uma composição de hastes. A partir daí se forma uma onda longitudinal de tensão que se propaga tanto para baixo quanto para cima no próprio martelo, através de impulsos consecutivos. A intensidade e a forma desta onda longitudinal dependerão dos seguintes fatores: velocidade do martelo no instante do impacto, das perdas durante o impacto, do comprimento da composição de hastes e da relação de impedância do martelo e das hastes.

A ilustração da Figura 2.14 apresenta, de forma esquemática, para um melhor entendimento da seqüência do mecanismo de transferência, propagação, reflexão e absorção de uma onda longitudinal de compressão em hastes do SPT, sendo, neste caso, de tração a onda refletida a partir do amostrador.

Essa representação gráfica foi apresentada pela primeira vez por Palacios (1977) e Schmertmann & Palacios (1979). Os autores instrumentaram a composição de hastes colocando uma célula elétrica de carga junto à cabeça de bater (CC1) e outra próxima da cabeça do amostrador (CC2).

A partir da realização do impacto do martelo sobre a cabeça de bater, uma onda de tensão propaga-se no sentido descendente da composição de hastes até o tempo $t = l/c$, sendo

l o comprimento da composição e c a velocidade de propagação dos impulsos de tensão nas hastes. No tempo $t = l/c$, a célula de carga CC2 faz o registro da passagem do pulso que atinge o amostrador, conforme a Figura 2.14b.

A Figura 2.14c mostra que no tempo $t = l/c$, inicia-se a penetração do amostrador no solo, e da energia transmitida, parte é consumida através da penetração do amostrador e parte é refletida na forma de onda de tração, uma vez que a situação de contorno no contato amostrador-solo não corresponde nem à condição de extremidade totalmente engastada, nem à condição de extremidade livre.

Schmertmann & Palacios (1979) admitem que a partir do segundo ciclo, as reflexões ocorrem muito tardiamente e não influem na penetração do amostrador. Naturalmente, com base na teoria precedente, não é difícil concluir que as reflexões serão tão mais acentuadas quanto mais baixa for a resistência do solo, ou seja, exageradamente a condição de extremidade livre estaria sendo uma presumível condição de contorno para o amostrador. Hanskat (1978) mostrou, através de estudos envolvendo a equação da onda, que a parcela de energia gerada pelo novo pulso de compressão refletido representa em torno de 4% da energia nominal de queda livre.

Durante o tempo $l/c < t < 2l/c$, conforme mostrado nas Figuras 2.14d e 2.14e, nota-se que a onda de tração refletida percorre o sentido ascendente da composição até atingir o topo. Em seguida, no tempo $t = 2l/c$, há a separação instantânea do martelo das hastes e a onda de tração reflete-se na forma de uma nova onda de compressão descendente que volta a atingir o amostrador, pois a extremidade no topo da haste está na condição de extremidade livre. Esse processo repete-se até que a energia ou a força de compressão que atinge o amostrador seja insuficiente para superar a resistência do solo.

Segundo Schmertmann & Palacios (1979), a partir do segundo ciclo, onde ocorre a perda de contato e momentaneamente cessa a transferência de energia, pode surgir um novo impacto do martelo com as hastes, porém, ocorre muito tardiamente e devido a sua pequena magnitude não influi na penetração do amostrador.

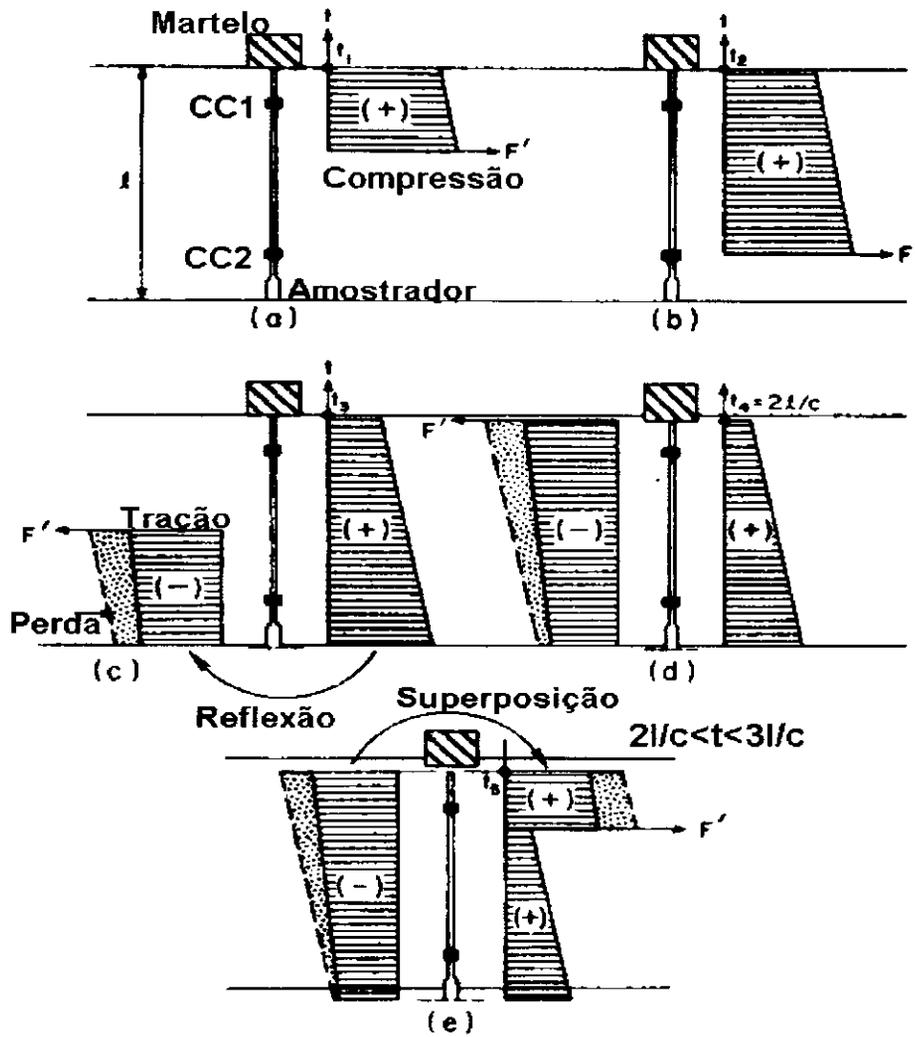


Figura 2.14 – Mecanismo esquemático da propagação de ondas de tensão no SPT (Palacios, 1977 e Schmertmann & Palacios, 1979).

Hanskat (1978), apud Cavalcante (1999), deduziu que a parcela de energia que é gerada pelo novo pulso de compressão refletido representa em torno de 4% da energia nominal de queda livre, a partir de estudos envolvendo a equação da onda.

No tempo $2l/c$, ocorre a interrupção da transferência de energia da primeira onda de compressão incidente. Nesse momento, o martelo instantaneamente separa-se da composição de hastes. É interessante ressaltar que a eficiência da energia dinâmica transferida à composição na primeira onda de compressão incidente cresce com o comprimento da composição passando pela origem, segundo a expressão teórica.

No entanto, constata-se nos dados experimentais de Palacios (1977), Schmertmann & Palacios (1979), Belincanta (1985; 1998) e Décourt (1989) que a curva de eficiência medida versus comprimento, na verdade não passa pela origem, conforme se mostra na Figura 2.15.

Belincanta (1998) resalta os motivos que levam à curva eficiência versus comprimento não passar na origem, como sendo:

- ✓ uso do coxim de madeira e da cabeça de bater na seção de contato;
- ✓ ocorrência de pulsos de tensões refletidos anteriormente à chegada das reflexões provindas da região do amostrador;
- ✓ lapso de tempo entre o instante do impacto e a ocorrência da força seccional máxima;
- ✓ imperfeições no impacto.

Segundo Belincanta (1998), partindo de uma eficiência de energia medida e calculada num comprimento de composição menor, qualquer estimativa de energia transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, para um determinado comprimento l' maior, será grosseira se baseada em valores de eficiência teórica.

Palacios (1977) analisou em particular a questão do tipo de hastes (massa/metro) e sua combinação com determinado tipo de martelo na eficiência de energia da primeira onda de compressão incidente transferida às hastes. Foram utilizadas quatro combinações de martelo-hastes, a saber:

- ✓ hastes tipo “A” (5,6 kgf/m) com martelo “S” (safety);
- ✓ haste “AW” (6,5 kgf/m) com martelo “S”;
- ✓ haste “AW” com martelo “B” (martelo do tipo donut fabricado pela SPRAGHE & HENWOOD);
- ✓ haste “N” (7,2 kgf/m) com martelo tipo “F” (martelo automático da Florida Testing).

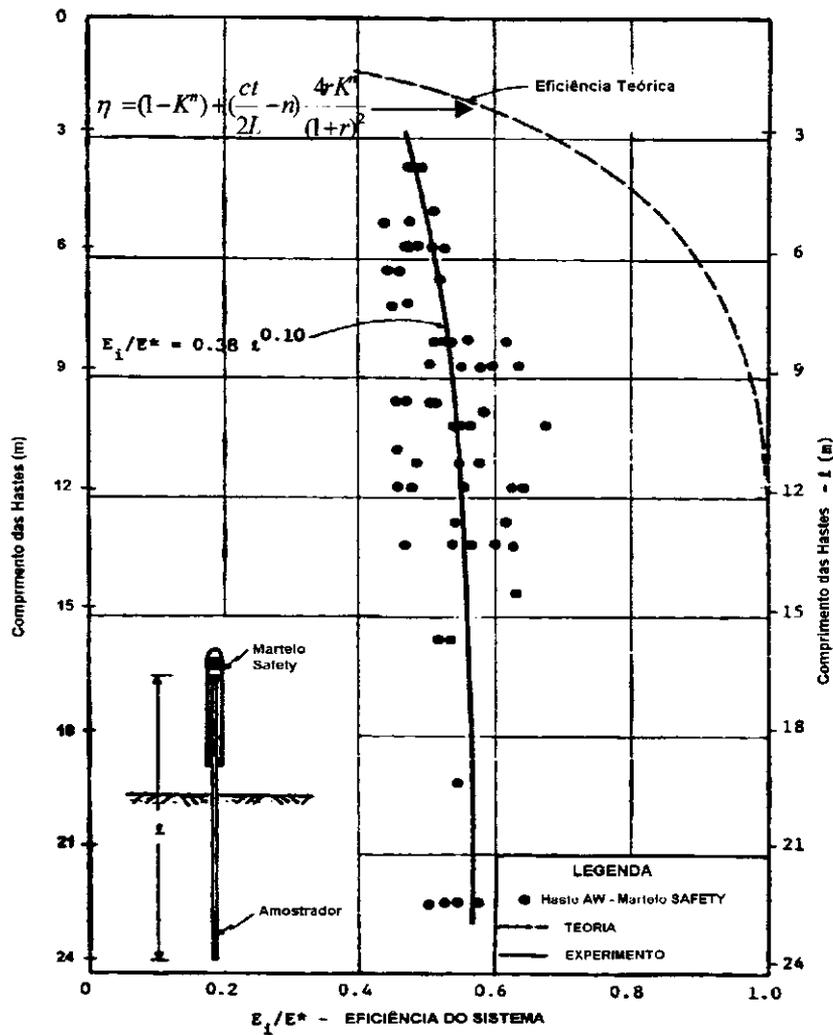


Figura 2.15 – Variação da eficiência dinâmica transferida às hastes com o comprimento da composição (Palacios, 1977).

Os resultados são apresentados na Figura 2.16, onde se mostra que o sistema que combina a haste do tipo “AW” com o martelo “S” é o mais eficiente. Fazendo-se o confronto direto das combinações que usam o martelo “S”, nota-se que existe uma transferência maior de energia dinâmica na composição que usa haste do tipo mais pesado, sendo portanto mais eficiente. Observa-se que a combinação da haste tipo “N” (mais pesada) com o martelo “F” apresentou-se como a menos eficiente. Entretanto, isto se deve ao fato da utilização desse tipo de martelo com cabeça de bater de grande massa, o que já evidencia por si só uma fonte de perda de energia provocada por reflexões.

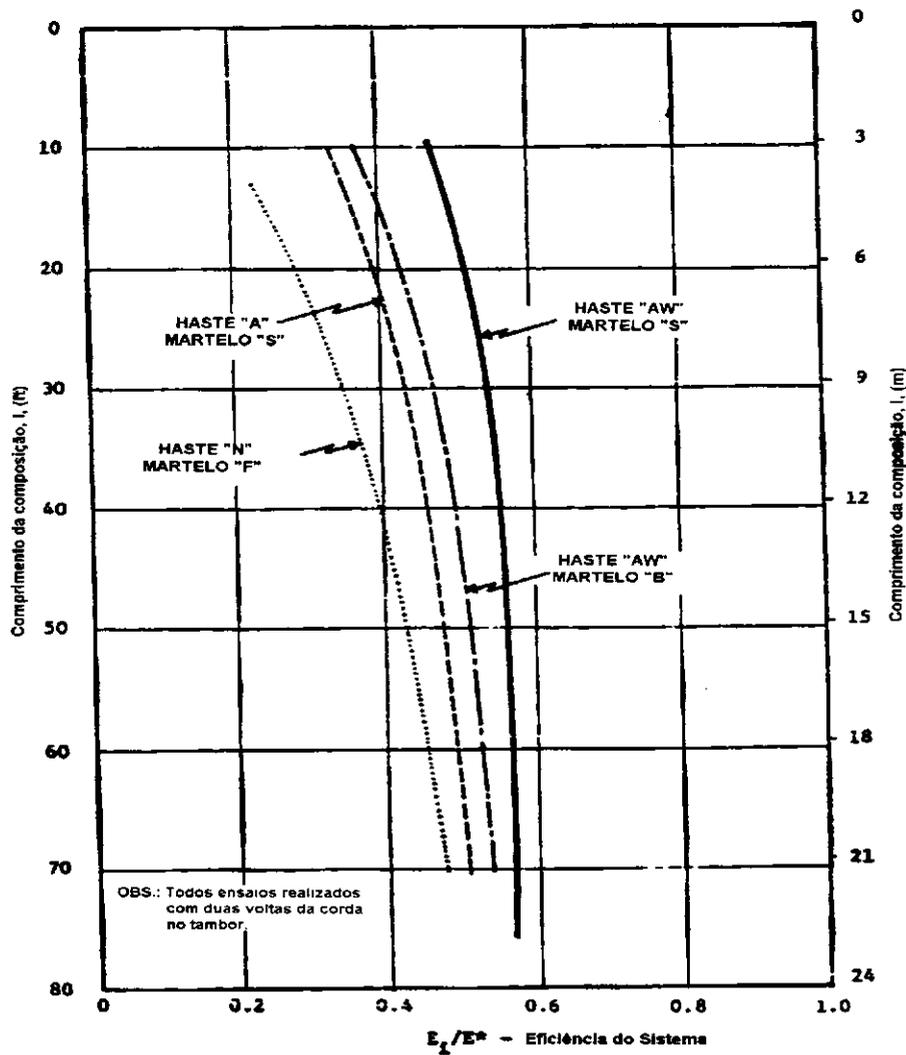


Figura 2.16 – Variação da eficiência de energia dinâmica transferida às hastes em função do comprimento da composição e da combinação martelo – haste (Palacios, 1977).

Conclui-se, portanto, que a eficiência dinâmica medida, ao contrário da fórmula teórica, não passa pela origem, segundo experiências de Schmertmann & Palacios (1979) e Belincanta (1985; 1998).

Na Figura 2.17 apresenta-se um registro típico de uma onda longitudinal de tensão versus tempo, obtido através de uma célula elétrica de carga instalada na extremidade superior de uma composição de hastes.

Nessa ilustração, observa-se que a força de compressão começa a sensibilizar a célula de carga a partir do ponto A. Entretanto, o valor máximo atingido é registrado no ponto B.

Em seguida, acontece um decréscimo ao longo do tempo na intensidade da força compressiva até o ponto C, a partir do qual registra-se o início das primeiras reflexões que provêm do amostrador. Os pontos D e F correspondem à superposição de impulsos de três ondas de tensões, sendo uma de compressão incidente, outra devido à reflexão da cabeça do amostrador e a terceira de reflexão próxima do amostrador. No intervalo de tempo correspondente aos pontos D e F ocorre a perda de contato entre o martelo e a cabeça de bater.

A energia contida num pulso de compressão se compõe de duas parcelas: uma de deformação e a outra cinética, oriundas da compressão do elemento e da velocidade das partículas, respectivamente (Fairhurst, 1961; Palacios, 1977).

A diferença entre a energia devida à força de compressão e a energia devida à força de tração refletida, constitui-se na perda de energia para penetração do amostrador no primeiro pulso de tensão (Palacios, 1977).

A norma D4633-86 da ASTM adota como tempo de término da primeira onda de compressão incidente aquele correspondente ao ponto E.

Palacios (1977), para determinação da energia líquida de compressão incidente, fez uso tanto da força de compressão incidente quanto da força refletida.

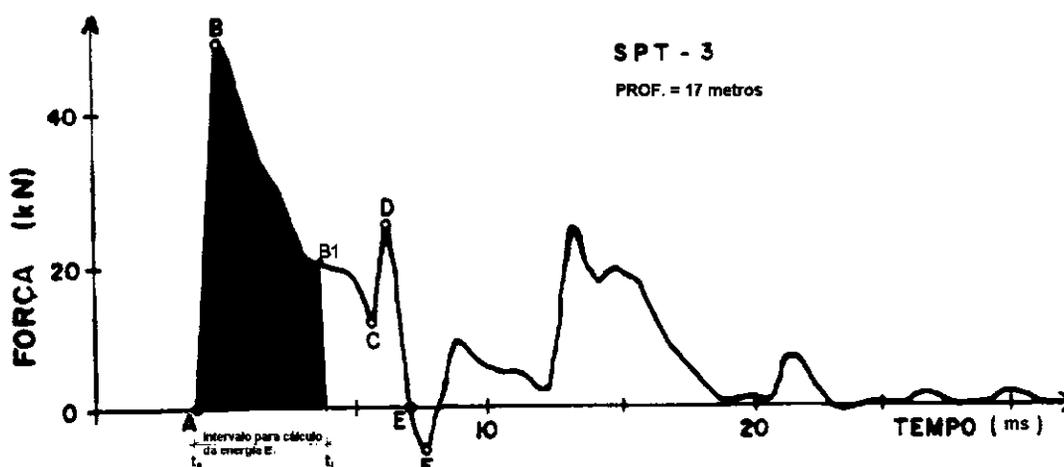


Figura 2.17 - Registro típico de força em função do tempo, com ilustração do intervalo de tempo adotado por Belincanta (1985;1998), para cálculo da energia incidente numa composição de comprimento l.

Segundo Morgano & Liang (1992) a transferência de energia em uma composição de hastes pode ser estudada através dos teoremas de trabalho-energia. Adotando algumas hipóteses simplificadoras tais como: material elástico linear, seção transversal uniforme e propagação dimensional da onda. Por definição, um incremento de trabalho é realizado quando uma força variável “F” em função do tempo “t” age provocando um deslocamento $\Delta\delta$, ou seja,

$$W = F(t).\Delta\delta \quad (2.55)$$

ou

$$W = F(t).v(t)\Delta t \quad (2.56)$$

onde $v(t)$ é a velocidade das partículas.

Portanto, a energia transferida do início ($t_1 = 0$) até um tempo (t_2) pode ser escrita como sendo:

$$W = E_t = \int_{t_1=0}^{t_2} F(t).v(t)dt \quad (2.57)$$

Palacios (1977) e Schertmann & Palacios (1979) não conseguindo medir os registros de velocidade por não dispor de tecnologia adequada, por conta dos acelerômetros da época não fornecerem registros confiáveis, calcularam a energia apenas com os registros de força, ou seja, relacionando a força com a velocidade através de um fator de proporcionalidade chamado impedância (Z):

$$Z = \frac{Ea}{c} \longrightarrow F = V.Z \longrightarrow V = \frac{F}{Z} = \frac{FEa}{c}$$

Substituindo-se na Equação 2.57, obtém-se:

$$W = E_{it} = \frac{c}{aE} \int_{t_1=0}^{t_2} F^2 dt \quad (2.58)$$

Belincanta (1985) para determinar experimentalmente a energia transferida às hastes do SPT, instrumentou a composição de hastes através de uma combinação de células de carga e

acelerômetros junto à extremidade superior da composição, obtendo registros de força e de velocidade.

2.3.8 - Determinação da energia incidente na composição de hastes do SPT

Existem três metodologias correntes para se determinar a energia dinâmica contida na primeira onda longitudinal de tensão:

- a) através do registro da força seccional em função do tempo, obtidos por célula elétrica de carga instalada na extremidade superior da composição;
- b) através do registro da força e da velocidade de partículas em função do tempo, obtidos por células elétricas de carga e acelerômetros instalados na extremidade superior da composição;
- c) através de registros de força e de velocidade de partículas em função do tempo, obtidos por duas células elétricas instaladas junto à extremidade superior da composição.

Em função dessas metodologias existem três expressões correntes para se determinar a energia dinâmica que é transferida às hastes, calculadas pelas expressões a seguir, em função da força seccional, ou a tensão, e a velocidade de partículas, e de propagação da onda, onde F e v representam a força e a velocidade de partículas em função do tempo, registradas na seção instrumentada. Os registros de força são obtidos através da instalação de medidores de deformação, denominados de “strain-gauges”, já para aquisição dos registros de velocidade são instalados acelerômetros numa determinada seção da haste.

$$EFV = E_t = \int_0^t Fv dt \quad (2.59)$$

$$EV2 = E_t = \frac{aE}{c} \int_0^t v^2 dt \quad (2.60)$$

$$EF2 = E_t = \frac{c}{aE} \int_0^t F^2 dt \quad (2.61)$$

Utilizam-se as Equações 2.59 e 2.60 havendo disponibilidade do registro de velocidade em função do tempo em seção instrumentada.

O método EFV, é também chamado de EMX (energia máxima transferida às hastes), por integrar os registros de força e de velocidade até o valor máximo de energia. Esse método tem conduzido a resultados mais acurados, conforme demonstrado por Belincanta (1985) e Abou-Matar & Goble (1997) e Cavalcante (2002), devido aos resultados obtidos não serem afetados por possíveis perdas de proporcionalidade entre a força e a velocidade. No entanto, depende da sensibilidade, bem como estabilidade dos acelerômetros instalados.

Alguns autores concordam favoravelmente com esta metodologia, a exemplo de Goble & Abou-Matar (1992), Abou-Matar & Goble (1997), Farrar (1998) e Butler et al. (1998), entre outros.

Com frequência tem sido usada a Equação 2.61 chamado “método F²” ou EF2, para obtenção do cálculo da energia transferida às hastes.

O cálculo da energia pelo método EF2, conforme recomendações da norma ASTM D4633 (1986), considera o registro da força elevada ao quadrado em função do tempo, até a força cessar pela primeira vez. Todavia, este método só é válido, quando o índice RAT representa a relação entre o tempo correspondente ao “cutoff” do registro de força (tempo de força zero pela primeira vez a partir do instante do impacto) e o tempo correspondente a $t = 2l/c$ situa-se entre $0,9 \times 2l/c$ e $1,2 \times 2l/c$ (ASTM D4633/86).

Outro método que vem sendo utilizado no caso da onda cessar muito além do tempo $t = 2l/c$, ou seja valores de RAT (índice percentual) acima de $1,2 \times 2l/c$, é o método E2F, que é calculado com o mesmo registro de força ao quadrado (como no método EF2), porém só até o tempo $t = 2l/c$ (Likins, 2000, citado por Cavalcante, 2002).

$$E2F = E_{it} = \frac{c}{aE} \int_0^{2l/c} F^2 dt \quad (2.62)$$

Schmertmann & Palacios (1979) evidenciaram que a resistência do solo não influencia a energia (ENTHRU) transferida às hastes. No entanto, outros estudos têm mostrado que pode haver alguma influência de N_{SPT} em E_i (Morgano & Liang, 1992).

Mantendo a proporcionalidade entre a força e a velocidade, essa metodologia apresenta resultados corretos. No entanto, segundo Abou-Matar & Goble (1997), o registro de força obtido no topo da composição pode ser desproporcional à velocidade naquele ponto devido às reflexões que ocorrem ao longo da composição. Assim, a energia medida segundo a metodologia F^2 estará incorreta. Ressalta-se ainda que não se pode fazer uma avaliação segura da qualidade dos registros de força obtidos, se apenas ele for efetuado. Pois assim, a proporcionalidade existente com a velocidade não foi verificada, mas simplesmente admitida.

Segundo Butler et al. (1998), a Equação 2.62 é, de fato, uma simplificação da Equação 2.59, e Schmertmann & Palacios (1979) usaram a relação de proporcionalidade entre força e velocidade com o intuito de superar as dificuldades encontradas na medição da velocidade com os transdutores então disponíveis, durante as primeiras medidas de energia dinâmica transferida às hastes.

Uma metodologia recente foi empregada com sucesso por Matsumoto et al. (1992), chamada de “Two Point Strain Measurement”. Ela consiste na obtenção de dados através da instalação de dois transdutores de deformação próximos da extremidade superior da composição. Com isso, pode-se também fazer registros de força e de velocidade de partículas nas seções instrumentadas.

Utilizando o equipamento importado do tipo PDA (Pile Driving Analyzer), SPT brasileiro e instrumentação, conforme a mostrado na Figura 2.18, Belincanta (1985) fez registros de força e de velocidade em função do tempo (ver Figuras 2.19a e 2.19b). Nas figuras evidenciam-se reflexões oriundas do amostrador e a decorrente da geração de novos pulsos de compressão após a primeira onda de compressão ($t=2l/c$).

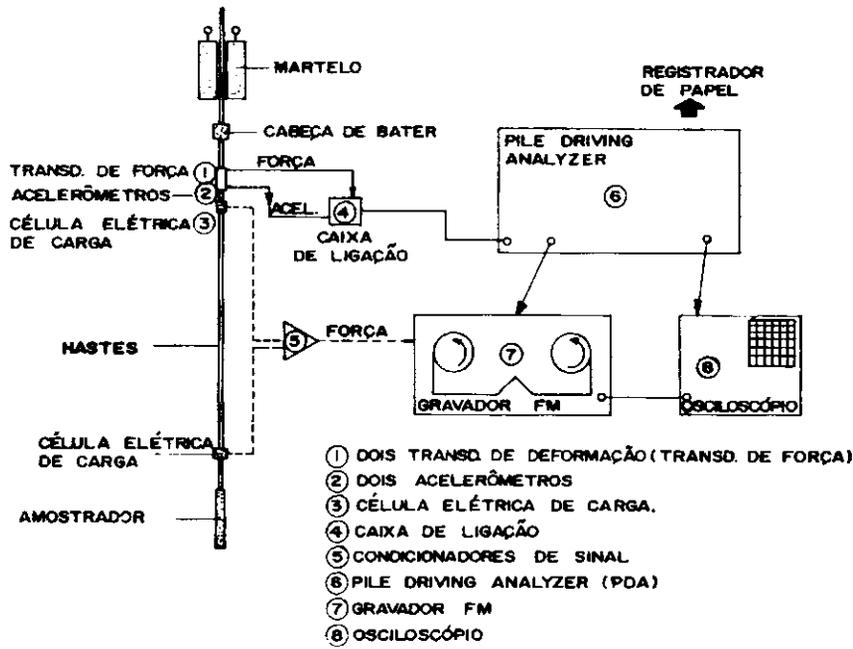


Figura 2.18 – Ilustração do layout da instrumentação usada por Belincanta (1985).

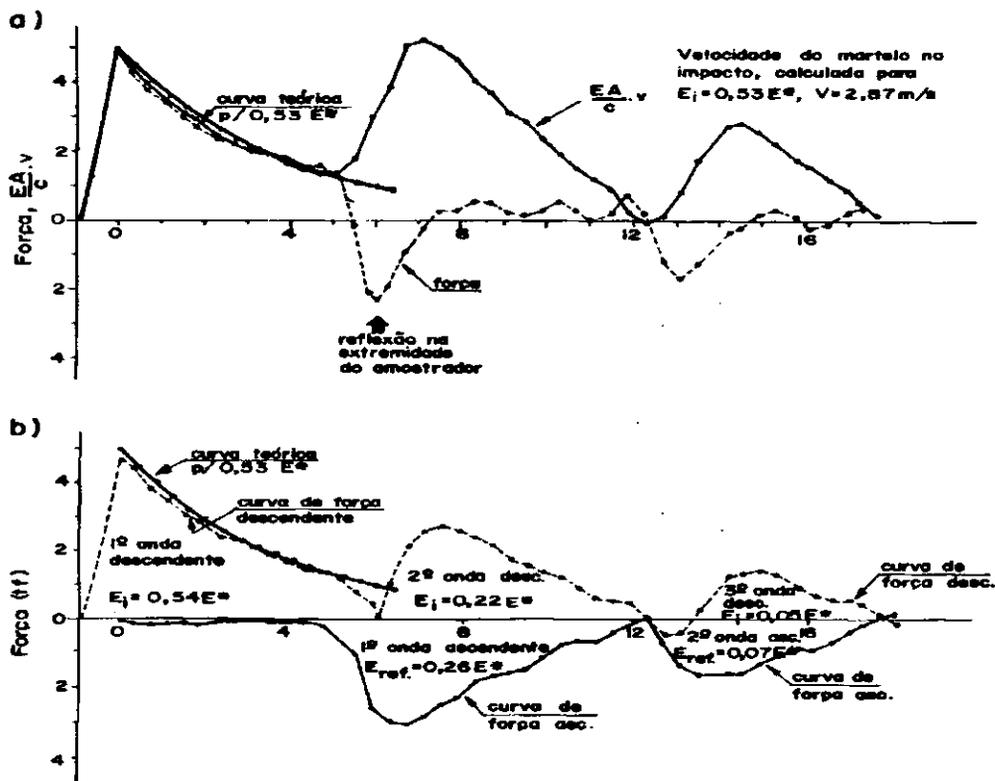


Figura 2.19 – Curvas de força e velocidade em função do tempo obtidas a partir dos registros do PDA e os valores de energia transmitida para hastes (Belincanta, 1985).

Segundo Belincanta (1985), essas curvas de força e de velocidade em função do tempo foram obtidas a partir da digitalização dos registros obtidos com PDA. As medidas foram feitas em hastes com 25,4 mm de diâmetro interno (NBR 6484/80), instrumentadas com células elétricas de carga e acelerômetros piezoelétricos.

Palacios (1977) também mostra registros de força em função do tempo feitos em equipamentos americanos com células elétricas de carga instaladas próxima da extremidade superior da composição de hastes e próxima da cabeça do amostrador. Um exemplo é mostrado na Figura 2.20.

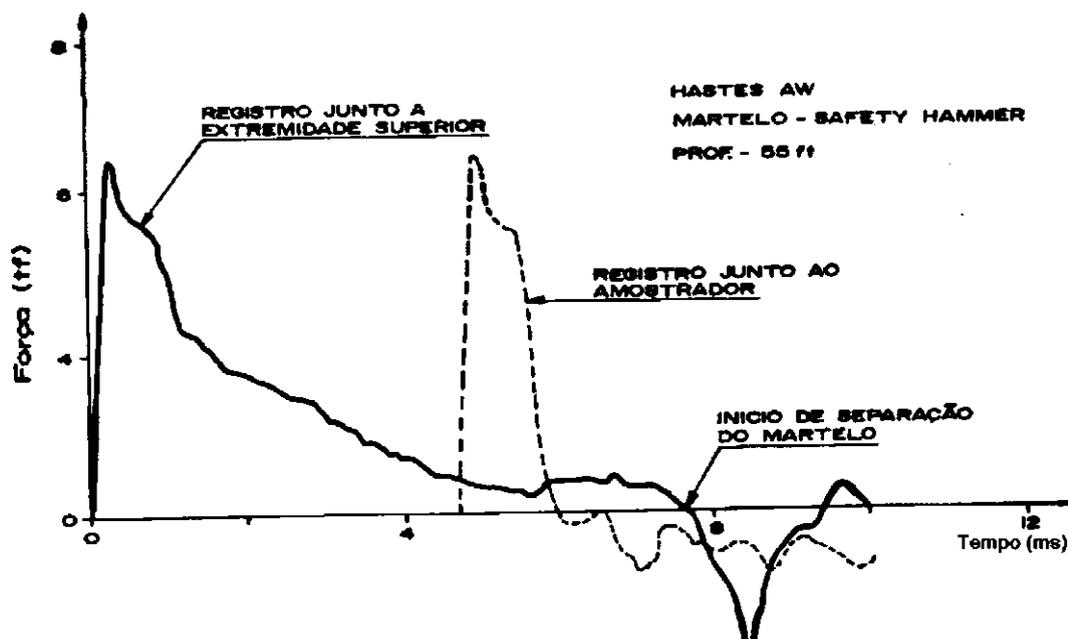


Figura 2.20 – Registro de força em função do tempo obtido com equipamento e instrumentação usados nos Estados Unidos (Palacios, 1977).

Butler et al. (1998) apresentaram um estudo feito pelo próprio Butler (1997) objetivando uma comparação entre os métodos F^2 , F_v e $F_{v\text{corrigido}}$, no cálculo da energia dinâmica transferida às hastes. As Equações 2.56 e 2.57 representam os dois primeiros métodos e o método $F_{v\text{corrigido}}$ corresponde ao método F_v , onde se corrige a energia por um fator k_2 , sugerido pela Norma ASTM D4633 (1986), com o intuito de levar em consideração o comprimento e o tipo da composição de hastes. Por exemplo, para a composição de hastes do tipo AW, o fator k_2 é igual a 1,00, quando o $l \geq 13,9$ metros, enquanto que para as hastes NW, k_2 assumirá este valor quando $l \geq 7,4$ metros. Portanto, Butler et al. (1998) concluíram

que os métodos F_v e $F_{v_{\text{corrigido}}}$ deram resultados muito próximos, enquanto que o método F^2 apresentou valores de energia, em média, 10% maiores e tendo um maior desvio padrão, e ainda que, quanto maior a área da seção transversal da composição, mais energia será transmitida para um determinado golpe.

Concordando com as conclusões de Belincanta (1985), os autores Butler et al. (1988) afirmam que os valores de energia calculados pelo método F^2 são, em média, superiores aos calculados pelo método F_v . Entretanto, estes observaram vários casos onde ocorreu o inverso e, por isso, não recomendam a correção para o efeito do comprimento e do tipo das hastes na energia transmitida por um fator multiplicador k_2 , conforme recomenda a norma ASTM D4633/86 e o IRTP (1988).

Butler et al. (1998) fazem recomendações quanto à qualidade das medidas de energia, pois se o tempo correspondente à força zero após o impacto não estiver na faixa de $0,9(2l/c)$ a $1,2(2l/c)$, os valores da energia medidos pelo método F^2 não podem ser usados, bem como se a velocidade medida para o método F_v não estiver próxima de zero no final do registro; logo, ocorrendo um destes dois casos, o valor da energia medido não pode ser confiável.

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS E DAS CAMPANHAS DE ENSAIO

3.1 – Generalidades

No presente capítulo são apresentadas as informações relativas às campanhas de ensaio efetuadas para desenvolvimento desta dissertação. As campanhas foram realizadas de 13 a 15 de setembro de 2000 e de 25 a 26 de outubro do mesmo ano. Foram realizadas 5 sondagens com SPT e 44 medidas de torque (SPT-T), em terrenos situados na área metropolitana da cidade de João Pessoa-PB.

3.2 – Localização dos Furos de Sondagem

Foram realizadas sondagens em três localidades da cidade de João Pessoa, sendo executados no total 5 furos de sondagens para obtenção dos dados, dois no bairro de Mandacaru, dois no bairro do Bessa e um no bairro Renascer. As sondagens foram realizadas em parceria com a ATECEL (Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior). Na Figura 3.1 é apresentada, em destaque, o estado da Paraíba, com a localização da cidade de João Pessoa, onde foram executadas as sondagens.

Nas Figuras 3.2 a 3.3 são apresentadas as plantas de situação apenas dos bairros de Mandacaru e Bessa (terreno da ATECEL), pois não foi possível obter para os demais. Nas Figuras 3.4 a 3.7 são apresentados os croquis de locação dos furos de sondagens nos terrenos.

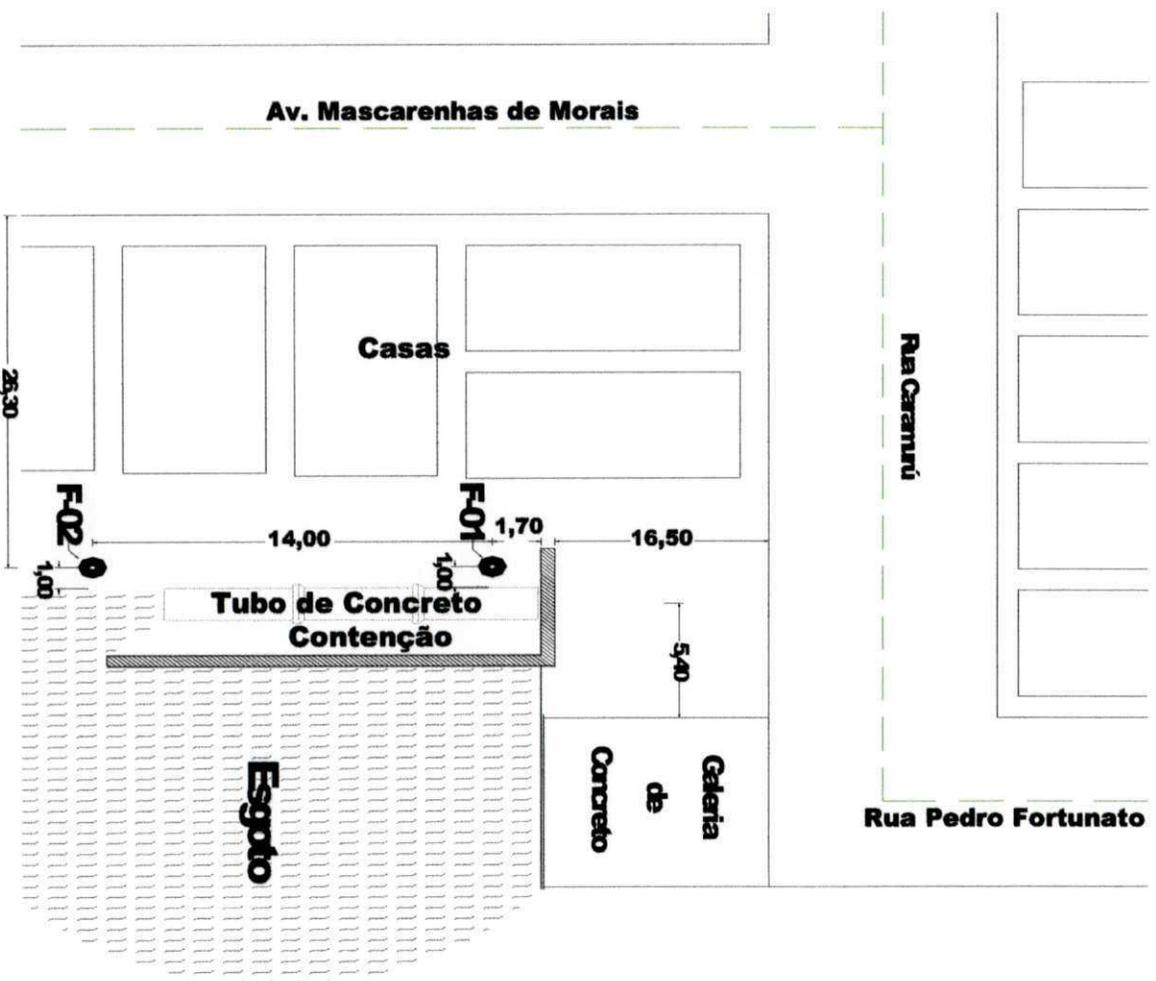


Figura 3.4 - Croqui de locação dos furos de sondagem efetuados no bairro de Mandacaru.

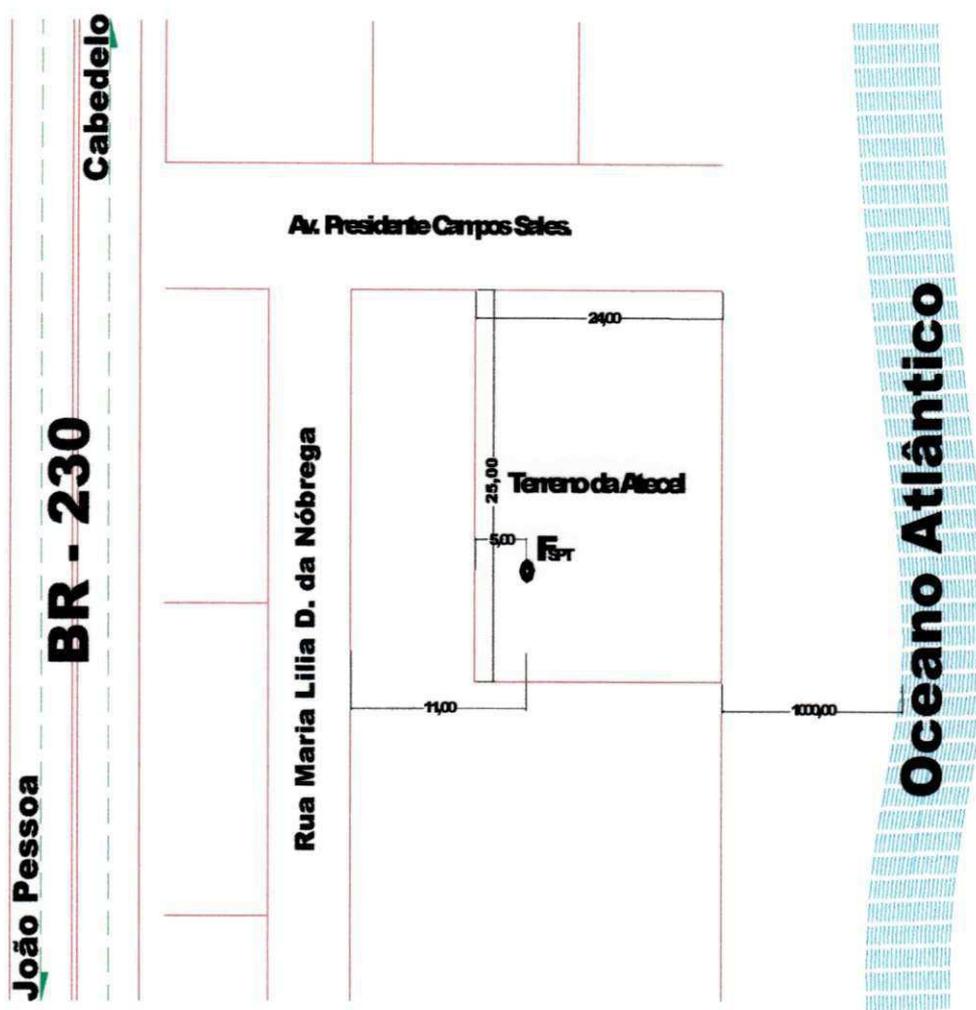


Figura 3.5 - Croqui de locação do furo de sondagem efetuado no bairro do Bessa, área experimental da ATECEL.

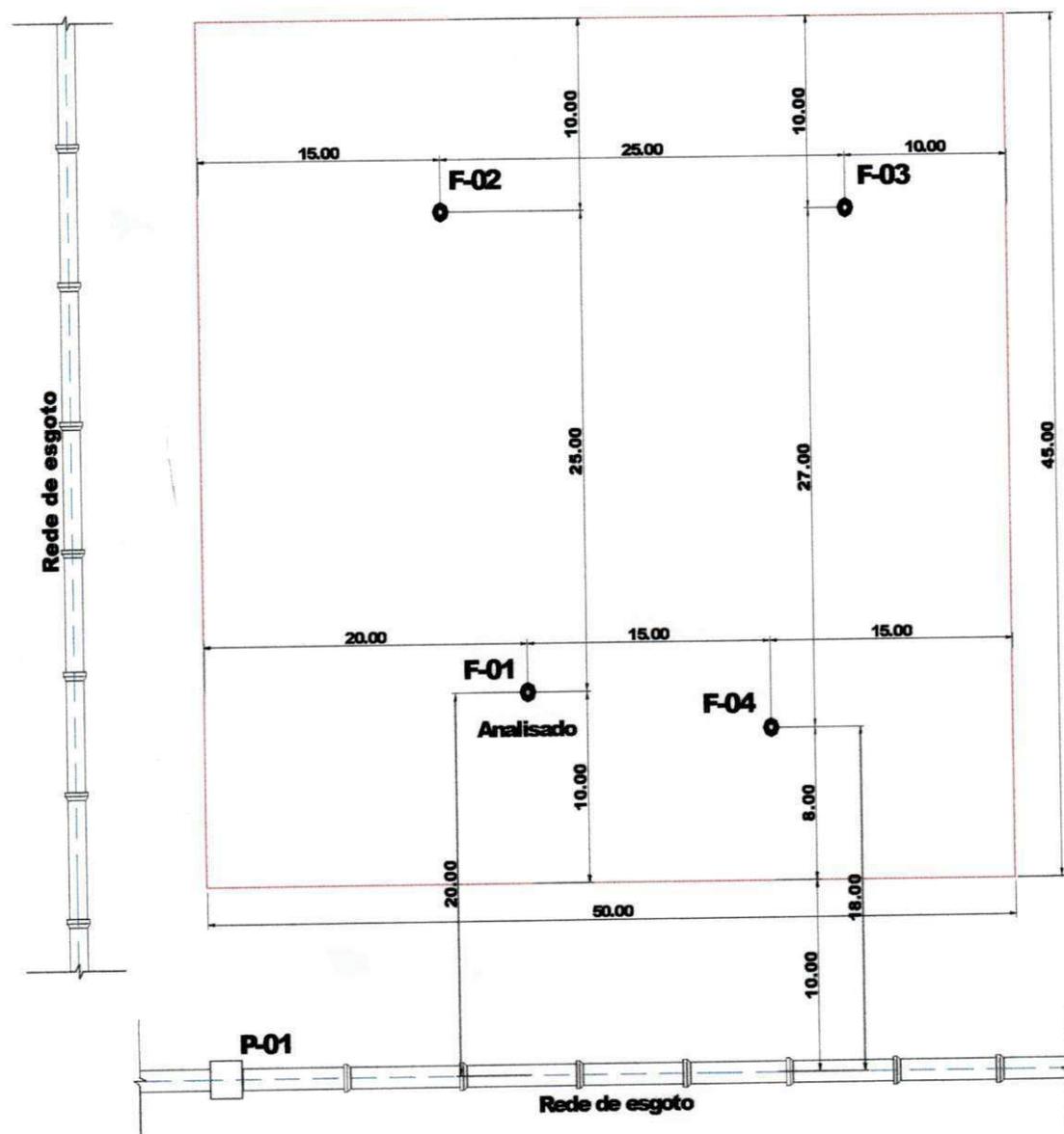


Figura 3.6 - Croqui de locação dos furos executados no bairro do Bessa, elevatória 15.

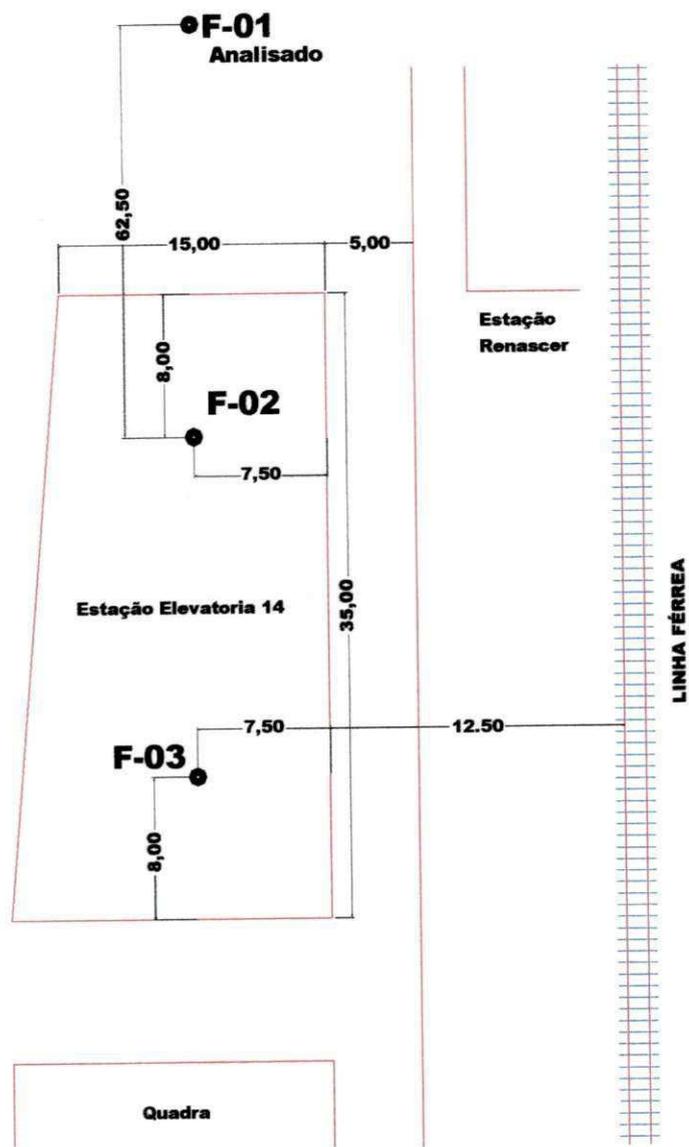


Figura 3.7 - Croqui de locação dos furos executados no bairro do Renascer, elevatória 14.

3.3 – Descrição da Aparelhagem Utilizada

A seguir são fornecidos detalhes da aparelhagem do SPT, do sistema de aquisição de dados (SPT ANALYZER) e do SPT-T utilizados.

3.3.1- SPT – Standard Penetration Test

A aparelhagem utilizada está de acordo com a descrita na NBR-6484 (2001), conforme mostrado na Figura 3.8.

As principais características de cada um dos componentes são detalhadas a seguir.

Tripé com roldanas, composto de três hastes metálicas de 5 metros de comprimento e 50 milímetros de diâmetro (ver Figura 3.8).

As hastes utilizadas tinham as seguintes características: peso por metro igual a 3,23kgf/m, área da seção transversal igual a 3,71cm², diâmetro externo e interno, respectivamente, $\phi_{ext}= 32\text{mm}$ e $\phi_{int}= 23,5\text{mm}$, com comprimentos individuais variando entre 1,99m e 2,02m, em regular estado de conservação (ver Figura 3.8).



Figura 3.8 – Foto da composição básica da aparelhagem do SPT utilizada nas campanhas de ensaio.

Martelo em bom estado de conservação, do tipo maciço, com 65kg de massa e altura com 28 cm e diâmetro igual a 20cm, dotado de coxim de madeira, operado manualmente com auxílio de roldana e tambor (ver Figura 3.9).



Figura 3.9 – Ilustração do tipo de martelo utilizado nas campanhas de ensaio realizadas pela equipe da ATECEL.

Na Figura 3.10 é apresentado o amostrador bi-partido utilizado nas campanhas de ensaio, de acordo com o recomendado pela norma NBR 6484 (2001). O amostrador estava em perfeito estado de conservação, medindo 78cm de comprimento total, e corpo com 56cm.

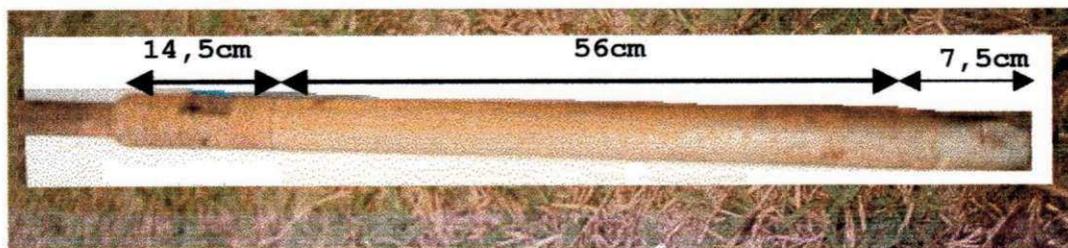


Figura 3.10 – Foto do amostrador bi-partido usado nas campanhas de ensaio.

Nas Figuras 3.10 e 3.11, observa-se a sapata cortante utilizada nas sondagens, medindo 7,5cm de comprimento e 5,08cm de diâmetro.



Figura 3.11 – Foto da sapata cortante usada nas campanhas de ensaio.

O sistema de acionamento e de soltura do martelo utilizado durante as sondagens foi o tipo misto, operado manualmente com corda de $\phi \cong 19\text{mm}$, sendo dadas duas voltas no tambor. Para a rotação do tambor foi usado um motor à gasolina (ver Figuras 3.8 e 3.12).

O tambor utilizado nas sondagens para auxiliar no levantamento do martelo está mostrado na Figura 3.12, com bom estado de conservação, com $\phi = 12,5\text{cm}$ e largura de 18cm.

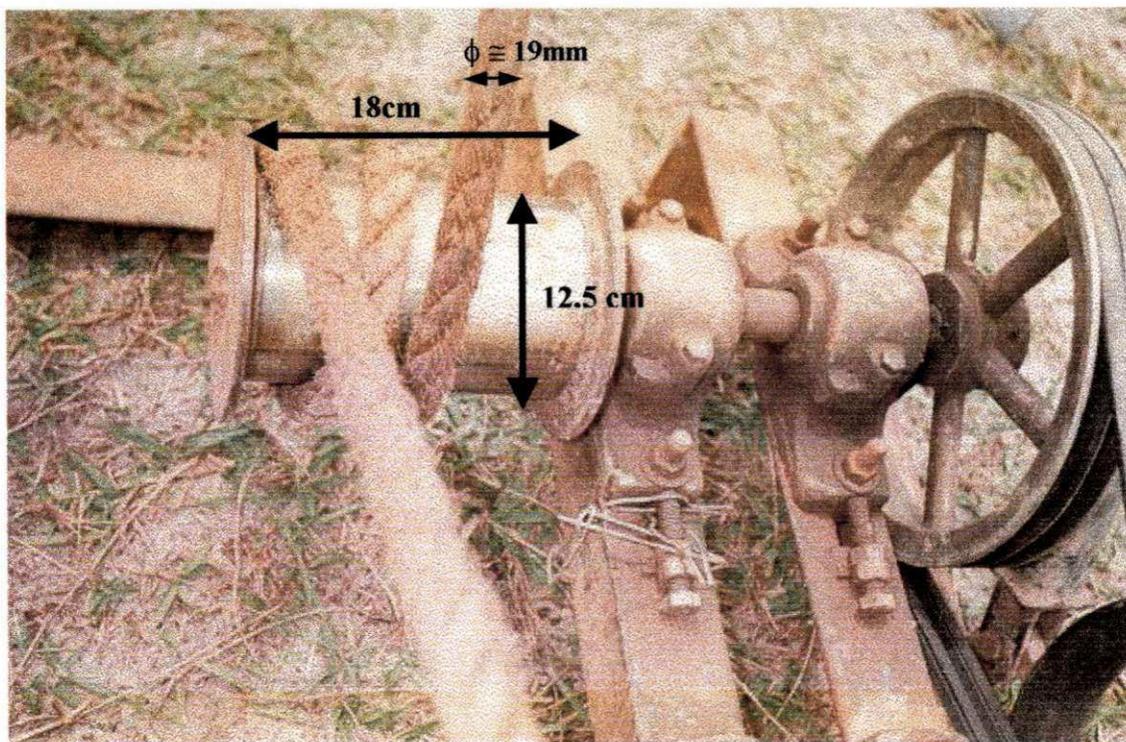


Figura 3.12 – Foto do tambor utilizado para levantamento e soltura do martelo.

A cabeça de bater utilizada nas sondagens está mostrada na Figura 3.13, a qual possui tamanho pequeno, com $\phi_{int.} = 24,7\text{mm}$, $\phi_{ext.} = 54,4\text{mm}$ e altura $h = 169\text{mm}$. Sua massa tem aproximadamente 1,0kg.



Figura 3.13 – Foto da cabeça de bater utilizada nas sondagens.

A lama utilizada para estabilização dos furos de sondagem (bentonita misturada à água) é procedente de Boa Vista, cidade vizinha a Campina Grande. Para retenção do material proveniente da escavação usou-se uma peneira, possibilitando sua identificação tátil-visual.

Além dos componentes relatados nos parágrafos anteriores, citam-se outros utilizados durante a pesquisa:

- bomba d'água centrífuga motorizada;
- metro de balcão e medidor de nível d'água;
- peso para sacar os tubos;
- trépano de lavagem constituído de aço, dotado de duas saídas laterais para saída da água terminado em bisel;
- trado espiral e trado concha;
- tambor com divisória interna para decantação, recipientes para amostras e ferramentas gerais necessárias à operação normal do equipamento.

3.3.2- Sistema de Aquisição de Dados do SPT - SPT ANALYZER

O SPT ANALYZER é um sistema de aquisição de dados portátil, prático e versátil para utilização em campo, cuja finalidade é monitorar a energia transferida às hastes. Esse sistema foi produzido pela empresa americana PILE DYNAMICS Inc. (PDI).

O SPT ANALYZER compõe-se basicamente de:

⇒ **HARDWARE**

- ✓ Unidade de aquisição de dados
- ✓ Cabos de conexão
- ✓ Segmentos de haste do SPT (medindo 1m)
- ✓ Acelerômetros piezoelétricos
- ✓ Medidores de deformação (strain gauges)

⇒ **SOFTWARE**

- ✓ Programa para aquisição automática e análise dos dados, SPT ANALYZER.

Na Figura 3.14 mostra-se o sistema de aquisição de dados empregado. Ele é leve, com massa igual a 3kg e medindo 205mm x 175mm x 115mm. Esse sistema é sensível ao toque na tela, podendo ser operado em ambientes com temperatura variando na faixa de 0°C a 40°C. Ele possui internamente um conversor A/D, é alimentado por uma bateria de 12V DC, a qual pode ser recarregada numa tomada de 100-250V AC. Caso não exista no local energia elétrica, ela poderá ser recarregada através de uma bateria veicular. O SPT ANALYZER é de propriedade da Área de Geotecnia do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ e foi adquirido pela Fundação Universitária José Bonifácio (FUJB) para a pesquisa de Cavalcante (2002).

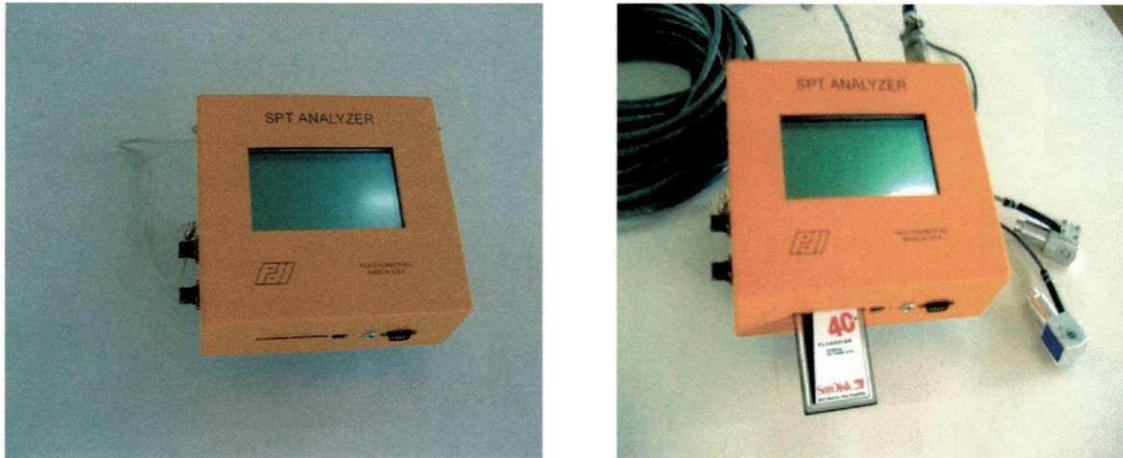


Figura 3.14 – Fotos do sistema de aquisição de dados (SPT ANALYZER) utilizado nas campanhas de ensaio.

Para obtenção do registro da velocidade de partículas da composição, são fixados à seção instrumentada, entre os dois “strain gauges” e espaçados 3cm, dois acelerômetros piezoelétricos, em posições diametralmente opostas. Esse registro de aceleração obtido é transformado pela unidade de aquisição em sinal de velocidade para ser usado no cálculo da energia transferida (ver Figura 3.15).

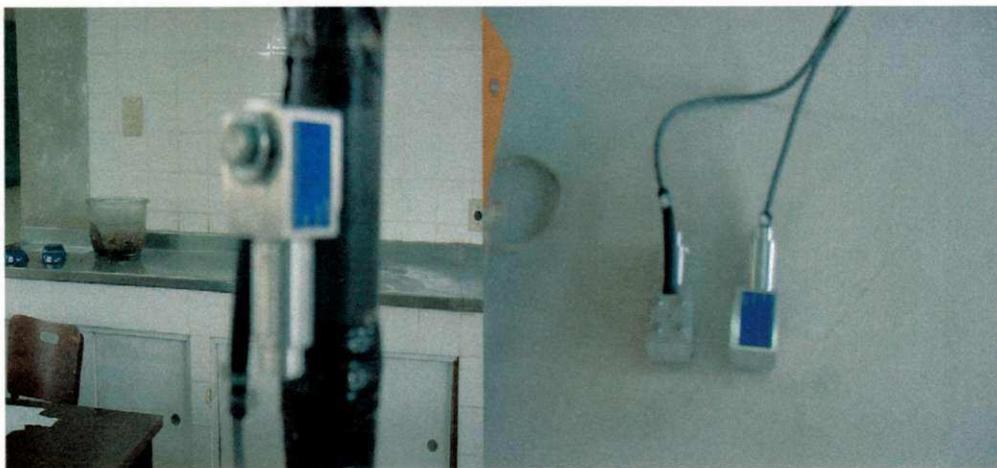


Figura 3.15 – Fotos dos acelerômetros utilizados na campanha dos ensaios.

Os “strain gauges” (medidores de deformação) são situados na haste a aproximadamente 30cm abaixo da superfície de impacto. Na Figura 3.16, pode-se observar a posição onde estes sensores foram instalados, próximos da cabeça de bater.

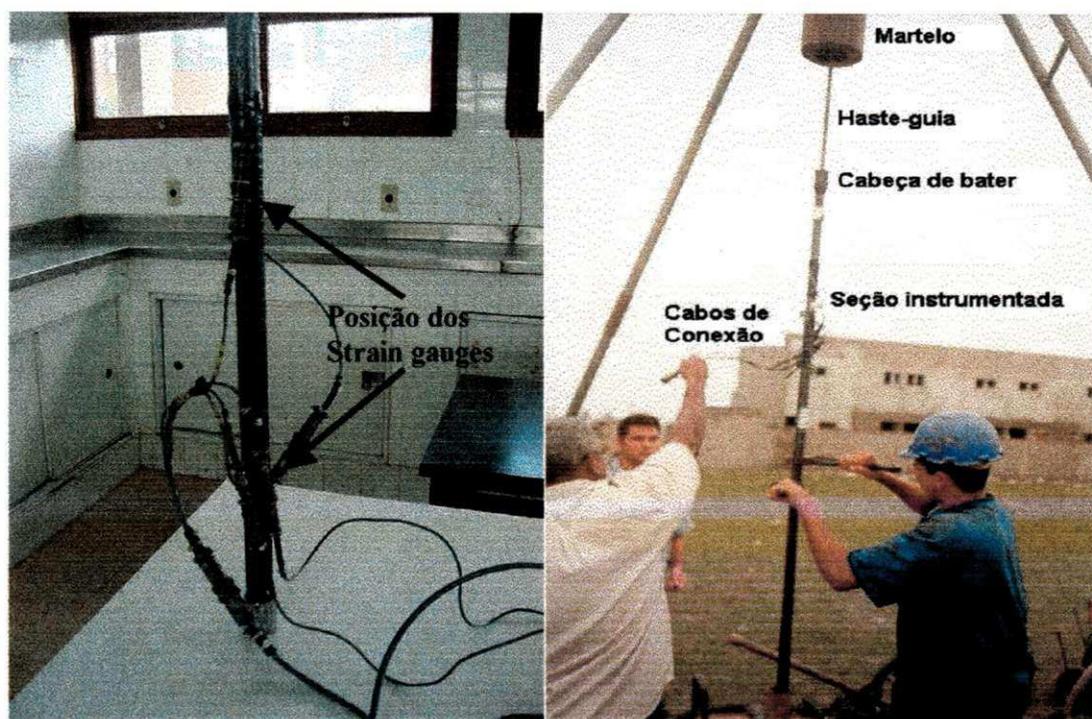


Figura 3.16 – Fotos da instrumentação do SPT ANALYZER utilizada nas campanhas de ensaio.

Os acelerômetros e “strain gauges” (sensores) foram devidamente calibrados por técnicos da PDI antes de serem utilizados nas hastes especificadas pela norma NBR 6484/2001. As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam as constantes de calibração de cada sensor usado e as principais propriedades dos segmentos de hastes utilizadas na calibração.

Tabela 3.1 – Constantes de calibração dos sensores usado na instrumentação.

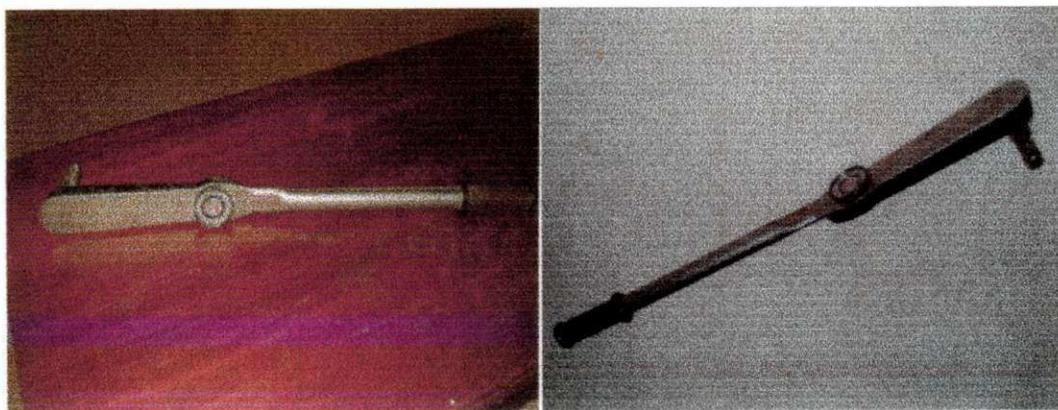
Acelerômetros		Strain Gauges		
Número de série	K (G/V)	Hastes	Ponte	me/V
52202	1048	65BR	1	221,04
52204	1053		2	223,38
52205	1054	66BR	1	218,15
52207	1048		2	216,81

Tabela 3.2 – Características dos segmentos de hastes utilizado nas calibrações.

Haste	Propriedades		
	Comprimento (m)	Área (cm ²)	Módulo de Elasticidade (MPa)
65BR	1	4,2	207000
66BR	1	4,4	207000

3.3.3 – SPT com Medida de Torque (SPT-T)

O torquímetro é a aparelhagem utilizada para aplicar e medir o torque, sendo acoplado ao topo da composição do SPT, conforme foi mostrado na Figura 2.2 e está mostrado na Figura 3.17 abaixo. O torquímetro utilizado no presente trabalho é do modelo 3219 da GEDORE e consiste em um braço de alavanca com um medidor de torque com escala máxima igual a 480N.m, tendo resolução de 20N.m. Depois de 45cm de penetração do amostrador no solo, a cabeça de bater é removida e acopla-se o disco centralizador e o pino adaptador (sistema de encaixe do tipo macho-fêmea) para possibilitar o travamento do torquímetro à haste de perfuração (ver Figura 3.18). A seguir, é instalado o torquímetro e medido o momento torsor máximo necessário à rotação do amostrador. Tal operação deve ser realizada de forma que o torquímetro seja girado com uma velocidade lenta e constante, até a obtenção da leitura máxima.

**Figura 3.17 - Fotos do torquímetro utilizado nas campanhas de ensaio.**

As medidas do torque foram realizadas a cada metro de profundidade, logo após a realização do SPT tradicional, instrumentado.

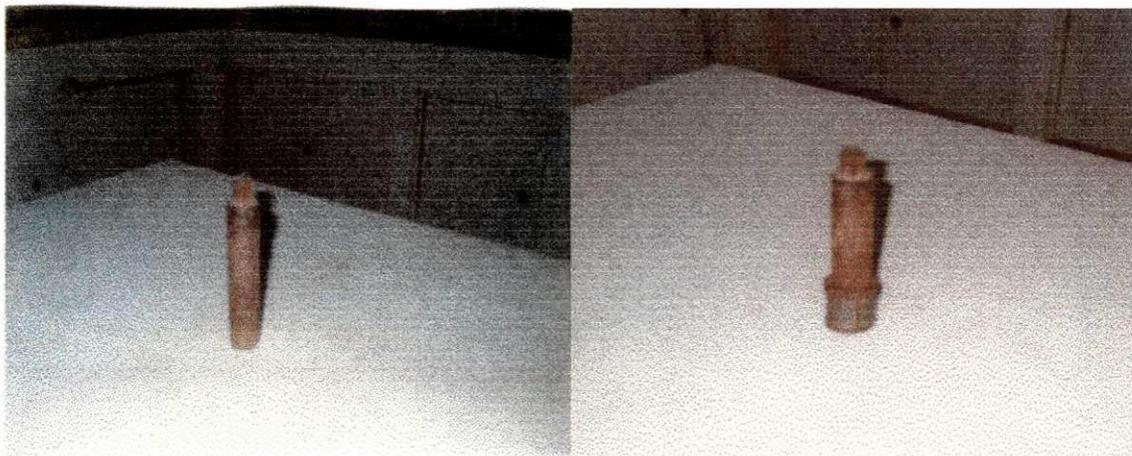


Figura 3.18 - Fotos do pino adaptador do torquímetro para aplicação do torque às hastes

3.4 – Descrição Geológica da Região

De acordo com os dados da SUDENE (Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste, 1978), o solo da Paraíba é composto de terrenos sedimentares. Estes sedimentos mesocenozoicos são compostos das formações Beberibe, Gramame e Maria Farinha, que formam a bacia sedimentar costeira denominada Pernambuco-Paraíba, além das extensas exposições terciárias, constituídas do grupo Barreiras, e Quaternárias, formadas por aluviões, dunas e sedimentos de praia, tais como recifes e mangues.

De uma maneira geral, a Tabela 3.3 resume a geologia da região de João Pessoa, onde foram feitas as campanhas de ensaios.

Tabela 3.3 – Coluna estratigráfica da região de João Pessoa (SUDENE, 1978).

PERÍODOS		ESTRATIGRAFIAS	LITOLOGIAS
HALOCENO		ALUVIÕES	AREIAS QUARTZOSAS ACIDENTADAS, INTERCALADAS COM ARGILAS
		TERRAÇO MARINHO HALOCÊNICO	AREIAS QUARTZOSAS BRANCAS, COM CONCHAS
		MANGUES	ARGILAS/SILTES CINZA-ESCURO, COM MATÉRIA ORGÂNICA
TERCIÁRIO	PLEISTOCENO	TERRAÇO MARINHO PLESTOCÊNICO	AREIAS QUARTZOSAS-BRANCAS COM MATÉRIA ORGÂNICA NA BASE
	PLIOCENO- PLEISTOCENO	FORMAÇÃO BARREIRAS	AREIAS FELDSPÁTICAS AVERMELHADAS INTERCALADAS A ARGILAS VARIEGADAS: AREIAS FELDSPÁTICAS AMARELADAS
CRETÁCICO	CRETÁCEO SUPERIOR	FORMAÇÃO GRAMAME	CALCARENITOS E CALCÁRIOS DOLOMÍTICOS CREME/ CINZA
		FORMAÇÃO BEBERIBE	AREIAS QUARTZOSAS CREMES A ESBRANQUIÇADAS E SILTITOS / ARGILITOS CINZA, FOSSILÍFEROS
	CRETÁCEO INFERIOR	FORMAÇÃO CABO	ARCÓSIOS CONGLOMERÁTICOS ESVERDEADOS INTERCALADOS A ARGILITOS VERDES / VERMELHOS
PRÉ-CAMBRIANO	PRÉ-CAMBRIANO (B)	EMBASAMENTO CRISTALINO	MICAXISTOS, FILITOS E QUARTIZITOS
	PRÉ-CAMBRIANO (CD)		GNAISSES E MIGMATITOS

3.4.1 – Características Geotécnicas dos Locais

Nas Figuras 3.19 a 3.23 são apresentadas as características geotécnicas dos terrenos onde se realizaram as campanhas de ensaios.

Observa-se, a partir dos perfis de sondagem que, em geral, os solos apresentaram-se bastante heterogêneos.

Morfologicamente, a cidade de João Pessoa tem duas paisagens muito distintas: os morros e as planícies. Enquanto a planície apresenta níveis de terraços marinhos pleistocênicos, nos morros ocupados pela cidade de João Pessoa a unidade mais importante é o grupo Barreiras, constituído de sedimentos variados, caracterizados por areias e argilas.

Nos dois furos executados no bairro de Mandacaru (Furo 01 e Furo 02), próximo ao rompimento de uma tubulação de esgotos, o solo apresentou uma formação do tipo Barreiras, constituído de sedimentos de granulometria variada, caracterizados por argilas de consistência variando de mole a dura.

No Furo 01 foi apresentado um índice de resistência constante nos primeiros metros ($N_{SPT}=2$). A partir dos 3m de profundidade, estes valores apresentaram-se com comportamento crescente até os 6m de profundidade, com valores de índice de resistência variando entre 3 e 23 golpes/30cm. Em seguida, observa-se um decréscimo acentuado até a cota de 7m ($N_{SPT}=15$); a partir daí os valores apresentam comportamentos crescentes variando entre 15 e 33 golpes/30cm.

No Furo 02, foram observados valores baixos e constantes, como no Furo 01, nos primeiros metros de profundidade ($N_{SPT}=1$). A partir da profundidade de 5m, estes valores apresentaram um comportamento crescente variando entre 1 e 36 golpes/30cm, até a cota de 7m; em seguida observa-se um comportamento acentuadamente decrescente até a profundidade de 10,45 ($N_{SPT}=23$), onde se deu a interrupção da sondagem.

No Furo 03, realizado no campo experimental da ATECEL, localizado no bairro do Bessa, pôde-se observar que o solo apresentou-se bastante estratificado, não muito resistente, constituído de camadas de areia fina a média (até em torno de 6m), com um comportamento crescente variando entre 2 e 18 golpes/30cm. As camadas mais profundas (a partir de 7m) apresentaram um silte arenoso de cor acinzentada. Isto decorre, provavelmente, de solos depositados por ação eólica, trazendo material da formação Barreiras. Isto explica a existência do material mais fino nas camadas profundas.

No Furo 04, realizado no bairro do Bessa, nas proximidades de um manguezal, o solo apresenta-se pouco resistente, com uma formação típica de terraços marinhos pleistocênicos arenosos, além de depósitos de mangues com ocorrência de turfa. A sondagem foi interrompida aos 14,45m de profundidade, apresentando valores de índice de resistência à penetração variando entre 2 e 16 golpes/30cm.

No bairro Renascer (Furo 05), observa-se que o solo apresenta uma formação do tipo Barreiras, constituído apenas de composição arenosa, variando de fina a grossa, e de pouco

compacta a compacta, mostrando um aumento de resistência gradativa a partir dos 6m indo até os 10,45m de profundidade, onde o N_{SPT} medido foi igual a 59.

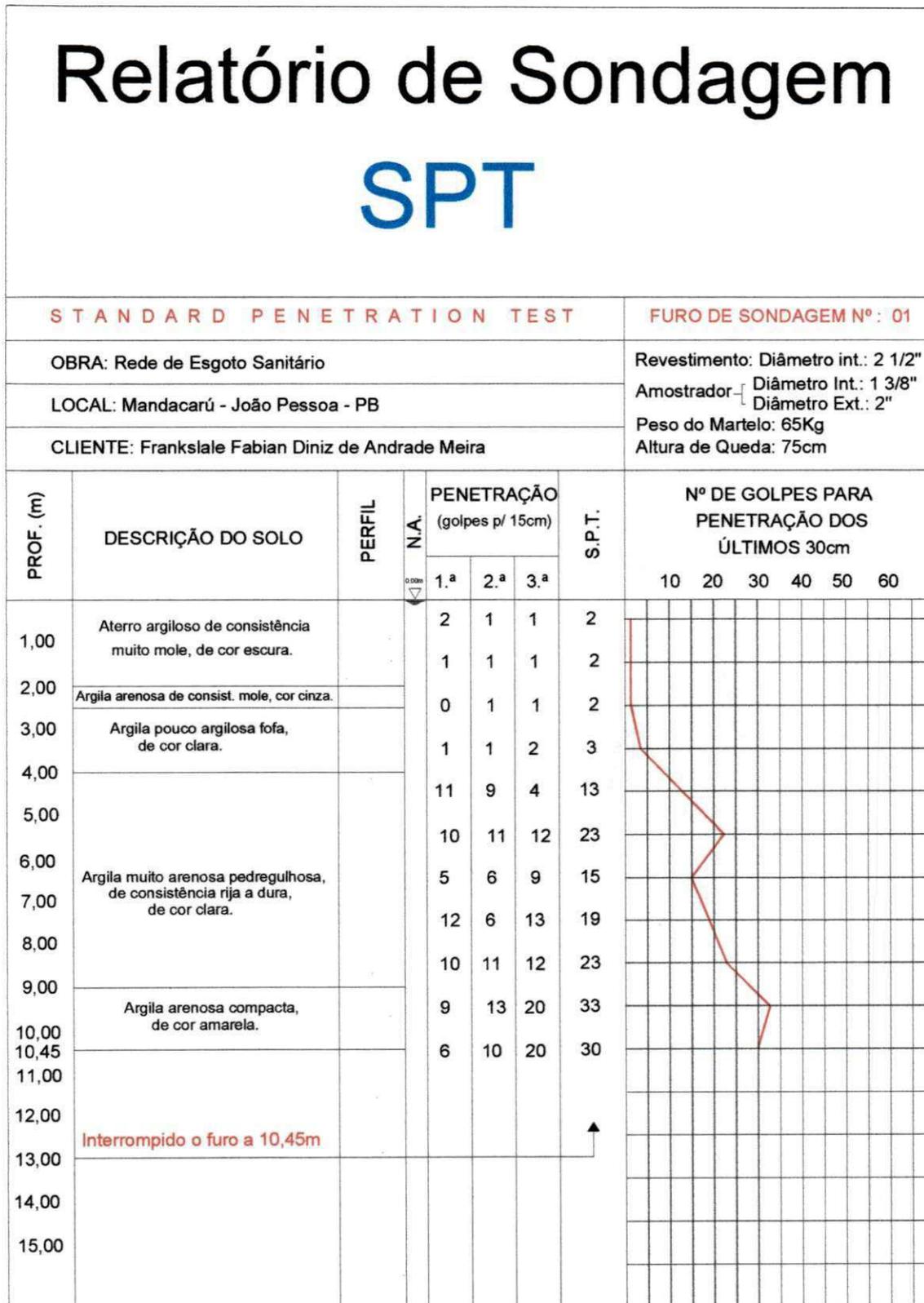


Figura 3.19 – Perfil de Sondagem do Furo 01 do Bairro de Mandacaru.

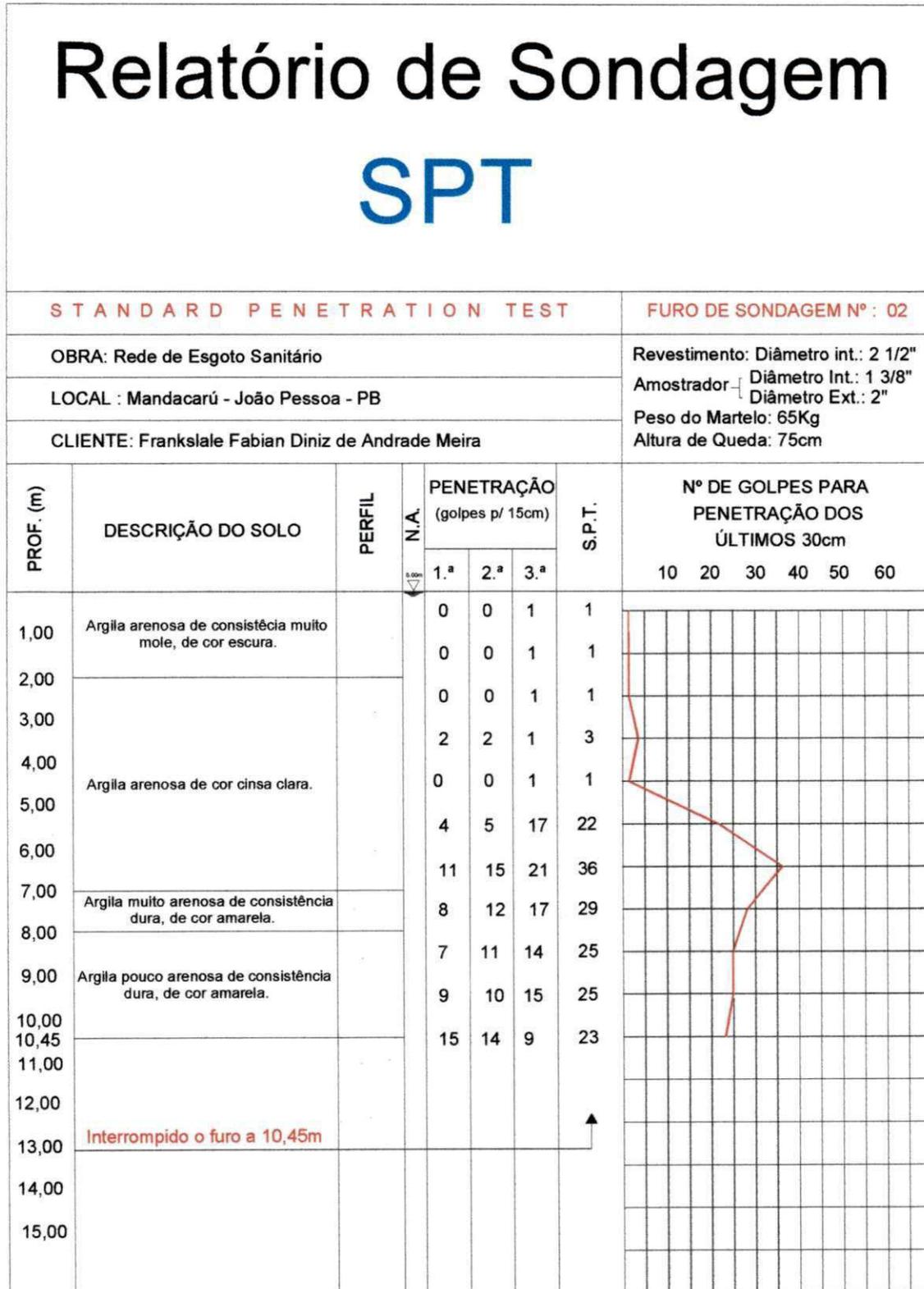


Figura 3.20 – Perfil de Sondagem do Furo 02 do Bairro de Mandacarú.

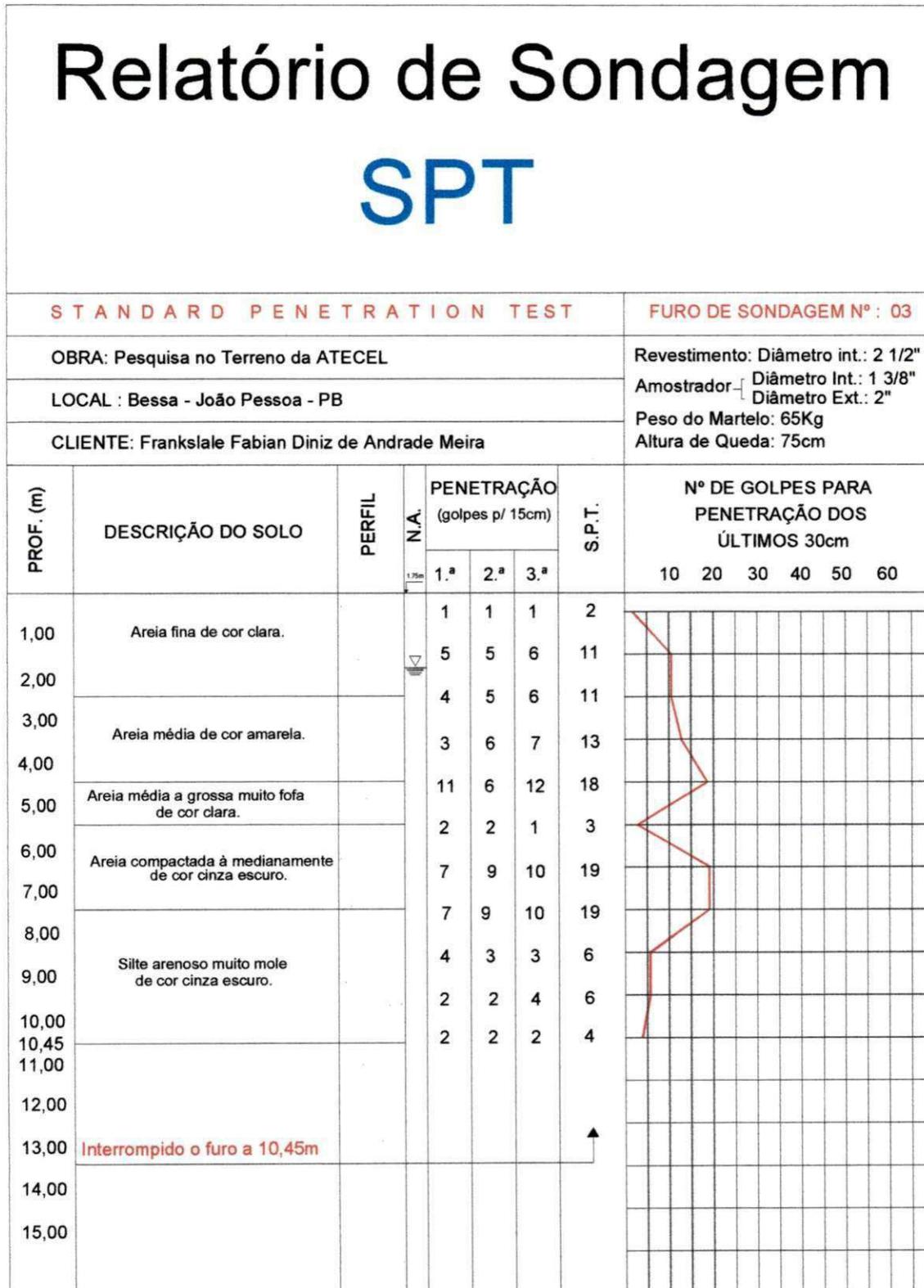


Figura 3.21 – Perfil de Sondagem do Furo 03 do Bairro do Bessa

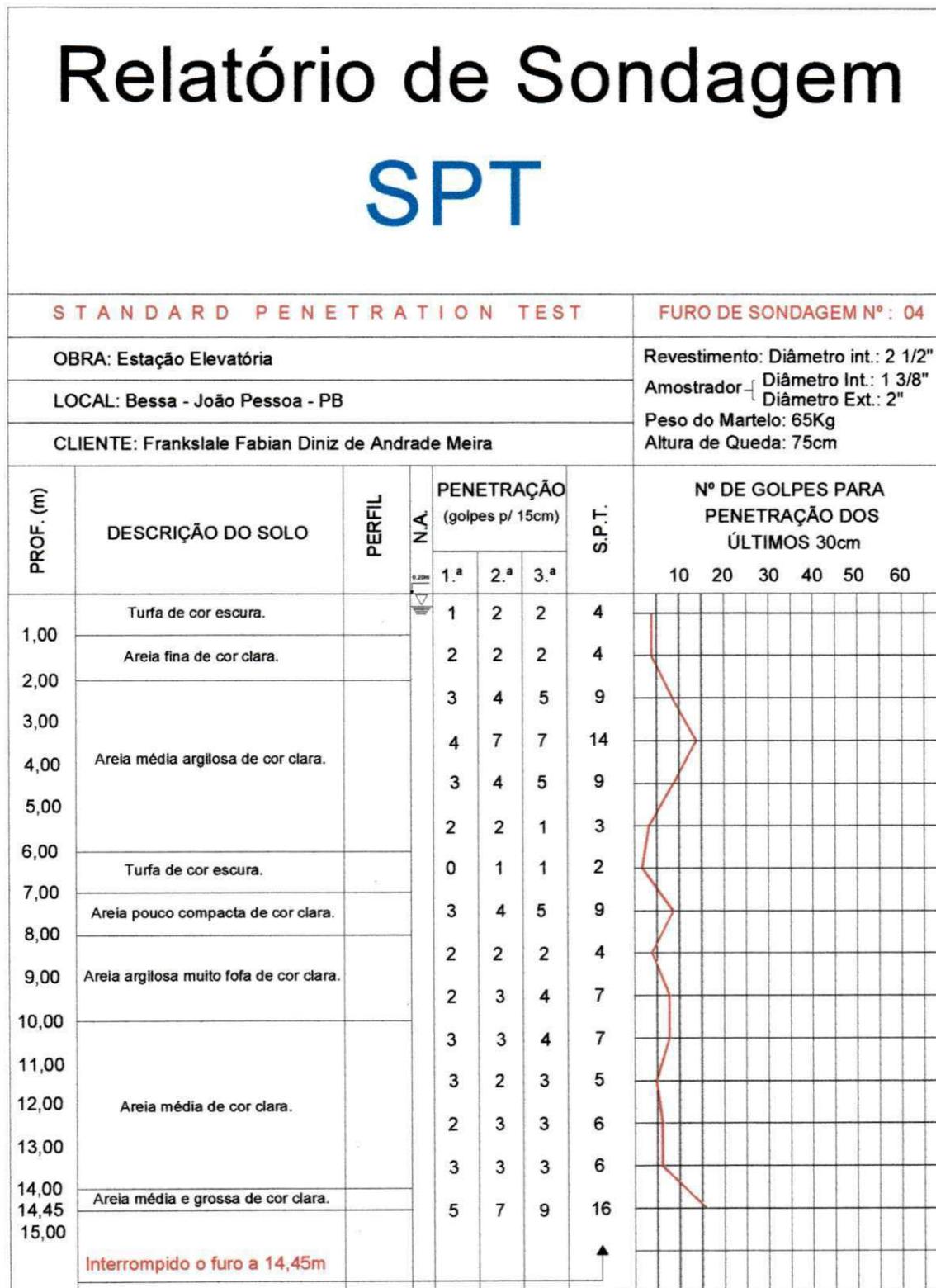


Figura 3.22 – Perfil de Sondagem do Furo 04 do Bairro do Bessa.

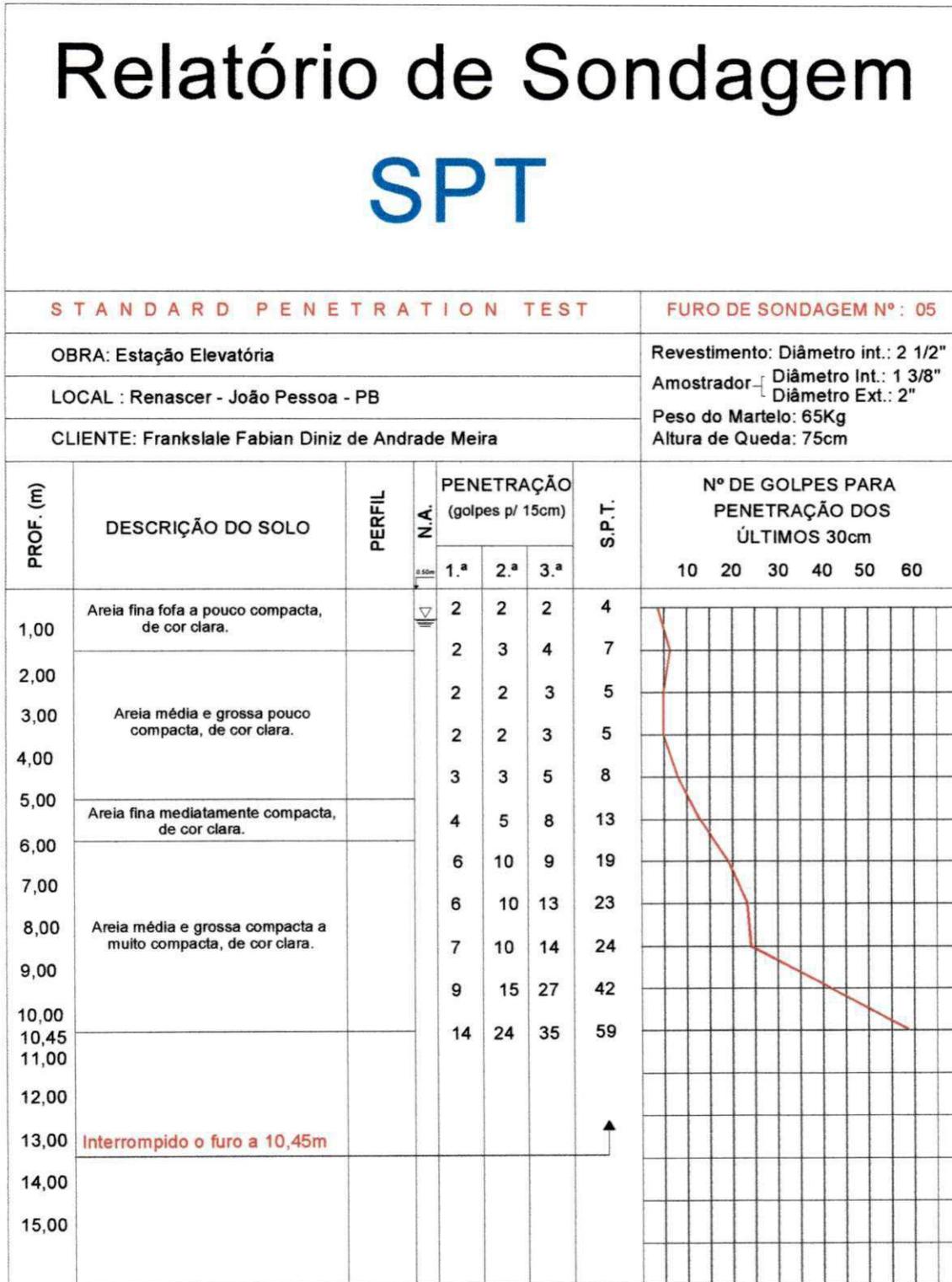


Figura 3.23 – Perfil de Sondagem do Furo 05 do Bairro do Renascer.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

4.1 – Generalidades

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir dos ensaios com SPT e SPT-T. São obtidas correlações estatísticas entre os resultados desses dois ensaios e entre eles e a energia transferida às hastes, segundo os três métodos empregados nesta pesquisa (EF2, E2F e EFV).

Para efetuar esse estudo, foram realizadas cinco sondagens com SPT, medindo-se a cada metro perfurado a resistência à penetração padrão (N) e o torque (T) necessário para mobilizar a resistência na interface amostrador-solo. No total, foram realizadas cerca de cinquenta medições com SPT e SPT-T. Simultaneamente foram feitas medições de energia transferida às hastes, a partir da instalação de sensores de deformação (strain-gauges) e de aceleração (acelerômetros) nas proximidades do topo da composição de hastes (aproximadamente 59cm abaixo da cabeça de bater).

A instrumentação das hastes para os registros de força e de velocidade em função do tempo teve por objetivo avaliar a energia transferida às hastes por três métodos diferentes, de forma a permitir discutir a questão da possível influência da resistência na energia transferida, conforme evidenciado por Morgano & Liang (1992). Aoki & Cintra (2000) concluem, também, a partir de estudos teóricos, empregando o princípio da conservação de energia de Hamilton, que maior será a energia usada para a cravação do amostrador quanto mais fácil for a penetração dele no solo e quanto menor for o comprimento das hastes acima do amostrador. Naturalmente, neste caso, admite-se que os sensores encontram-se instalados na cabeça do amostrador e não no topo das hastes, o que remete à necessidade de investigações experimentais.

A presente análise foi feita basicamente através de correlações estatísticas entre os valores de N, T e da energia medida.

Durante a coleta dos dados adotou-se a sistemática de não interferir nos procedimentos empregados pelas empresas de sondagens colaboradoras. Os valores médios das energias foram calculados a partir dos golpes necessários para a cravação dos últimos 30cm de penetração total do amostrador-padrão, considerando que praticamente não há diferença na média entre os 30cm finais e a penetração total (Cavalcante, 2002).

4.2 – SPT e SPT-T

Nas Tabelas 4.1 a 4.5 são apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios efetuados com o SPT e com o SPT dotado de torquímetro (SPT-T). Lembrando que a partir da medição do torque (T) abre-se a possibilidade da obtenção de um quociente denominado índice de torque (T/N), o qual tem sido colocado como parâmetro para caracterizar o tipo do solo (Ranzini, 1988). O torquímetro utilizado possui capacidade para medir torque até 480N.m. Vale ressaltar que o idealizador da medição do torque em SPT (Ranzini, 1988) recomenda a realização desse ensaio em solos com valores de $N_{SPT} < 20$, visto que acima deste valor torna-se difícil a aplicação do torque por apenas um homem. Nesta pesquisa foram feitas medições de torque em solos com valores de N_{SPT} na faixa de 2 a 59. Para solos com valores de N acima de 30 foram observadas dificuldades por parte do operário responsável pela aplicação do torque em manter a velocidade constante.

Tabela 4.1 – Valores de N, T e T/N obtidos a partir do SPT e do SPT-T no bairro de Mandacaru, em João Pessoa – Sondagem 1.

Profundidade	N/15	N/15	N/15	N_{SPT}	T	T/N
	1ª	2ª	3ª		(N.m)	
0,00	2	1	1	2	20	10,0
1,00	1	1	1	2	20	10,0
2,00	0	1	1	2	20	10,0
3,00	1	1	2	3	40	13,3
4,00	11	9	4	13	110	8,50
5,00	10	11	12	23	220	9,60
6,00	5	6	9	15	180	12,0
7,00	12	6	13	19	360	18,9
8,00	10	11	12	23	280	12,2
9,00	9	13	20	33	420	12,7
10,00	6	10	20	30	390	13,0

Tabela 4.2 – Valores de N, T e T/N obtidos a partir do SPT e do SPT-T no bairro de Mandacaru, em João Pessoa – Sondagem 2.

Profundidade (m)	N/15 1ª	N/15 2ª	N/15 3ª	N _{SPT}	T (N.m)	T/N
0,00	0	0	0	0	0	0,00
1,00	0	0	1	1	0	0,00
2,00	0	0	1	1	0	0,00
3,00	2	2	1	3	30	10,00
4,00	0	0	1	1	10	10,00
5,00	4	5	17	22	400	18,20
6,00	11	15	21	36	460	12,80
7,00	8	12	17	29	> 480	16,60
8,00	7	11	14	25	300	12,00
9,00	9	10	15	25	340	13,60
10,00	15	14	9	23	> 480	20,90

Tabela 4.3 – Valores de N, T e T/N obtidos a partir do SPT e do SPT-T no bairro do Bessa, no terreno pertencente à ATECEL®, em João Pessoa – Sondagem 3.

Profundidade (m)	N/15 1ª	N/15 2ª	N/15 3ª	N _{SPT}	T (N.m)	T/N
0,00	1	1	1	2	0	0,00
1,00	5	5	6	11	100	9,10
2,00	4	5	6	11	110	10,00
3,00	3	6	7	13	280	21,50
4,00	11	6	12	18	360	20,00
5,00	2	2	1	3	50	16,70
6,00	7	9	10	19	120	6,30
7,00	7	9	10	19	280	14,70
8,00	4	3	3	6	120	20,00
9,00	2	2	4	6	120	20,00
10,00	2	2	2	4	80	20,00

Tabela 4.4 – Valores de N, T e T/N obtidos a partir do SPT e do SPT-T no bairro do Bessa, Elevatória 15, em João Pessoa – Sondagem 4.

Profundidade (m)	N/15 1ª	N/15 2ª	N/15 3ª	N _{SPT}	T (N.m)	T/N
0,00	1	2	2	4	60	15,0
1,00	2	2	2	4	80	20,00
2,00	3	4	5	9	120	13,30
3,00	4	7	7	14	40	2,90
4,00	3	4	5	9	40	4,40
5,00	2	2	1	3	60	20,00
6,00	0	1	1	2	20	10,00
7,00	3	4	5	9	140	15,60
8,00	2	2	2	4	100	25,00
9,00	2	3	4	7	60	8,60
10,00	3	3	4	7	40	5,70
11,00	3	2	3	5	40	8,00
12,00	2	3	3	6	60	10,00
13,00	3	3	3	6	60	10,00
14,00	5	7	9	16	260	16,30

Tabela 4.5 – Valores de N, T e T/N obtidos a partir do SPT e do SPT-T no bairro do Renascer, Elevatória 14, em João Pessoa – Sondagem 5.

Profundidade (m)	N/15 1ª	N/15 2ª	N/15 3ª	N _{SPT}	T (N.m)	T/N
0,00	2	2	2	4	0	0,00
1,00	2	3	4	7	50	7,10
2,00	2	2	3	5	70	14,00
3,00	2	2	3	5	80	16,00
4,00	3	3	5	8	90	11,30
5,00	4	5	8	13	110	8,50
6,00	6	10	9	19	120	6,30
7,00	6	10	13	23	180	7,80
8,00	7	10	14	24	220	9,20
9,00	9	15	27	42	320	7,60
10,00	14	24	35	59	> 480	8,10

Na Figura 4.1 são apresentados os valores da resistência à penetração em função da profundidade, obtidos a partir das cinco sondagens efetuadas. Da figura constata-se que das cinco sondagens, em três se percebe um nítido crescimento da resistência à penetração (N_{SPT}) a partir de aproximadamente 4m de profundidade. Apenas as sondagens efetuadas nos bairros do Bessa (no terreno da ATECEL) e na Elevatória 15 percebe-se que a resistência tende a diminuir para profundidades maiores que 6m-7m. Este comportamento é característico das areias encontradas nessa área de João Pessoa, conforme relatado por Medeiros (1998).

É interessante a obtenção de resultados em locais com resistências diferentes para que se possa analisar o efeito da resistência do solo, em se tratando de N_{SPT} e T, na energia transferida às hastes.

Na Figura 4.2 é apresentada a variação dos valores do torque em função da profundidade, a partir das cinco sondagens realizadas. Da figura, observa-se basicamente a mesma tendência de variação de T com a profundidade encontrada para os valores de N_{SPT} , ou seja, concordando com a variabilidade registrada pelos valores do N_{SPT} , indicando uma coerência entre os dados obtidos com o SPT e o SPT-T.

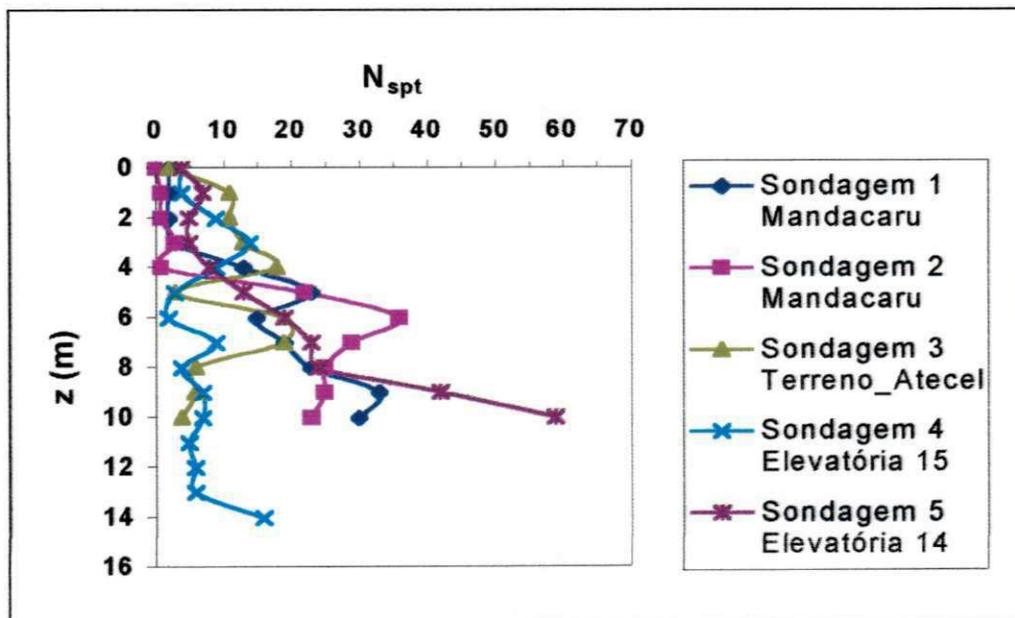


Figura 4.1- Variação da resistência à penetração (N_{SPT}) com a profundidade a partir de cinco sondagens realizadas em João Pessoa.

O ensaio de SPT-T mostrou-se uma ferramenta eficiente nas sondagens realizadas em diversos tipos de solos, desde turfa até argila rija, além de proporcionar características das mais variadas para estudos aprofundados. Estudos feitos por Décourt e Quaresma Filho (1994) em solos do estado de São Paulo, revelaram uma tendência de aumento do torque máximo à medida que aumenta a profundidade. Essa característica esteve presente nas sondagens realizadas para esta dissertação, corroborando com os resultados encontrados por Décourt & Quaresma Filho (1994).

De fato, isto foi encontrado nas sondagens realizadas nos bairros de Mandacaru (sondagens 1 e 2) e Renascer, a partir de aproximadamente 4m de profundidade. Porém, nas sondagens efetuadas no bairro do Bessa, no terreno da ATECEL e na Elevatória 15, não foi constatado tal comportamento, os valores da resistência à penetração e do torque diminuem para profundidades maiores.

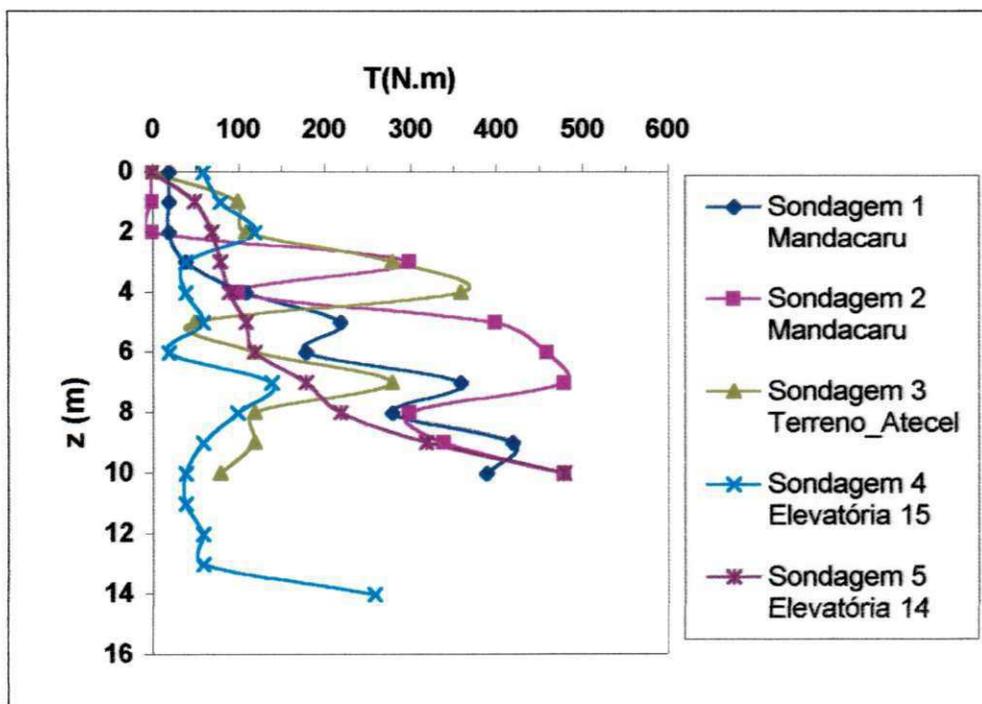


Figura 4.2- Variação dos valores do torque máximo (T) com a profundidade a partir de cinco sondagens realizadas em João Pessoa.

Foram medidos valores de torque variando entre 0 e 480N.m. Cabe ressaltar que em alguns casos o torquímetro não permitiu a leitura do torque máximo, em virtude da limitação

de sua capacidade. Foi o que aconteceu na profundidade igual a 10m, da sondagem efetuada no bairro do Renascer (Elevatória 14), onde o valor da resistência à penetração foi igual a 59. Neste caso, anotou-se o valor máximo do torque possível de leitura (480N.m).

Na Figura 4.3 são apresentados os valores do índice do torque (T/N_{SPT}) com a profundidade. Da figura se observa que os valores do índice de torque obtidos a partir de todas as sondagens realizadas situam-se numa faixa variando entre 7,5 e 18, aproximadamente. A relação entre o torque e a resistência à penetração foi proposta por Décourt & Quaresma Filho (1991; 1994) como fator identificador do tipo de solo onde foi feito o ensaio. A partir de medições efetuadas em solos da bacia terciária de São Paulo, foram propostas correlações entre N_{SPT} e T . Por exemplo, para argilas sobreadensadas saturadas de São Paulo, Décourt & Quaresma Filho (1994) encontraram valores de T/N_{SPT} (T em kgf.m), em média iguais a 1,16, o que corresponde a T/N_{SPT} , com T em N.m, 11,6. Em solos saprolíticos do campo experimental da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, foi encontrado T/N_{SPT} da ordem de 19,8 (T em N.m). Portanto, observando-se os gráficos da Figura 4.3, conclui-se que os valores médios estariam concordantes com os valores que normalmente a literatura tem apresentado.

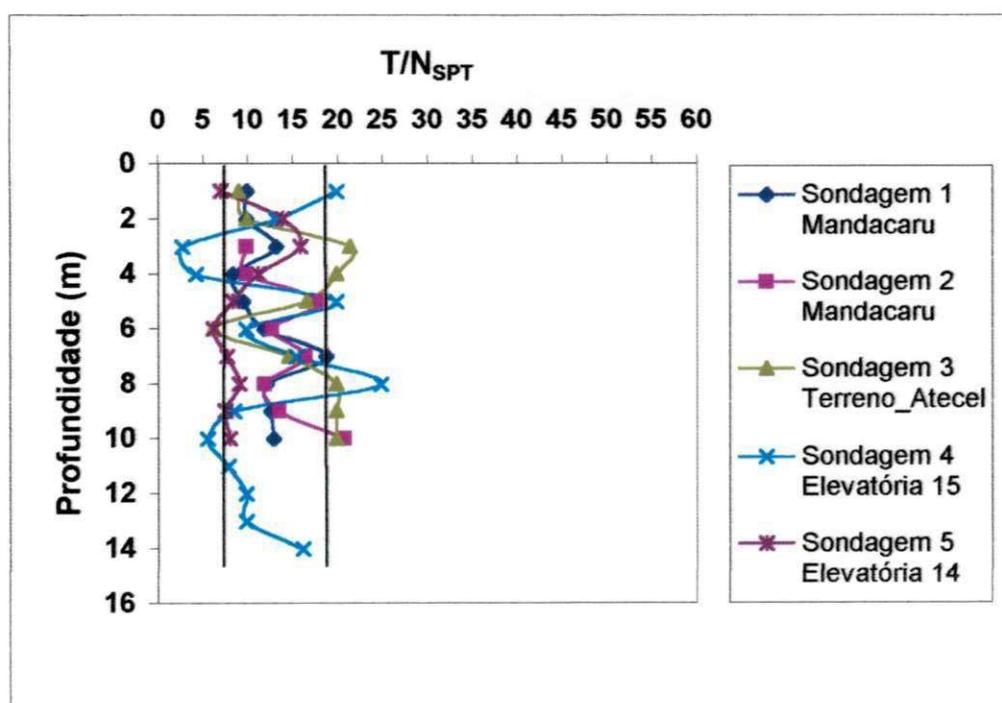


Figura 4.3 - Variação do índice do torque com a profundidade a partir das sondagens realizadas em João Pessoa.

4.3 – Variação da energia com a profundidade

Os valores da energia transferida às hastes do SPT obtidos a partir dos dados adquiridos com o SPT ANALYZER e calculados por três métodos diferentes (EF2, E2F e EFV) estão apresentados no Apêndice A nas Tabelas A1, A2, A3, A4 e A5.

4.3.1 – Correção dos métodos EF2 e E2F

Palacios (1977) e Schmertmann & Palacios (1979), sugerem fazer correções nos valores da energia medida a partir de registros obtidos através de célula elétrica de carga devido à posição do sensor nas hastes.

Como se observa na Figura 4.4, o sensor de deformação é posicionado a uma distância, em média, 60cm abaixo da cabeça de bater, visto que a colocação da célula de carga exatamente no local do impacto poderia além de provocar danos ao sensor, comprometer ainda qualidade do registro por causa da concentração de tensões na cabeça de bater.

Assim, pelo fato de existir uma parte da onda correspondente a este trecho que não é registrada pelo sensor, corrigem-se os valores da energia, para que seja levado em conta esse efeito (IRTP, 1988 e Clayton, 1990).

Os valores das energias obtidos a partir dos métodos EF2 e E2F foram corrigidos em função da posição dos sensores. O fator de correção é maior quando se tem uma distância grande entre a posição do impacto e a posição do sensor, e o comprimento da haste é pequeno. Entretanto, quando a posição do sensor é próxima da cabeça de bater e a haste é de comprimento longo, o fator de correção torna-se muito pequeno. Para os dados desta dissertação, por exemplo, para uma haste medindo 3,5m de comprimento e com o sensor instalado a 59cm abaixo da cabeça de bater, o fator de correção para a energia EF2 e E2F é aproximadamente 1,12. Para um comprimento de 10m, o fator de correção é apenas de 1,01.

De acordo com a posição dos sensores de força, os valores das energias calculados pelos métodos EF2 e E2F foram corrigidos através das Equações 4.1 e 4.2, onde os fatores de

correção (C_N) foram retirados do gráfico da Figura 4.5. Os valores de C_N são obtidos da relação mostrada na Equação 4.3, conforme descrito em seguida.

$$EF2(\text{corrigido}) = C_N \cdot EF2(\text{medido}) \tag{4.1}$$

$$E2F(\text{corrigido}) = C_N \cdot E2F(\text{medido}) \tag{4.2}$$

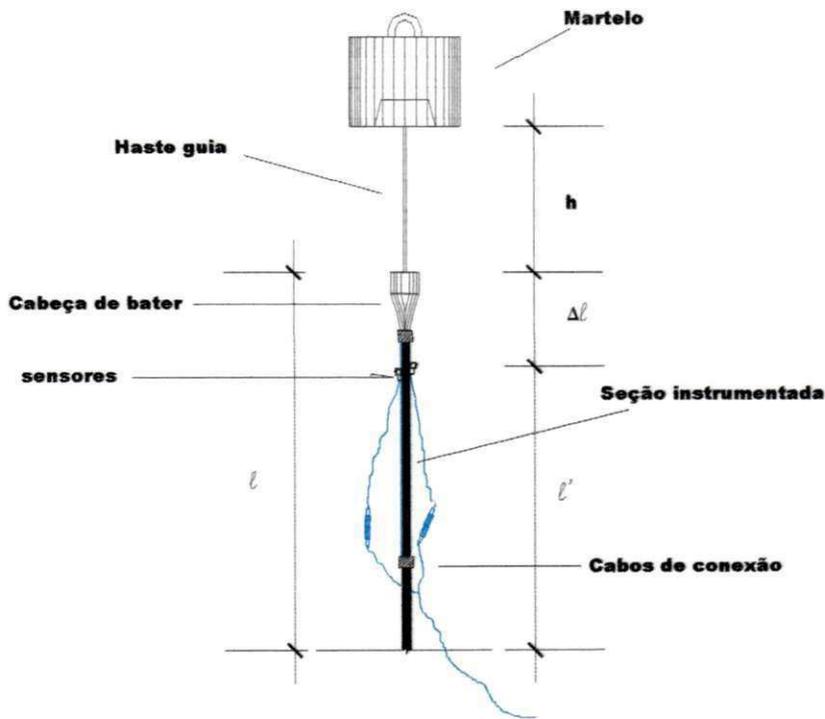


Figura 4.4 Ilustração da seção instrumentada.

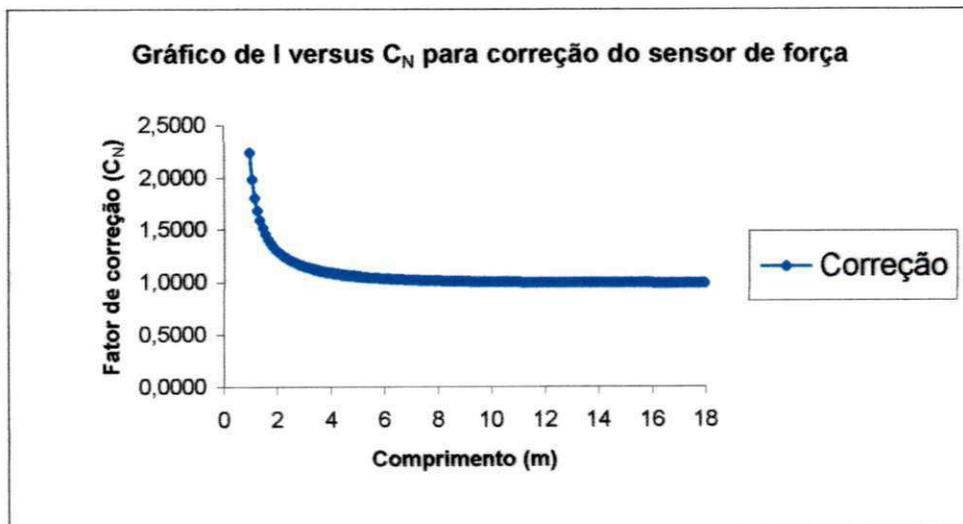


Figura 4.5 – Fator de correção para a energia obtida em função do registro de força.

$$C_N = \frac{n_{l/L}}{n_{(l-\Delta l)/L}} \quad (4.3)$$

sendo:

$n_{l/L}$ → eficiência teórica obtida para uma haste de comprimento total l e martelo de comprimento L ;

$n_{(l-\Delta l)}$ → eficiência teórica obtida para uma haste de comprimento total $l-\Delta l$ e martelo de comprimento L ;

Δl → distância entre a cabeça de bater e a seção instrumentada.

4.3.2 – Medição de energia transferida às hastes

Observa-se na Figura 4.6 um registro típico de força e de velocidade em função do tempo medidos simultaneamente, obtidos das campanhas de ensaio realizadas em João Pessoa através do sistema de aquisição de dados SPT ANALYZER e com instrumentação adequada na extremidade superior da composição de hastes, uma combinação composta de medidores de deformação (strain-gauges) e acelerômetros, para obtenção dos registros de força e de aceleração respectivamente, os quais o sistema de aquisição de dados os integra em registros de força e de velocidade. Com os registros pôde-se calcular a energia por qualquer um dos três métodos EF2, E2F e EFV.

Observa-se nesta figura um fato importante, é que teoricamente o tempo $t = \frac{2l}{c}$ deveria corresponder ao ponto da curva $F(0)$. No entanto, isso nem sempre aconteceu, devido à perda de proporcionalidade entre a força e a velocidade. A proporcionalidade força-velocidade (FVP) observada foi de 0,92, o método EF2 só é válido quando essa proporcionalidade no intervalo de tempo $t = 0$ a $t = \frac{2l}{c}$ for igual a 1.

O método EFV por integrar os registros de força e de velocidade medidos desde o tempo de início do impacto até o valor máximo de energia é também chamado de “Energia Máxima transferida as hastes”, incorporando ainda todos impactos subseqüentes após a primeira onda de compressão incidente.

Pelo fato de seus resultados não serem afetados pelas possíveis perdas de proporcionalidade entre a força e a velocidade este método é considerado mais correto (Abou-Matar & Goble, 1997).

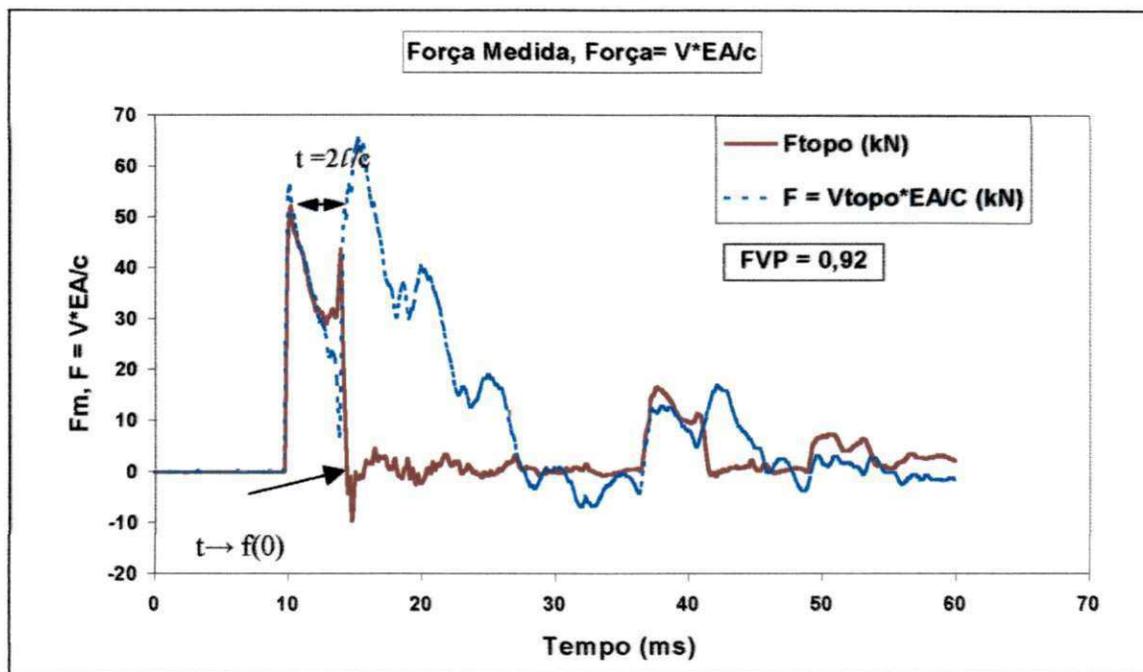


Figura 4.6 Registro típico de força e de velocidade obtidos nas campanhas de ensaios em João Pessoa.

Nas Figuras 4.7 a 4.9 são mostrados os valores das energias calculadas segundo os métodos EF2, E2F e EFV em função do comprimento. As tendências de variação mostradas nos gráficos das Figuras 4.7 e 4.8 concordam em comportamento com os resultados da literatura desde as pesquisas mais antigas (Palacios, 1977; Schmertmann & Palacios, 1979) até as mais recentes (Belincanta, 1998). Nota-se que os valores das energias EF2 e E2F com o comprimento tendem a crescer exponencialmente até aproximadamente 14m. Em seguida, os valores tendem a permanecer constantes. Entretanto, não se pode afirmar que este segundo comportamento se mantém para comprimentos maiores, pois não foram feitas medições além de 18m de hastes, apesar da literatura mostrar que a tendência é da energia transferida se manter constante para hastes longas (Palacios, 1977).

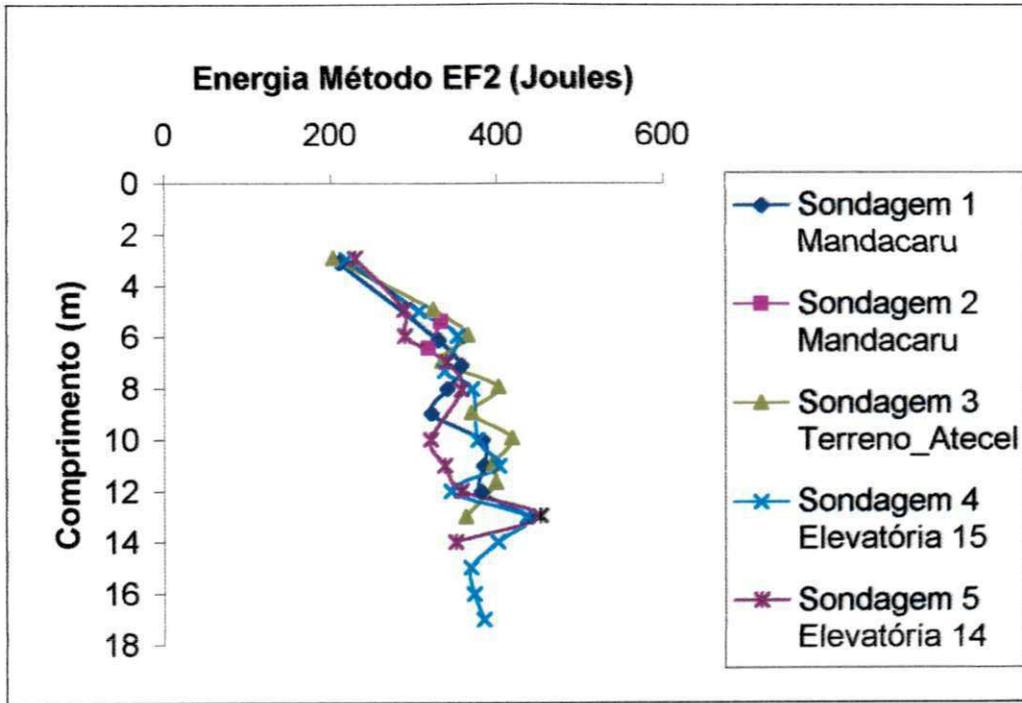


Figura 4.7 Valores da energia calculada através do método EF2 versus comprimento das hastes, obtidos das campanhas de ensaios executadas em bairros da cidade de João Pessoa - PB.

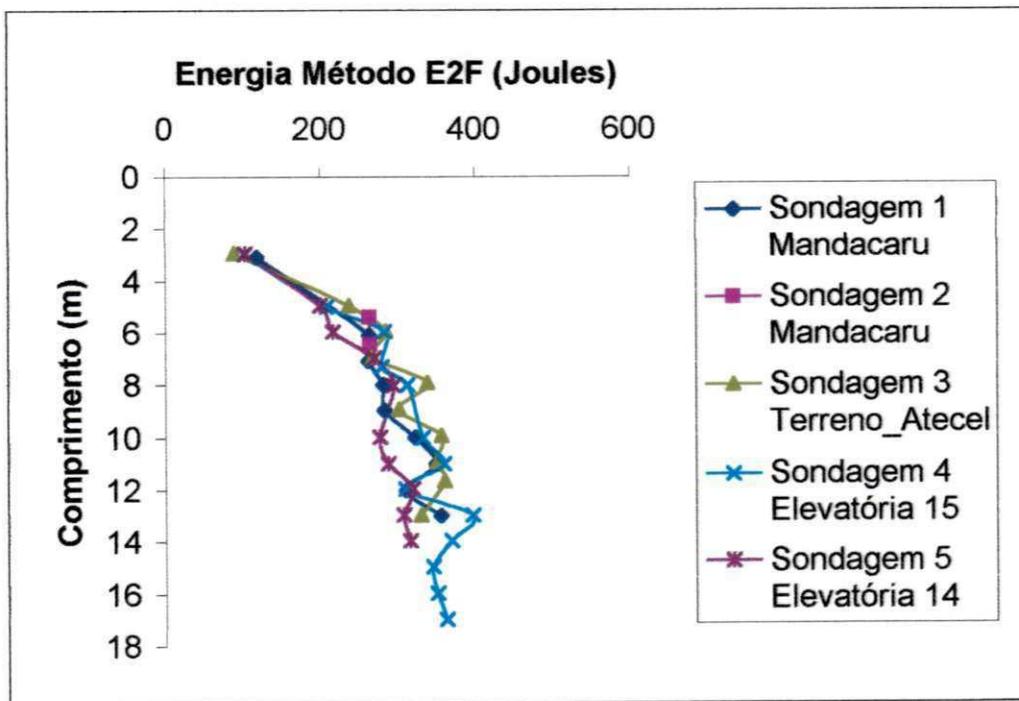


Figura 4.8 Valores da energia calculada através do método E2F versus comprimento das hastes, obtidos das campanhas de ensaios executadas em bairros da cidade de João Pessoa - PB.

Na Figura 4.9 são mostrados os valores da energia calculada segundo o método EFV a partir das sondagens efetuadas em diversos tipos de solos, onde a resistência à penetração variou entre 2 e 59. Da figura se percebe uma nítida tendência dos valores da energia se manterem constantes para qualquer comprimento da haste (entre 2m e 17m), independente da resistência do solo. O valor médio da energia transferida pelo método EFV está em torno de 400 Joules, o que corresponde a uma eficiência de energia transferida às hastes da ordem de 83,6% em relação à energia potencial nominal disponível para o martelo.

Esse valor de eficiência é maior do que se tem publicado na literatura brasileira. No Brasil, tem sido adotado o valor igual a 72% como um valor característico, principalmente a partir de medições efetuadas em hastes longas (14m) a partir de célula elétrica de carga, utilizando o método E2F (Belincanta, 1985; 1998). Observando-se o gráfico da Figura 4.8, o valor da energia medida para um comprimento de hastes da ordem de 14m seria da ordem de 360 Joules, correspondendo a uma eficiência igual a 75%, que ainda supera o valor tomado como padrão no Brasil. Deve-se considerar que está implícito no cálculo da energia a variável altura de queda que, para as sondagens realizadas durante esta pesquisa, verificou-se ser sempre acima do valor padrão (75cm). Estimativa visual feita pelo autor da presente dissertação indica algo na faixa entre 80cm a 85cm.

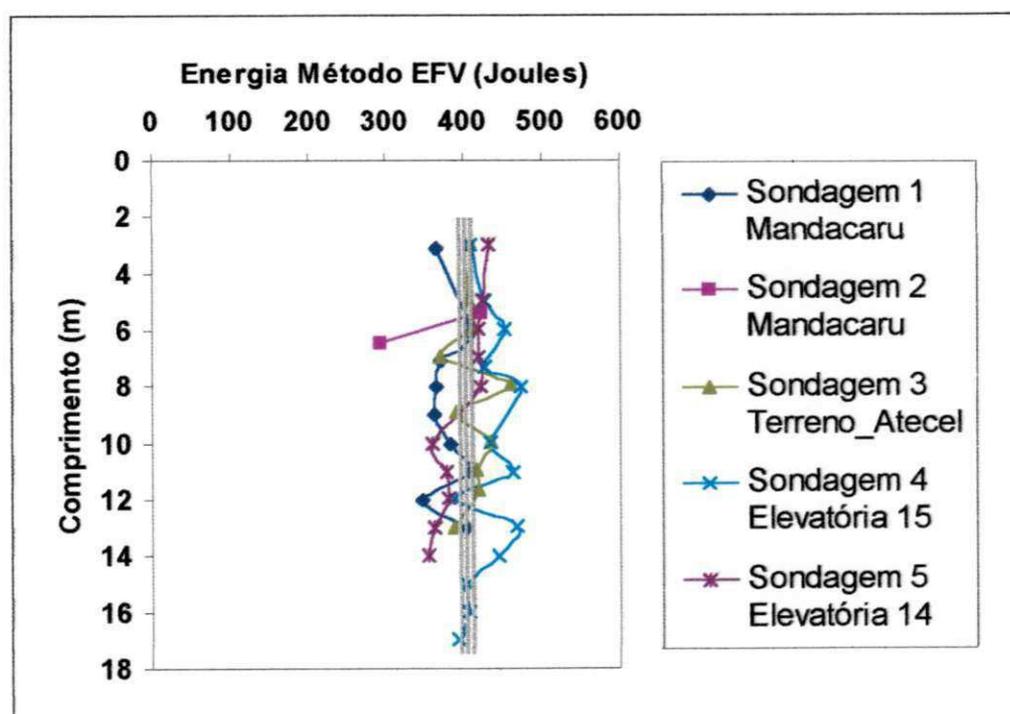


Figura 4.9 Valores da energia calculada através do método EFV versus comprimento das hastes, obtidos das campanhas de ensaios executadas em bairros da cidade de João Pessoa - PB.

A literatura mais recente tem revelado alguma tendência da energia máxima transferida às hastes ser sensível à resistência última do solo. Morgano & Liang (1992) mostraram a partir de simulações teóricas, empregando análise da equação da onda, que a eficiência de energia transferida às hastes pode variar à medida que varia a resistência do solo, para hastes com até 6m, aproximadamente. Abou-Matar & Goble (1997) também evidenciaram teoricamente uma perda de energia máxima transferida às hastes da ordem de 4%, quando a resistência do solo corresponde a 60% da força máxima incidente nas hastes.

Como essas constatações teóricas foram obtidas para sistemas de SPT diferentes do sistema usualmente empregado no Brasil, sente-se a necessidade de uma avaliação teórica aplicada ao sistema de SPT brasileiro, preferencialmente empregando-se rotinas de programas baseadas nos princípios da equação da onda aplicados ao caso da cravabilidade de estacas, de forma a conferir uma maior confiabilidade aos resultados obtidos. Ao mesmo tempo, será possível fazer um estudo comparativo entre as análises teóricas efetuadas no Brasil e na literatura internacional.

4.4 - Correlações Estatísticas Obtidas

4.4.1 - Generalidades

Foram estabelecidas correlações estatísticas entre os parâmetros N_{SPT} , T e os valores das energias obtidos pelos métodos EF2, E2F e EFV. Inicialmente foi obtida a correlação entre o índice de resistência a penetração (N_{SPT}) e o torque máximo medido (T). Em seguida foram feitas tentativas de correlacionar estatisticamente estes parâmetros com a energia transferida às hastes, porém sem muito sucesso.

As correlações foram obtidas através do método dos mínimos quadrados, utilizando-se o conjunto de dados disponíveis no programa STATISTICA (Basic Statistics and Tables). Calculou-se o coeficiente de correlação linear (R), que dá indicação da qualidade da regressão obtida e o coeficiente de determinação (R^2), para avaliar a representatividade da correlação entre os pares de pontos estudados. Adicionalmente, é também apresentado o erro padrão (E.P.) para análise da dispersão existente.

4.4.2 - Correlações obtidas entre os parâmetros N_{SPT} e T .

Na Figura 4.10 é apresentada a correlação entre os valores de N_{SPT} e os valores do torque (T) obtidos a partir das cinco sondagens realizadas em João Pessoa. Da figura, pode-se observar uma tendência linear de crescimento nos valores do torque à medida que aumenta a resistência à penetração do SPT. A correlação apresentada entre os valores do N_{SPT} e os valores de T , a partir do modelo de regressão linear ajustado, foi obtido um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,74$, mostrando que existe uma correlação significativa entre os parâmetros.

No entanto, nota-se uma razoável dispersão dos dados, caracterizada pelo considerável valor do erro padrão verificado ($E.P. = 75,29$). Essa tendência é mais evidenciada para valores de N_{SPT} e T menores que 25golpes/30cm e 200N.m, respectivamente. Esta constatação corrobora a opinião de Ranzini (1988) quando sugere um certo limite para validação da equação que ele propôs, ou seja, para os valores do torque menores que $T=200N.m$. Para valores acima deste os erros de medidas podem comprometer a correlação devido às dificuldades de aplicação correta do torque às hastes por um homem. De fato, os dados mostram que a dispersão dos valores de torque abaixo de 200N.m apresentaram-se bem menores do que para os valores maiores. A correlação linear obtida tem a forma mostrada na equação 4.4, com coeficiente de correlação igual a 0,86, portanto, uma correlação considerada significativa.

$$T = 10,50 N_{SPT} + 22,51 \quad [N.m] \quad (4.4)$$

A correlação estatística a mostrada na Equação 4.4, quando transformada para o mesmo sistema de unidades empregado por Décourt & Quaresma Filho (1991), assume a seguinte forma:

$$T = 1,05 N_{SPT} + 2,25 \quad [kgf.m] \quad (4.5)$$

A Equação 4.5 tem semelhanças com a equação proposta por Décourt & Quaresma Filho (1991), obtida para solos sedimentares ($T = 2 + N_{72}$), lembrando que a eficiência do SPT usado nesta dissertação certamente é maior do que a eficiência com a qual aqueles autores obtiveram a correlação (72%).

Deve-se ressaltar que a tendência observada no gráfico da Figura 4.10 foi obtida a partir de sondagens em locais diferentes, onde a variação da resistência ao longo da profundidade não segue o mesmo comportamento para todos os furos. Por exemplo, nas duas sondagens efetuadas no bairro do Bessa (terreno da ATECEL) e na Elevatória 15, ao contrário dos outros locais, a resistência não cresce com a profundidade.

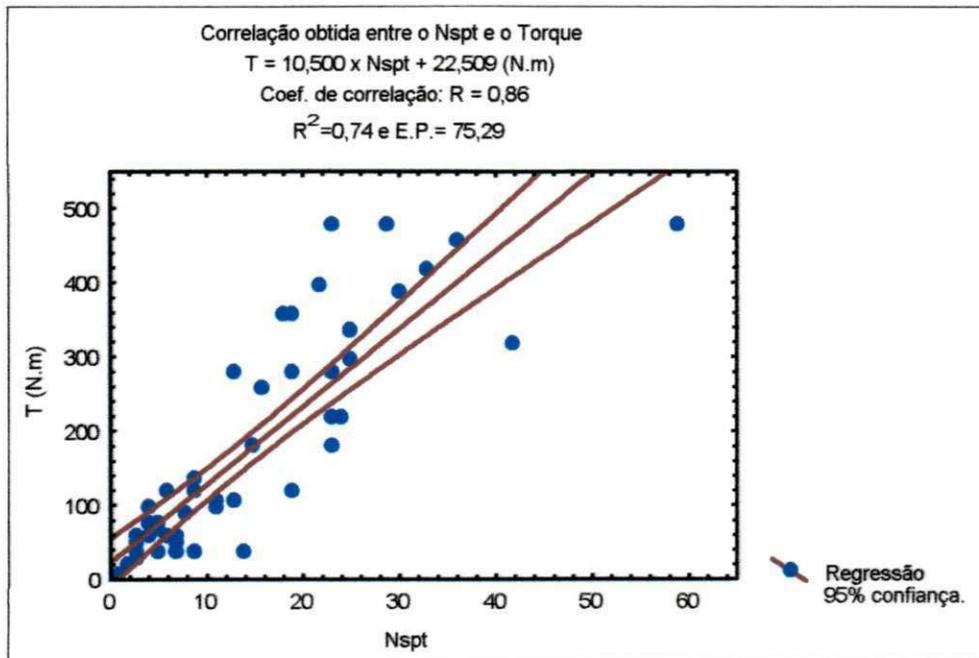


Figura 4.10 Correlação entre o torque e o índice de resistência à penetração.

4.4.3 Correlações entre os parâmetros do SPT, do SPT-T e as energias obtidas pelos métodos EF2, E2F e EFV

4.4.3.1 - Correlações obtidas entre N_{SPT} , e as energias obtidas pelos métodos EF2 e E2F

No Apêndice B são apresentados os gráficos contendo as correlações entre os valores de N_{SPT} e os valores médios das energias dos métodos EF2, E2F e EFV para cada sondagem realizada. Dos gráficos contidos nas Figuras B.1 a B.12 percebe-se que praticamente não há uma correlação satisfatória entre os valores de N_{SPT} e os valores das energias. No entanto, observa-se uma pequena tendência dos valores das energias crescerem linearmente quando os valores da resistência à penetração aumentam.

Nas Figuras 4.11 a 4.12 são mostrados os gráficos contendo as correlações obtidas entre os valores das energias calculadas pelos métodos empregados (EF2 e E2F) e a resistência à penetração do SPT para todas as sondagens realizadas.

Conforme se percebe na Figura 4.11, há uma ligeira tendência dos valores das energias obtidos pelo método EF2 crescerem linearmente à medida que os valores de N_{SPT} aumentam. O mesmo aconteceu quando se tentou correlacionar os valores de energia obtidos pelo método E2F com N_{SPT} , conforme mostrado nas Figuras 4.12.

Analisando-se essas figuras, a partir dos parâmetros estatísticos, não nos permite assegurar um grau de confiabilidade elevado para a correlação, em função da representatividade da base de dados e dos resultados encontrados. Portanto, partindo-se da constatação de que a energia máxima transferida independe do comprimento da composição das hastes, as evidências experimentais mostradas nos gráficos do Apêndice B (B.1 a B.12) e das Figuras 4.11 a 4.12 revelam que não existe uma correlação satisfatória dos valores das energias com os valores da resistência à penetração. Por esse motivo, sugere-se a ampliação do banco de dados para reforçar as tendências observadas.

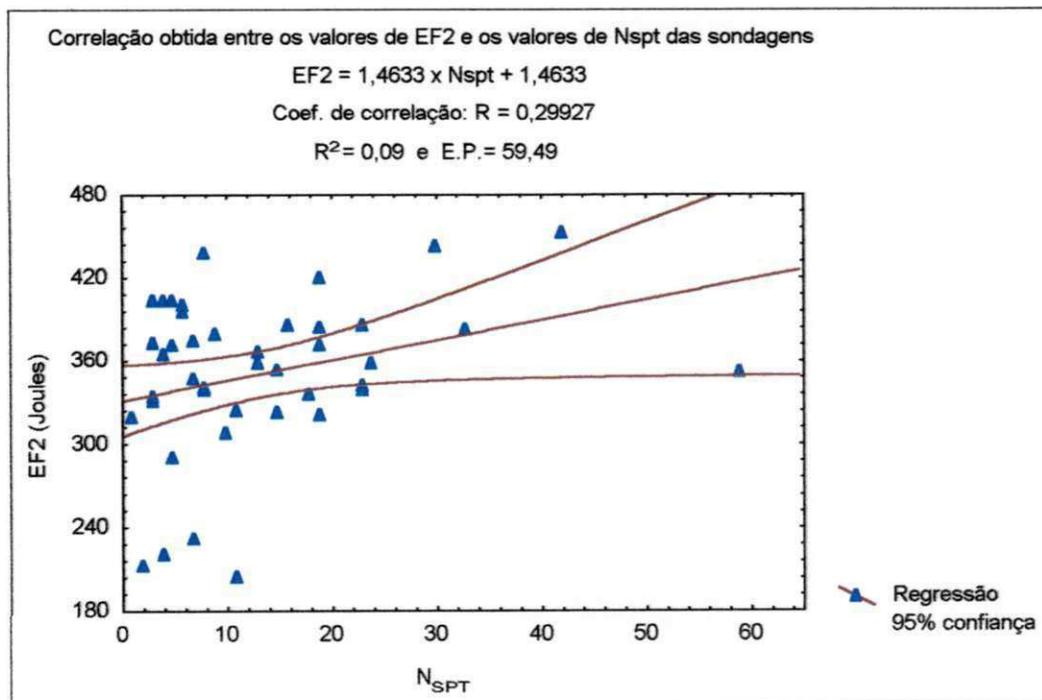


Figura 4.11 Correlação entre os valores de energia obtidos pelo método EF2 e os valores de N_{SPT} a partir das sondagens realizadas em João Pessoa.

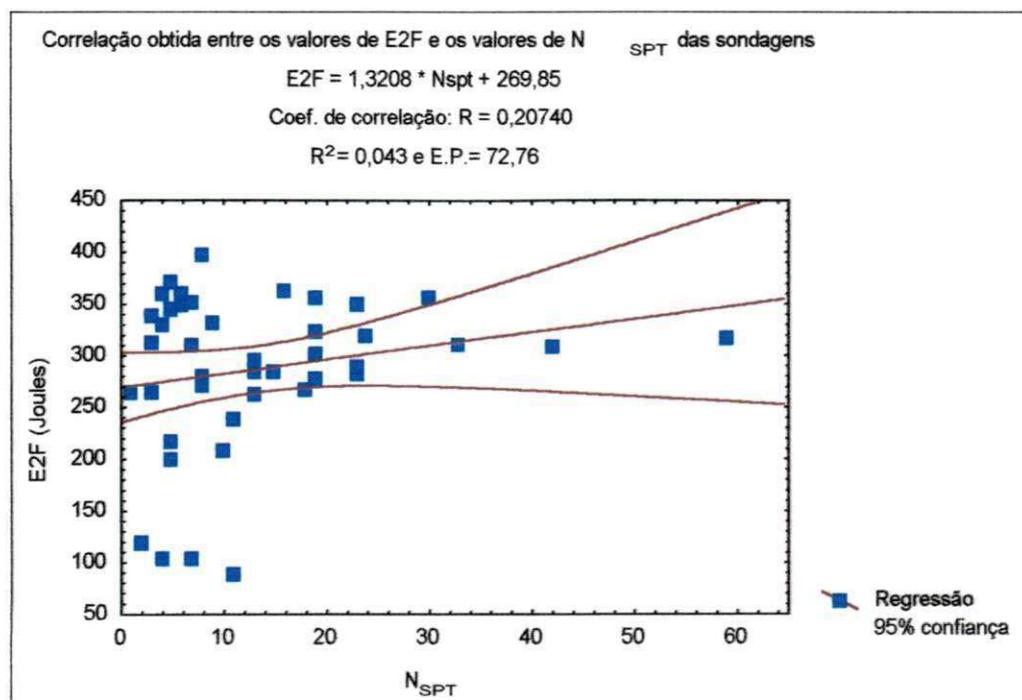


Figura 4.12 Correlação entre os valores de energia obtidos pelo método E2F e os valores de N_{SPT} a partir das sondagens realizadas em João Pessoa.

4.4.3.2 - Correlações obtidas entre N_{SPT} e a energia obtida através do método EFV

É apresentada na Figura 4.13 a correlação obtida entre os valores da energia calculada através do método EFV e os valores da resistência à penetração (N_{SPT}) para as campanhas de sondagens realizadas em João Pessoa. Observa-se na Figura 4.13 que não existe uma correlação estatística entre os valores de energia pelo método EFV e os valores de N_{SPT} , apenas revelando uma pequena tendência dos valores da energia diminuírem à medida que aumenta a resistência do solo, porém, essa hipótese é descartada quando se observa para os valores dos parâmetros estatísticos obtidos, ou seja, são correlações com baixíssimo grau de confiabilidade, como se pode ver no gráfico mostrado na Figura 4.13, onde os valores dos coeficientes de correlação e de determinação são extremamente baixos. Portanto, conclui-se da tentativa de correlação obtida que a energia transferida às hastes não apresentaram relação satisfatória quando comparadas com a resistência à penetração padrão do amostrador.

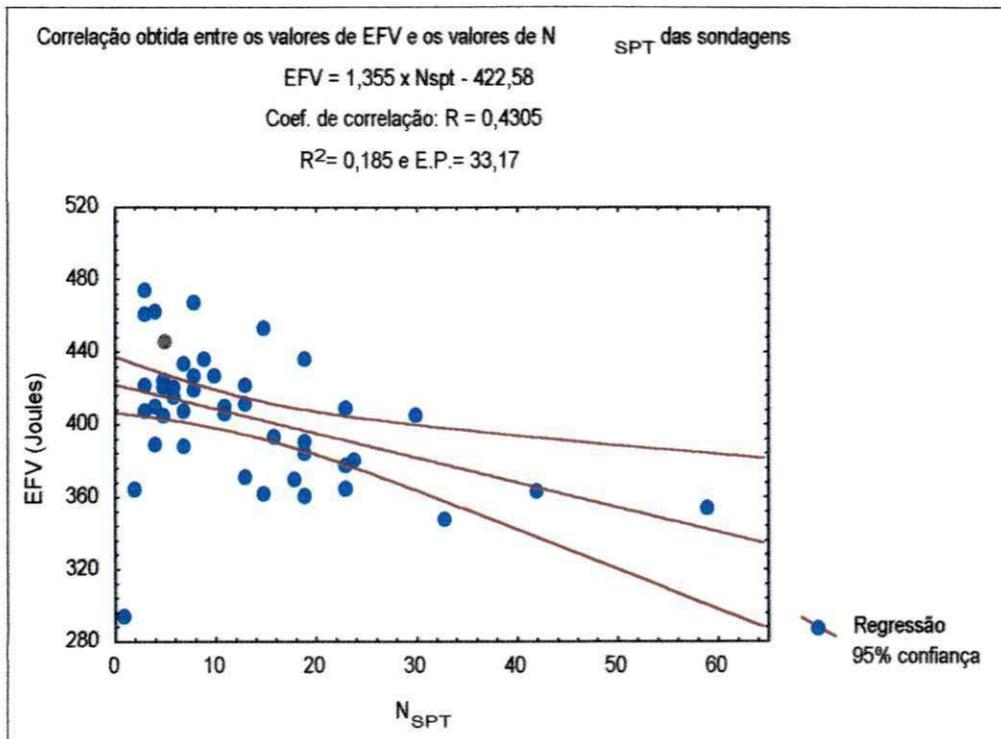


Figura 4.13 Correlação entre os valores de energia obtidos pelo método EFV e os valores de N_{SPT} a partir das sondagens realizadas em João Pessoa.

4.4.3.3 - Correlações obtidas entre T e as energias obtidas pelos métodos EF2 e E2F

No Apêndice B são apresentados os gráficos contendo as correlações entre os valores de T e os valores das energias dos métodos para cada sondagem realizada. Dos gráficos contidos nas Figuras B.13 a B.24 percebe-se que praticamente não há variação significativa da energia à medida que o torque máximo varia, indicando o mesmo comportamento observado em relação à resistência à penetração, ou seja, a energia transferida às hastes não se correlaciona satisfatoriamente com o torque máximo medido.

Nas Figuras 4.14 e 4.15 são mostrados os gráficos contendo as correlações obtidas entre os valores das energias calculadas pelos métodos empregados (EF2 e E2F) e os valores do torque para todas as sondagens realizadas. As evidências experimentais mostradas nos gráficos do Apêndice B (B.13 a B.24) e das Figuras 4.14 e 4.15 revelam que não existe uma correlação satisfatória entre as energias dos métodos EF2 E2F com o torque medido. Isso seria esperado, uma vez que o torque se mostrou proporcional à resistência à penetração durante as sondagens.

Analogamente ao que aconteceu quando se tentou correlacionar N_{SPT} com a energia, praticamente não se obteve correlação estatísticas entre os valores de T com a energia. Da mesma forma observa-se uma leve tendência de crescimento dos valores de energia obtidos pelo método EF2 à medida que o torque aumenta, porém isso pode ser atribuído ao fato dessa energia calculada através desse método tender a dar valores altos quando o solo onde o amostrador é cravado possui resistência elevada.

Portanto, os parâmetros obtidos para essas correlações não nos permitem assegurar confiabilidade às correlações, em função da representatividade da base de dados e dos resultados encontrados, recomenda-se então a ampliação desse banco de dados para que possa reforçar as tendências observadas nessas correlações.

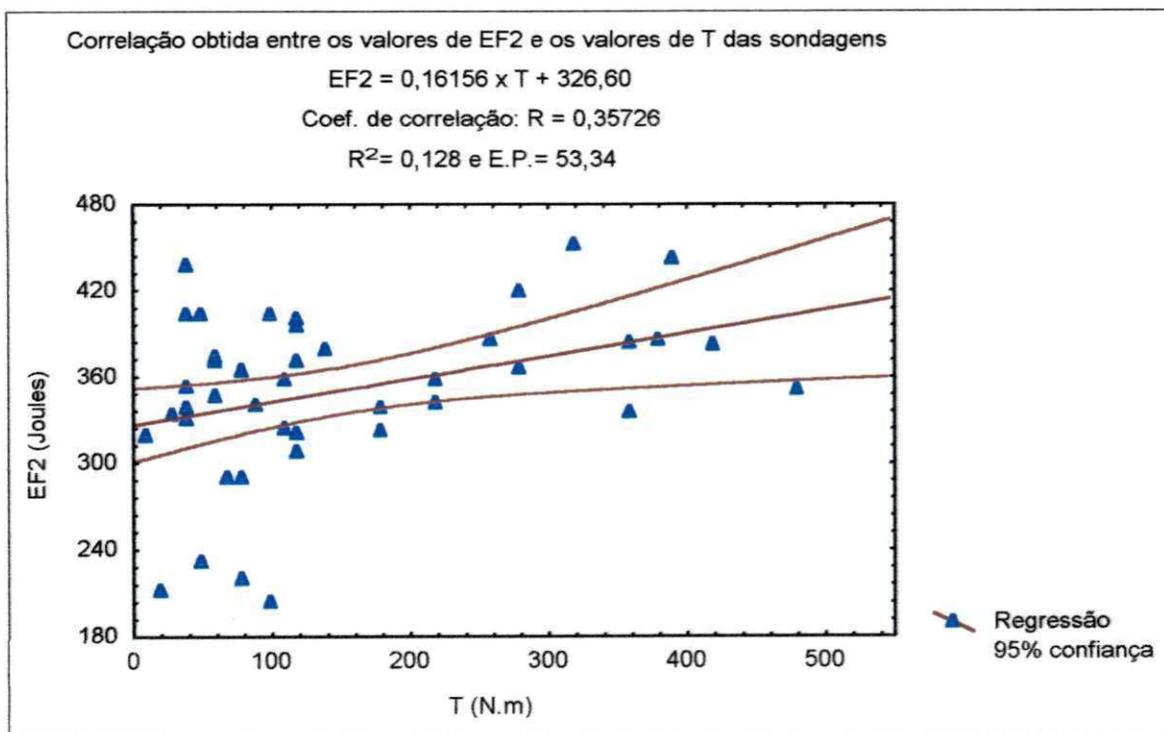


Figura 4.14 Correlação entre os valores de energia obtidos pelo método EF2 e os valores de T, a partir das sondagens realizadas em João Pessoa.

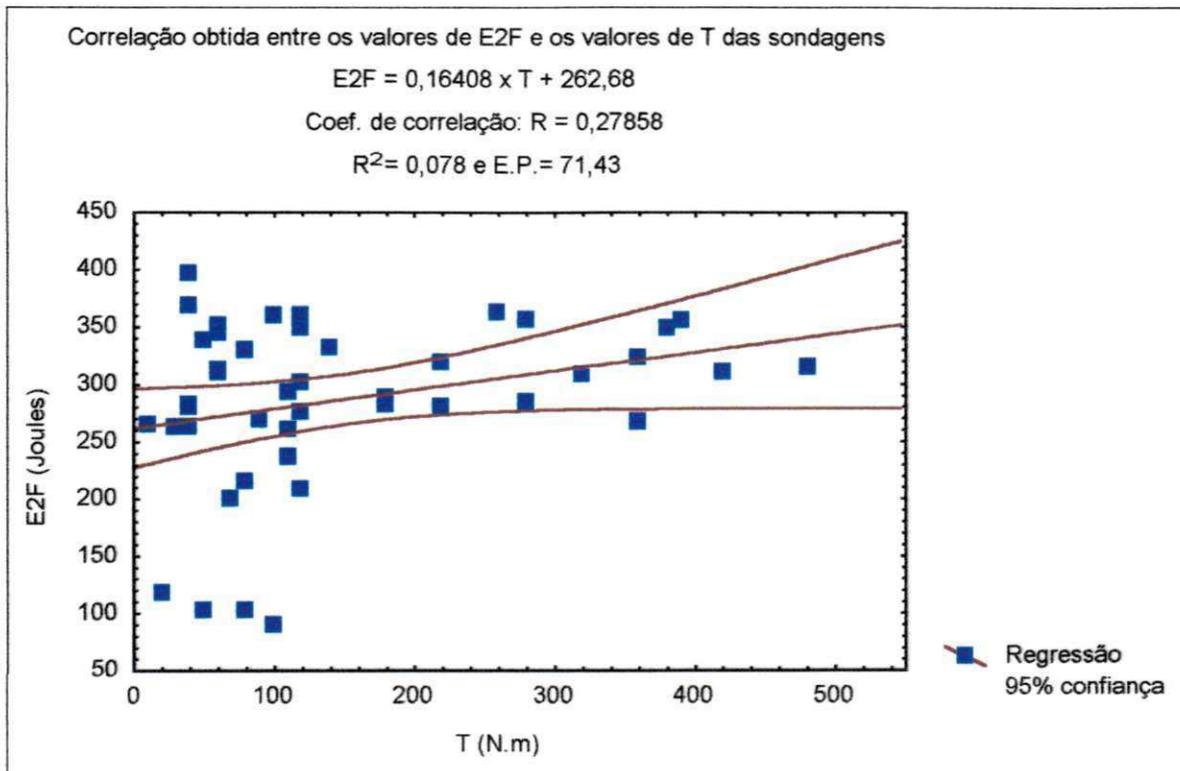


Figura 4.15 Correlação entre os valores de energia obtidos pelo método E2F e os valores de T, a partir das sondagens realizadas em João Pessoa.

4.4.3.4 - Correlações obtidas entre T e a energia obtida através do método EFV

É apresentada na Figura 4.16 a correlação obtida entre os valores do torque e os valores da energia calculada através do método EFV, a partir das sondagens realizadas nas campanhas de ensaios realizadas em João Pessoa.

Observa-se na Figura 4.16 que não existe uma correlação estatística satisfatória entre os valores de energia e os valores de T. Os parâmetros estatísticos obtidos para essa correlação não permitem assegurar um grau de confiabilidade para a correlação, verificando-se apenas uma pequena tendência da energia transferida às hastes diminuir à medida que aumenta o torque medido, da mesma forma que se tentou correlacionar os valores de energia do método EFV com os valores de N_{SPT} . Esta parece ser uma característica inerente ao método EFV, ao passo que quando se analisou as correlações obtidas entre a energia medida a partir de EF2 e E2F ocorreu o contrário, ou seja, o aumento da resistência tende a elevar o valor da energia.

Já num caso típico mostrado na Figura B.24 os parâmetros estatísticos ($R = 0,791$ e $R^2 = 0,626$) dão à correlação obtida entre T e EFV, um razoável grau de confiabilidade quando comparada com as demais correlações obtidas. Sente-se à necessidade então de aumentar a quantidade de dados para melhorar o nível de significância estatístico.

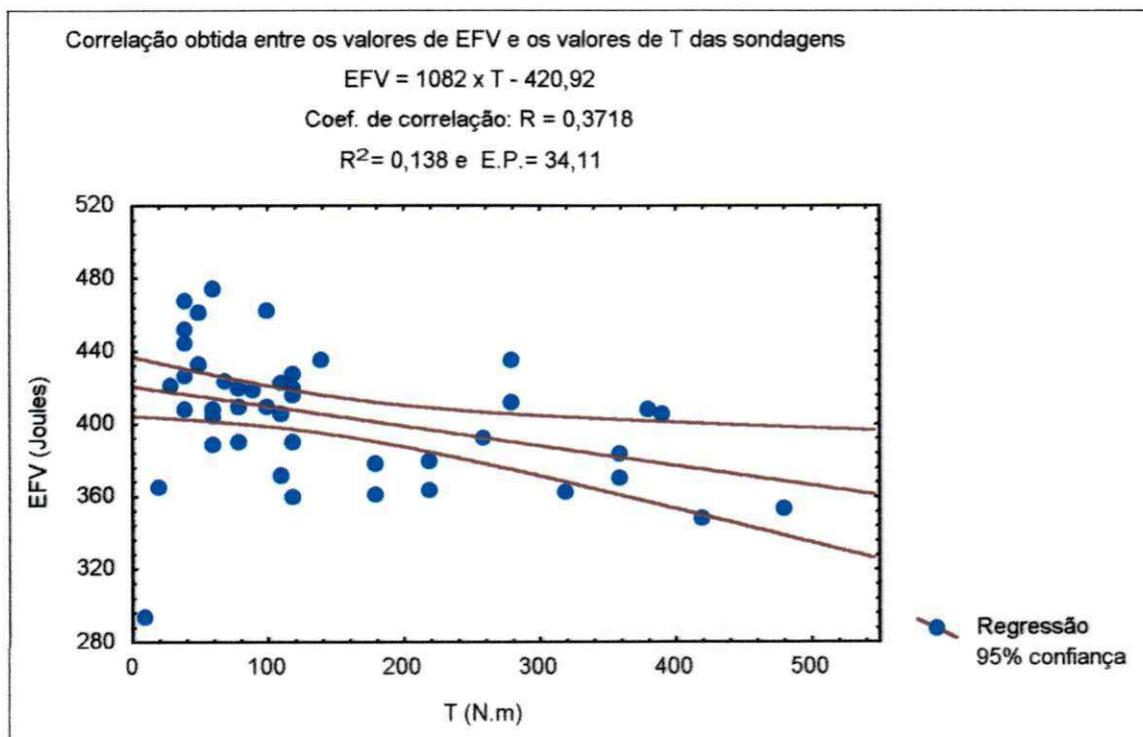


Figura 4.16 Correlação entre os valores de energia obtidos pelo método EFV e os valores de T, a partir das sondagens realizadas em João Pessoa.

4.5 Considerações Finais

Portanto, a partir das comparações efetuadas e das correlações obtidas entre T, N_{SPT} e a energia calculada através dos métodos EF2, E2F e EFV, pode-se concluir que não há correlação estatística satisfatória entre a resistência do solo (em termos de N_{SPT} e T) e EF2 ou E2F. Em alguns casos isolados foi revelada uma ligeira indicação dessas energias aumentarem com o aumento nos valores de T e de N_{SPT} , conforme constatado na sondagem realizada no bairro Renascer (elevatória 14), onde também foi observada uma clara tendência de redução no valor de EFV à medida que N_{SPT} cresceu entre 13 e 59 (ver Figura B.12), bem como, o torque entre 2 e 480 N.m (ver Figura B24).

Dessa forma, não se pode afirmar com base nos dados analisados nesta dissertação que exista uma relação geral associando a resistência (N_{SPT} ou T) do solo à energia transferida às hastes do SPT. Há apenas algumas indicações, passíveis de comprovação através de outros estudos teórico e experimental, que dependendo do método empregado no cálculo da energia pode haver alguma relação.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA

5.1 Conclusões

- A correlação obtida entre os valores do torque (T) e os valores da resistência à penetração (N) foi satisfatória, e a equação obtida apresenta semelhanças com as apresentadas na literatura.
- Os valores do índice de torque (T/N) situaram-se em torno de 7,5 e 18 a partir das cinco sondagens efetuadas. Esta faixa de valores concorda com os índices publicados na literatura para solos brasileiros de origem sedimentar.
- Os valores das energias transferidas às hastes obtidas a partir dos métodos EF2 e E2F apresentaram-se com tendência de crescimento exponencial com o comprimento das hastes, até algo em torno de 14m. Para comprimentos maiores, revelou-se a tendência dos valores permanecerem constantes. Há indicações, passíveis de maior comprovação teórico-experimental, de que EF2 e E2F são influenciadas pela resistência do solo.
- Os valores da energia transferida às hastes obtidos a partir do método EFV não apresentaram tendência de variação com o comprimento das hastes, para a faixa de comprimento e de resistência encontrados nesta pesquisa, ou seja, comprimentos entre 2m e 16m e N entre 2 e 59. Há indicações, passíveis de maior comprovação teórico-experimental, de que o valor de EFV tende a ser maior quando o solo possui pouca resistência.
- Verificou-se através das correlações estatísticas que não existem relações nítidas e satisfatórias entre o SPT (N_{SPT}) e o torque (T) quando relacionados com a energia transferida às hastes. Em alguns casos, onde a resistência N aumentou significativamente

(N entre 13 e 59) percebeu-se uma ligeira tendência dos valores de EF2 e de E2F aumentarem.

- Portanto, a partir das comparações efetuadas e das correlações obtidas entre T, N e a energia calculada através dos métodos EF2, E2F e EFV, pode-se concluir que não há correlação estatística satisfatória entre a resistência do solo (em termos de N e T) e EF2 ou E2F. Em alguns casos isolados foi revelada uma ligeira indicação dessas energias aumentarem com o aumento nos valores de T e de N.
- Considerando que a energia transferida às hastes segundo o método EFV não depende da profundidade na qual o N_{SPT} é medido, e como nas cinco sondagens realizadas não foi obtida correlação estatística satisfatória entre EFV e N ou entre EFV e T (embora a resistência do solo na maioria dos locais crescesse com a profundidade), conclui-se que também a resistência medida não sofre influência do nível de energia nas hastes.

5.2 Sugestões para continuidade da pesquisa

- ✓ Realizar mais ensaios com SPT e com SPT-T na mesma área, bem como em outros solos da região, para que se possa coletar mais dados destes campos experimentais para reforçar os resultados obtidos na presente pesquisa.
- ✓ Aumentar o número de sondagens para obtenção de mais valores de energia transferida às hastes numa mesma profundidade com resistências diferentes para avaliar mais detalhadamente o efeito da resistência na energia transferida.
- ✓ Utilizar, preferencialmente, um torquímetro com maior capacidade, permitindo a medição do torque máximo em solos mais resistentes.
- ✓ Desenvolver um sistema mais acurado para medição do torque, de preferência, utilizando uma célula elétrica instalada nas proximidades do amostrador.

- ✓ Ajustar, em função de um maior banco de dados, formado a partir de um número mais representativo de ensaios com SPT e SPT-T, uma classificação de solos compatível com as características dos solos presentes na região onde foi desenvolvida esta pesquisa.

- ✓ Realizar novos estudos abordando este tema, utilizando ferramentas teóricas que possibilitem a simulação da resistência do solo e do sistema de SPT empregado. Isso permitirá uma investigação mais acurada da existência ou não de relações entre a resistência do solo e a energia transferida às hastes, principalmente em condições extremas (em solos moles e em solos muito resistentes).

CAPÍTULO 6**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ABNT-NBR-6484/01; Solo-Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de Ensaio.
- ABOU-MATAR, H. & GOBLE, G.G. (1999), Closure by Discussion on SPT Dynamic Analysis and Measurements, *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering – ASCE* - vol. 125, N^o 6, pp.535-536.
- ABOU-MATAR, H. & GOBLE, G.G. (1997), SPT Dynamic Analysis and Measurements, *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering – ASCE* - vol. 123, N^o 10, pp. 921-928.
- ADAM, J. (1971), discussion of “The Standard Penetration Test” by V. F. B. de MELLO, *Proceedings, IV Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. III, pp. 82-84.
- ALONSO, U.A. (1994) Correlação entre o atrito lateral medido com o torque e o SPT. *Solos e Rochas, ABMS/ABGE*, Vol. 17, N^o 3, pp. 191-194.
- ALONSO, U. A. (1996) Estimativa da adesão em estacas a partir do atrito lateral medido com o torque no ensaio SPT-T - *Solos e Rochas, ABMS/ABGE*, Vol.19, N^o 3, pp. 81-84.
- AOKI, N. e CINTRA, J. C. A. (2000), The Application of Energy Conservation Hamilton's Principle to the Determination of Energy Efficiency in SPT Tests, *Proceedings of the VI International Conference on the Application of the Stress-Wave Theory to Piles, São Paulo*, volume único, pp. 457-460.
- ASTM D4633-86 (1986), Standard Test Method for Stress Wave Energy Measurement for Dynamic Penetrometer Testing Systems, *ASTM D4633-86, Annual Book of Standards, Seccion 4, 04.08: 943-946* (fora de circulação a partir de 1995).

- BELINCANTA, A. (1998), Avaliação de Fatores Intervenientes no Índice de Resistência à Penetração do SPT, Tese de Doutorado, Escola de São Carlos/USP.
- BELINCANTA, A. (1985), Energia Dinâmica no SPT- Resultados de uma Investigação Teórico-experimental, Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo.
- BELINCANTA, A. & CINTRA, J.C.A. (1998), Fatores Intervenientes em Variantes do Método ABNT para Execução do SPT, Revistas Solos e Rochas, ABMS, São Paulo, 21, (3): pp. 119-133.
- BELINCANTA, A., DIONISI A., MACHADO, J.R.A., ALVIM, F.M., SOBRINHO, R.R., NAVAJAS, S. e TACHIBANA, L.S. (1994a), Medidas da energia Dinâmica no Ensaio SPT, sistema SPT, X COBRMSEF, vol 1, pp. 507-514.
- BELINCANTA, A., NAVAJAS, S. & SOBRINHO, R.R. (1994b), Métodos para Medida de Energia Dinâmica no SPT, Revista Solos e Rochas, 17(2): pp. 93-110.
- BUTLER, J.J. (1997), Analysis of Energy Measurement Methods of SPT Driving Systems, Master Thesis, Utah University State, Logan, Utah (citado por BUTLER et al., 1998).
- BUTLER, J.J., CALIENDO, J.A. & GOBLE, G.G. (1998), Comparison of SPT Energy Measurements Methods, Geotechnical Site Characterization, Atlanta, EUA, v.2, pp. 901-905.
- CARVALHO, D.; PEIXOTO, A.S.P.; FERREIRA, C.V. (1999), Comparações entre os Atritos Laterais Obtidos nos Ensaios SPT-T, CPT e Provas de Carga em Estacas. Solos e Rochas. Vol.22, nº2, pp. 113-123.
- CAVALCANTE, E. H. (1999), Aspecto relativo ao mecanismo da transferência de energia do SPT - Seminário de qualificação acadêmica para o doutorado, COPPE/UFRJ.
- CAVALCANTE, E. H. (2002), Uma pesquisa teórico-experimental sobre o SPT, tese de doutorado, COPPE/UFRJ, em andamento.

- CLAYTON, C.R.I. (1990), SPT Energy Transmission: Theory Measurement and Significance, *Ground Engineering*, 23 (10): pp. 35-43.
- CLOUGH, R.W. & PENZIEN (1975), *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, Inc. (citados por DANZIGER, 1991).
- DANZIGER, B.R. (1991), *Análise Dinâmica de Cravação de Estacas*, Tese de Doutorado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 555p.
- DÉCOURT, L. (1991), Bearing capacity of displacement piles in residual soils on Basis of SPT, *Proc. SEFE II*, Vol.1, pp. 111-119, São Paulo.
- DÉCOURT, L. (1996b) - Investigação, comportamento e instrumentação. *Proc. SEFE III*, Vol. __, pp. 21-32.
- DECOURT, L. (1989), The Standard Penetration Test - State of Art Report: In: *ICSMFE*, XII, vol. 4, Rio de Janeiro.
- DÉCOURT, L. & QUARESMA FILHO, A.R. (1991), The SPT-CF, An improved SPT, *Proc. SEFE II*, Vol.1, pp. 106-110, São Paulo.
- DÉCOURT, L. (1992), SPT in non classical materials – U.S. – Brazil Geotechnical Workshop on Applicability of classical soil mechanics principles to structured soils, Belo Horizonte.
- DÉCOURT, L. & QUARESMA FILHO, A.R. (1994), Practical applications of Standard Penetration Tests complemented by torque measurements, SPT- T; Present stage and future trends. *Proc. of XIII ICSMFE*, Vol. 1, pp. 143-416, New Delli.
- DE MELLO, V.F.B., (1971), The standard penetration - State of the art. *Proc. IV PCSMFE*, Vol.1, pp. 1-86, Puerto Rico.
- DE MELO, V.F.B. (1971), Standard Penetration Test. In: *Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 4, ASCE, Porto Rico, v.1.

- FAIRHURST (1961) “Wave Mechanics of Percussive Drilling”, *Mine & Quarry Engineering*, 27(3), March, pp. 122-130; 27(4), April, pp. 169-178; 27(7), July, pp. 327-328, citado por CAVALCANTE, (1999).
- FARRAR, J.A. (1998), Summary of Standard Penetration Test (SPT) energy measurement experience. In: **International Conference on Site characterization, ISC'98**, Atlanta. Proceeding, vol. 2, pp. 919-926.
- FLETCHER, G.F.A. (1965), Standard Penetration Test: Its Uses and Abuses, *Proc. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division – ASCE* - vol. 91, SM4, pp. 67-75.
- GOBLE, G. & ABOUT-MATAR, H. (1992), Determination of Wave Equation Soil Constants from the Standard Penetration Tests. In: *Proceedings of the fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Netherlands, pp. 99-103.
- HANSKAT, C.S., (1978) “Wave Equation Simulation Of The Standard Penetration Test” - Dissertação de mestrado, apresentada à University of Florida, 1978. apud CAVALCANTE, (1999).
- HVORSLEV, M.J. (1949), *Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purpose*, ASCE, first print.
- IRTP (1988), Technical Committee on Penetration Testing of Soils, Report on Reference Test Procedure, ISOPT-1, vol. 1, pp. 3-26.
- ISOPT (1988), Technical Committee on Testing of Soils, Report on Reference Test Procedure, ISOPT-1, vol. 1, pp. 3-26.
- ISSMFE (1989), Report of the Technical Committee on Penetration Testing of Soils - TC 16 - With Reference Test Procedures – CPT - SPT – DP - WST – International Reference Test Procedure for the Standard Penetration Test (SPT), pp. 17-19.

- KOVACS, W.D., EVANS, J.C. & GRIFFITH, A.H. (1977), Towards a More Standardized SPT, Proc. IX ICSMFE, vol.2, Tokyo, pp. 269-276.
- KOVACS, W.D., GRIFFITH, A.W. & EVANS, J.C. (1978), An Alternative to the Cathead and Rope for the Standard Penetration Test, Geotechnical Testing Journal, vol. 1, Nº 2, Junho, pp.72-81.
- KOVACS, W.D. (1979), Velocity Measurement of Free-Fall SPT Hammer, Journal of the Geotechnical Engineering Division – ASCE – vol.105, pp. 1-10.
- KOVACS, W.D. (1980), What Constitutes a Turn?, Geotechnical Testing Journal, vol. 3, Nº 3, pp. 127-130.
- KOVACS, W.D. (1981), Results and Interpretation of SPT Practice Study, Technical Note, Geotechnical Testing Journal - ASTM - vol. 4, Nº 3, pp. 126-129.
- KOVACS, W.D. & SALOMONE, L.A. (1982), SPT Hammer Energy Measurement, Journal of the Geotechnical Engineering Division – ASCE - Vol. 108, Nº GT4, pp. 599-620.
- KOVACS, W.D. & SALOMONE, L.A. (1984), Closure of Discussion on SPT Hammer Energy Measurements, Journal of Geotechnical Engineering - ASCE - vol. 110, Nº 4, pp.562-563.
- LIKINS G. (2000) comunicação pessoal citado por CAVALCANTE, 2002.
- McLEAN, F. G., FRANKLIN, A. G. & DAHLSTRAND, T. K. (1975), Influence of Mechanical Variables on the SPT, Specialty Conference on the In Situ Measurement of Soil Properties, ASCE, vol. 1, pp. 287-318 (citado por SCHMERTMAN & PALACIOS, 1979).
- MEDEIROS, J.L.G. (1998) Estudo do Comportamento tensão-deformação de um depósito arenoso da cidade de João Pessoa através do pressiômetro de Ménard. Dissertação de mestrado, UFPB, Campina Grande-PB.

- MENEZES, S.M.R. e SOBRINHO, M.D. (1994), Avaliação do Ensaio SPT- Energias, Torques, Impactos, Velocidades e suas Limitações, X COBRAMSEF, vol. 2, pp. 359-366.
- MORGANO, C.M. & LIANG, R. (1992), Energy Transfer in SPT – Rod Length Effect, In: Proceedings of the fourth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Netherlands, pp. 121-127.
- NAKAO, R. (1981), Aplicação da Equação da Onda na Análise do Comportamento de Estacas Cravadas, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ.
- NÁPOLES NETO, A.D.F. (1961), Medida de resistência à penetração dos solos em sondagens de reconhecimento. Estado atual do problema no Brasil e, em particular, no IPT. Relatório interno. São Paulo, IPT.
- OH-OKA, H. (1984), Comparison of SPT N-Values by Cathead-and-Hope Method and Trip Monkey Method, Proc. 19th A. Meet. Jap. Soc. Soil Mech. Fdn. Engng. (citado por TOKIMATSU, 1988).
- PALACIOS, A. (1977), Theory and Measurements of Energy Transfer During Standard Penetration Test Sampling, Ph.D. Thesis, University of Florida, Gainesville, 390 p.
- PALMER, D.J. & STUART, J.G. (1957), Some Observations on the Standard Penetration Test and the Correlations of the Test in-situ with a New Penetrometer, Proc. Of VI ICSMFE, vol.1, Londres, pp. 231-236.
- PEIXOTO, A S.P. & CARVALHO, D. (2000), Torquímetro Elétrico com sistema de Aquisição Automática de Dados para Obtenção da Curva Torque versus Ângulo de Atrito em Ensaio SPT-T, SEFE IV, vol. 3, pp. 81-89- São Paulo-SP.
- RANZINI, S.M.T. (1988), SPTF. Nota técnica. Solos e Rochas, ABMS/ABGE, Vol.11, N.º único pp. 29-30.

- RANZINI, S.M.T. (1994), SPTF - 2.^a parte. Solos e Rochas, ABMS/ABGE, Vol.17, N.º 3, pp. 189-190.
- RANZINI, S.M.T. (1996), Estimativa da adesão em estacas a partir do atrito lateral medido com o torque no ensaio SPT-T - Discussão. Solos e Rochas, ABMS/ABGE, Vol. 19, N.º 3, pp. 247-248.
- RIGGS, C. O. (1984), SPT Hammer Energy Measurements, Discussion, Journal of Geotechnical Engineering - ASCE - vol. 110, N.º 4, pp.555-560.
- RIGGS, C.O., MATHES, G.M. & RASSIEUR, C.L. (1984), A Field Study of an Automatic SPT Hammer System, Geotechnical Testing Journal, ASTM, vol. 7, N.º. 3, pp. 158-163.
- RIGGS, C.O. (1986), North American Standard Penetration Tests Practice: An Essay, Proceedings ASCE, Conference on Use of In-Situ Tests in Geotechnical Engineering, Blacksburg, pp. 949-965.
- SCHMERTMAN, J. H. (1974), Penetration Testing in USA, State-of-the-Art Report, ESOPT-1, vol. 1, pp. 217-218.
- SCHMERTMAN, J.H., (1979), Static of SPT, Journal of the Geotechnical Engineering Division - ASCE - vol. 105, N.º GT5, pp. 655-670.
- SCHMERTMAN, J. H., HARTMAN, J.P & BROWN, P.R. (1978), Improvement Strain Influence Factor Diagrams, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 104, N.º GT8, pp. 1131-1135.
- SCHMERTMAN, J. H. & PALACIOS. A. (1979), Energy Dynamics of SPT, journal of the Geotechnical Engineering Division – ASCE – vol. 105, N.º GT8, pp. 909-926.
- SCHMERTMAN, J.H., SMITH, T.V. & HO, R. (1978), Example of an Energy Calibration Report for a D-1586 (SPT) Drilling, Technical Note - ASTM – Geotechnical Testing Journal, vol.1, N.º 1, Março, pp.57-62.

- SEED, H.B., TOKIMATSU, K., HARDER, L.F. & CHUNG, R.M. (1985), Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resultance Evaluations, *Journal of Geotechnical Engineering – ASCE* - vol. 111, Nº 12, pp. 1425-1445.
- SEROTA, S. & LOWTHER, G. (1973), SPT Practice Meets Critical Review, *Ground Engineering*, vol. 6, Nº 1, pp. 20-22.
- SKEMPTON, A.W. (1986), Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Aging and Overconsolidation, *Geotechnique*, vol. 36, Nº 3, pp. 425-447.
- SMITH, E.A.L. (1960), Pile-Driving Analysis by the Wave Equation, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the ASCE*, vol. 86, Nº SM4, August, pp. 35-61.
- SOARES, J. M. (1999), Emprego do SPT-T e Pressiômetro Ménard em um Depósito Arenoso da Região de João Pessoa. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande- PB.
- SUDENE (1978), Inventário Hidrológico Básico do Nordeste, Folha Nº 16 – Paraíba, pp. 54-60, Recife – PE.
- SUDENE (1972), Levantamento exploratório - Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba, vol. I, pp. 9-16, Rio de Janeiro - RJ.
- TEIXEIRA, A. H. (1974), A Padronização de Sondagens de Simples Reconhecimento Anais do 5º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, vol. 3, pp. 1-22.
- TEIXEIRA, A. H. (1977), Sondagens: Metodologia, Erros mais Comuns, Normas de Execução, Anais do 1º Simpósio de Prospecção do Subsolo, ABMS – Núcleo Nordeste, Recife, pp. 41-61.
- TEIXEIRA, A. H. (1993), Um Aperfeiçoamento das Sondagens de Simples Reconhecimento à Percussão, Solos do Interior de São Paulo, Capítulo 4, ABMS, USP/SC, pp. 75-93.

- TERZAGHI, K. & PECK, R.B. (1948), Soil Mechanics in Engineering Practice, John Willey & Sons, New York.
- TERZAGHI, K., PECK, R.B. & MESRI, G. (1996), Soil Mechanics in Engineering Practice, John Willey & Sons, New York, Third Edition.
- TIMOSHENKO, S. & GOODIER, J. N. (1970), “Theory of Elasticity”, Rc.Graw-hill; 3 edição, 1970.
- TOKIMATSU, K. (1988), Penetration Tests for Dynamic Problems - Penetration Testing – ISOPT-1, J. DE RUITER Ed., pp. 117-136.
- VARGAS, M. (1989), “Heritage Lecture”: Soil Mechanics in Brazil, XII ICSMFE, vol. 4, pp. 2289 – 2299, Rio de Janeiro.
- VICENTE, F. A. (2000), SPT: Necessidade da Utilização da Padronização e Correlações – SEFE IV – Vol. 3, pp.101-112.
- VELLOSO, D. A. e LOPES, F. de R. – Fundações, 2ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1997.

APÊNDICE A

Tabela A1 – Valores de energia e de sua eficiência obtidos do ensaio SPT com o SPT ANALYZER e do SPT-T no bairro de Mandacaru, área metropolitana de JP.

FURO 01						ENERGIA							EFICIÊNCIA					
						EF2		E2F		EFV		Teórica	ETREF2		ETRE2F		ETREFV	
Comp. Total (m)	Quat. De Golpes	Alt. de queda (cm)	N	Torque (N.m)	T/N	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)	E ⁻ (Joules)	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)
2,49	7	75	2	20	10	212,33	7,87	118,83	8,52	365,17	69,71	478,24	44,40	1,64	24,85	1,78	76,36	14,58
5,49	3	75	3	40	13,3	331,33	27,15	264,33	23,63	408,33	44,74	478,24	69,28	5,68	55,27	4,94	85,38	9,35
6,47	21	75	13	110	8,5	359,24	99,01	262,76	22,11	372	30,99	478,24	75,12	20,70	54,94	4,62	77,79	6,58
7,38	33	75	23	220	9,6	341,73	17,7	281,97	16,16	364,58	20,31	478,24	71,46	3,70	58,96	3,38	76,23	4,25
8,35	20	75	15	180	12,0	322,4	24,23	284,1	20,31	362,15	27,44	478,24	67,41	5,07	59,41	4,25	75,73	5,74
9,40	31	75	19	360	18,9	384,26	48,29	323,94	27,02	383,94	33,81	478,24	80,35	10,10	67,74	5,65	80,28	7,07
10,40	33	75	23	280	12,2	386,12	35,48	349,7	38,68	408,91	38,68	478,24	80,74	7,42	73,12	6,76	85,50	8,09
11,40	43	75	33	420	12,7	382,45	55,51	311,6	22,69	348,38	27,11	478,24	79,97	11,61	65,16	4,75	72,85	5,67
12,40	36	75	30	390	13,0	443,36	56,03	356,69	36,62	405,53	42,01	478,24	92,71	11,71	74,58	7,66	84,80	8,78

Tabela A2– Valores de Energia e de sua Eficiência obtidos do Ensaio SPT com o SPT ANALYZER e do SPT-T no bairro de Mandacaru, área metropolitana de JP.

FURO 02						ENERGIA						EFICIÊNCIA						
						EF2		E2F		EFV		Teórica	ETREF2		ETRE2F		ETREFV	
Comp. Total (m)	Quat. De Golpes	Alt. de queda (cm)	N	Torque (N.m)	T/N	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)	E ⁻ (Joules)	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)
5,38	6	75	3	30	10	334,17	25,09	265,17	20,49	421,67	26,18	478,24	71,97	5,25	55,45	4,28	88,17	5,47
6,43	1	75	1	10	10	320	-	266	-	294	-	478,24	66,91	-	55,62	-	61,48	-

Tabela A3– Valores de Energia e de sua Eficiência obtidos do Ensaio SPT com o SPT ANALYZER e do SPT-T no bairro do Bessa, área metropolitana de JP.

FURO 03						ENERGIA							EFICIÊNCIA					
						EF2		E2F		EFV		Teórica	ETREF2		ETRE2F		ETREFV	
Comp. Total (m)	Quat. De Golpes	Alt. de queda (cm)	N	Torque (N.m)	T/N	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)	E ⁻ (Joules)	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)
2,34	15	75	11	100	9,09	205,14	34,63	90,29	16,75	410,29	32,77	478,24	42,90	7,24	18,88	3,50	85,79	6,85
4,36	13	75	11	110	10,00	324,67	10,98	238,31	11,24	406,08	11,71	478,24	67,89	2,30	49,30	2,35	84,91	2,45
5,33	16	75	13	280	21,54	366,38	20,76	285,44	16,38	412,31	21,18	478,24	76,61	4,34	59,69	3,42	86,21	4,33
6,33	28	75	18	360	20,00	335,75	24,1	268,36	20,9	370,43	26,59	478,24	70,21	5,04	56,11	4,37	77,46	5,56
7,33	6	75	3	50	16,67	403,63	22,67	339,67	22,05	461,33	27,18	478,24	84,41	4,74	71,03	4,61	96,46	5,68
8,33	26	75	19	120	6,32	371,15	32,01	303,12	26,27	390,5	32,41	478,24	77,61	6,69	63,38	5,49	81,65	6,78
9,34	25	75	19	280	14,74	419,8	14,75	357,52	12,73	436,24	15,99	478,24	87,78	3,08	74,76	2,66	91,22	3,34
10,34	9	75	6	120	20,00	395,56	17,43	350,67	14,2	416,33	33,61	478,24	82,71	3,64	73,33	2,97	87,06	7,03
11,04	11	75	6	120	20,00	400,82	22,34	362	21,98	420,36	25,32	478,24	83,81	4,67	75,69	4,60	87,90	5,30
12,39	6	75	4	80	20,00	364,17	20,73	330,67	19,46	389,83	25,84	478,24	76,15	4,33	69,14	4,07	81,51	5,40

Tabela A4 – Valores de Energia e de sua Eficiência obtidos do Ensaio SPT com o SPT ANALYZER e do SPT-T no bairro do Bessa, área metropolitana de JP.

FURO 04						ENERGIA							EFICIÊNCIA					
						EF2		E2F		EFV		Teórica	ETREF2		ETRE2F		ETREFV	
Comp. Total (m)	Quat. De Golpes	Alt. de queda (cm)	N	Torque (N.m)	T/N	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)	E ⁻ (Joules)	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)
2,36	6	75	4	80	20,00	221,31	23,86	103,54	15,33	410,38	27,47	478,24	46,28	4,99	21,65	3,21	85,81	5,74
4,38	12	75	10	120	12,00	308,42	20,97	209,75	13,44	427,83	25,17	478,24	64,49	4,38	43,86	2,81	89,46	5,26
5,33	17	75	15	40	2,67	354,18	10,17	283,88	12,34	452,94	13,06	478,24	74,06	2,13	59,36	2,58	94,71	2,73
6,68	11	75	8	40	5,00	338,91	35,16	280,91	32,82	427,09	29,18	478,24	70,87	7,35	58,74	6,86	89,31	6,10
7,37	5	75	9	60	6,67	372,4	23,45	313,4	18,98	475	22,11	478,24	77,87	4,90	65,53	3,97	99,32	4,62
8,37	S/R	75	-	20	-	-	-	-	-	-	-	478,24	-	-	-	-	-	-
9,39	11	75	9	140	15,56	378,82	35,15	333,36	30,89	436,09	32,78	478,24	79,21	7,35	69,71	6,46	91,19	6,85
10,39	6	75	4	100	25,00	404,6	6,07	360,6	6,43	462,75	9,54	478,24	84,60	1,27	75,40	1,34	96,76	1,99
11,36	9	75	7	60	8,57	346,44	23,18	310,89	21,19	388,78	26,63	478,24	72,44	4,85	65,01	4,43	81,29	5,57
12,36	10	75	8	40	5,00	437,5	10,9	397,75	9,47	468	9,15	478,24	91,48	2,28	83,17	1,98	97,86	1,91
13,36	7	75	5	40	8,00	403,17	13,93	371,17	12,78	445,17	16,56	478,24	84,30	2,91	77,61	2,67	93,09	3,46
14,36	7	75	5	60	12,00	370,71	32,19	346,43	30,08	405,14	32,92	478,24	77,52	6,73	72,44	6,29	84,72	6,88
15,36	9	75	7	60	8,57	374,25	12,23	352,75	11,66	408,13	12,94	478,24	78,26	2,56	73,76	2,44	85,34	2,71
16,38	21	75	16	260	16,25	385,67	28,72	363,95	27,47	392,95	27,27	478,24	80,64	6,01	76,10	5,74	82,17	5,70

Tabela A5– Valores de Energia e de sua Eficiência obtidos do Ensaio SPT com o SPT ANALYZER e do SPT-T no bairro Renascer , área metropolitana de JP.

FURO 05						ENERGIA							EFICIÊNCIA					
						EF2		E2F		EFV		Teórica	ETREF2		ETRE2F		ETREFV	
Comp. Total (m)	Quat. De Golpes	Alt. de queda (cm)	N	T (N.m)	T/N	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)	E ^r (Joules)	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)	Média (Joules)	δ (%)
2,35	15	75	7	50	7,14	231,29	20,98	103,93	10,79	433,5	47,24	478,24	48,36	4,39	21,73	2,26	90,65	9,88
4,36	6	75	5	70	14,00	290,5	24,43	201,17	19,99	424,67	27,46	478,24	60,74	5,11	42,06	4,18	88,80	6,41
5,40	7	75	5	80	16,00	291	23,87	217,29	18,02	420,57	38,17	478,24	60,85	4,99	45,44	3,77	87,94	7,98
6,40	10	75	8	90	11,25	341	20,69	271	16,49	419	25,18	478,24	71,30	4,33	56,67	3,45	87,61	5,27
7,42	15	75	13	110	8,46	358,93	24,39	295,33	20,18	422,87	25,7	478,24	75,05	5,10	61,75	4,22	88,42	5,37
8,42	25	75	19	120	6,32	321,72	25,56	277,68	31,33	360,76	26,27	478,24	67,27	5,35	58,06	6,55	75,44	5,49
9,40	29	75	23	180	7,83	339,21	33,13	289,21	17,74	378,41	20,53	478,24	70,93	6,93	60,47	3,71	79,13	4,29
10,40	27	75	24	220	9,17	358,56	17,99	320,48	16,27	380,59	14,18	478,24	74,98	3,76	67,01	3,40	79,58	2,96
11,37	51	75	42	320	7,62	452,16	137,44	308,58	17,32	363,31	20,93	478,24	94,55	28,74	64,52	3,62	75,97	4,58
12,37	75	75	59	480	8,14	351,65	41,7	316,56	16,22	354,31	18,39	478,24	73,53	8,72	66,19	3,39	74,09	3,85

APÊNDICE B

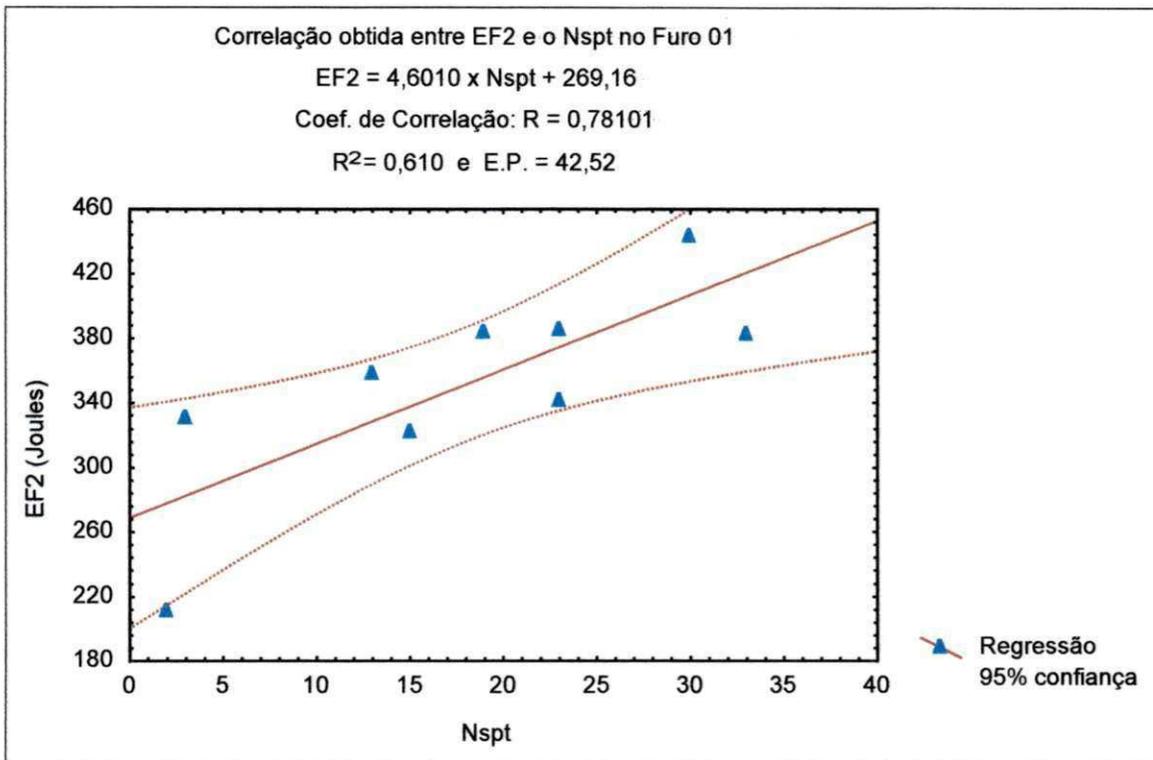


Figura B.1 Correlação entre EF2 e N_{SPT} para a sondagem 1, efetuada no bairro de Mandacaru.

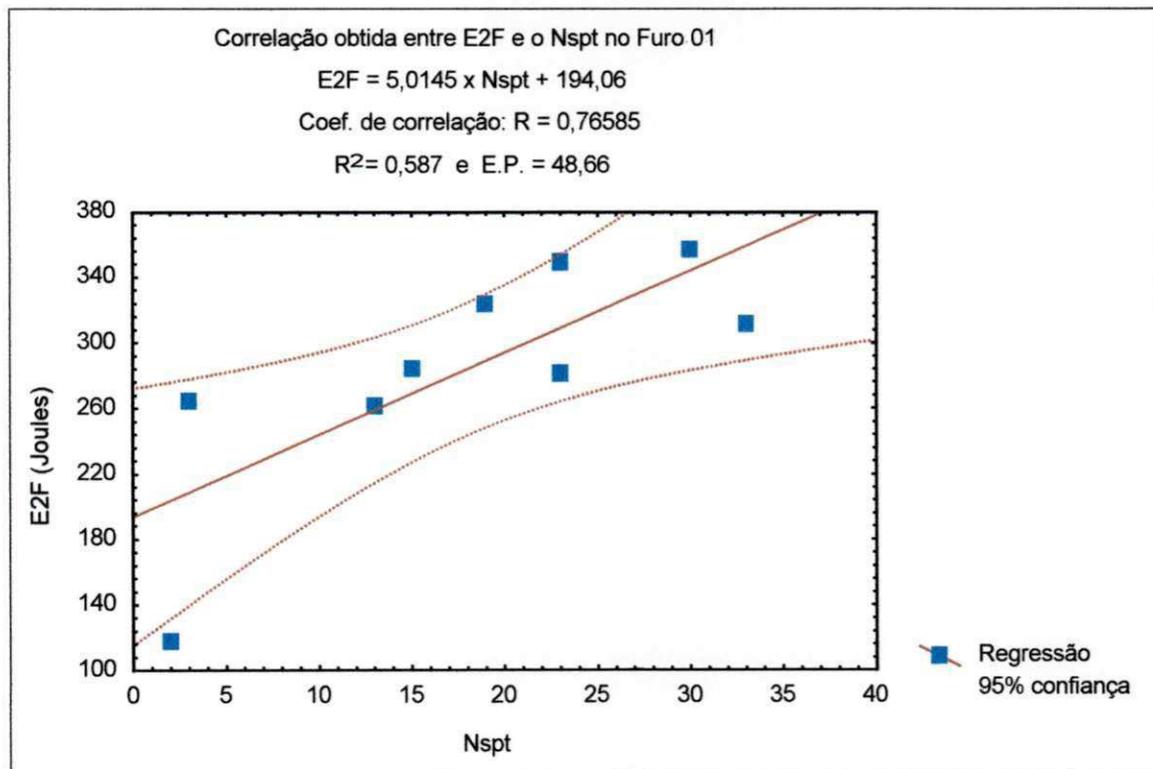


Figura B.2 Correlação entre E2F e N_{SPT} para a sondagem 1, efetuada no bairro de Mandacaru.

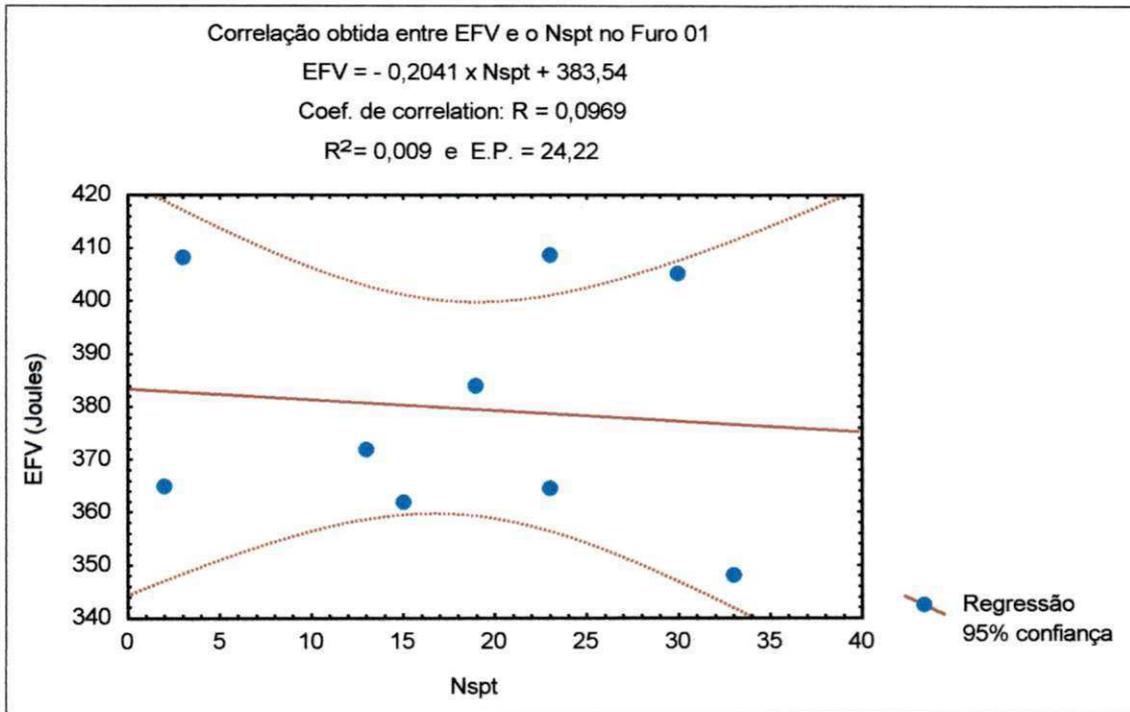


Figura B.3 Correlação entre EFV e N_{SPT} para a sondagem 1, efetuada no bairro de Mandacaru.

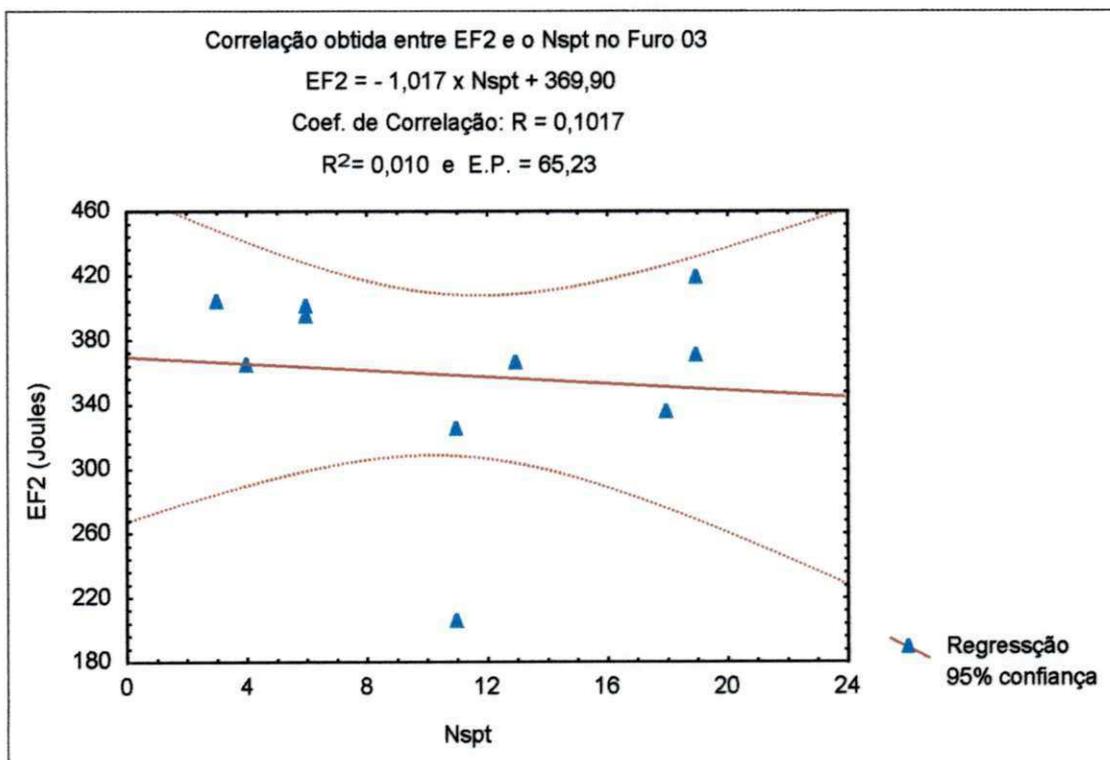


Figura B.4 Correlação entre EF2 e N_{SPT} para a sondagem 3, efetuada no bairro do Bessa, no terreno da ATECEL.

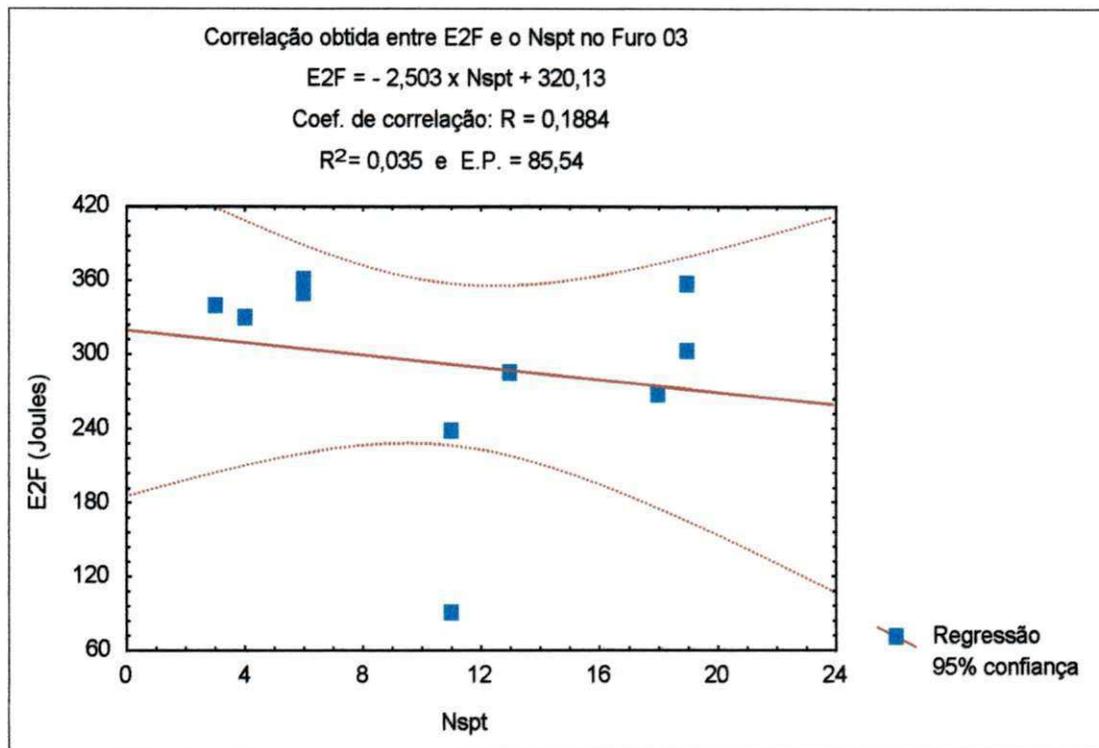


Figura B.5 Correlação entre E2F e N_{SPT} para a sondagem 3, efetuada no bairro do Bessa, no terreno da ATECEL.

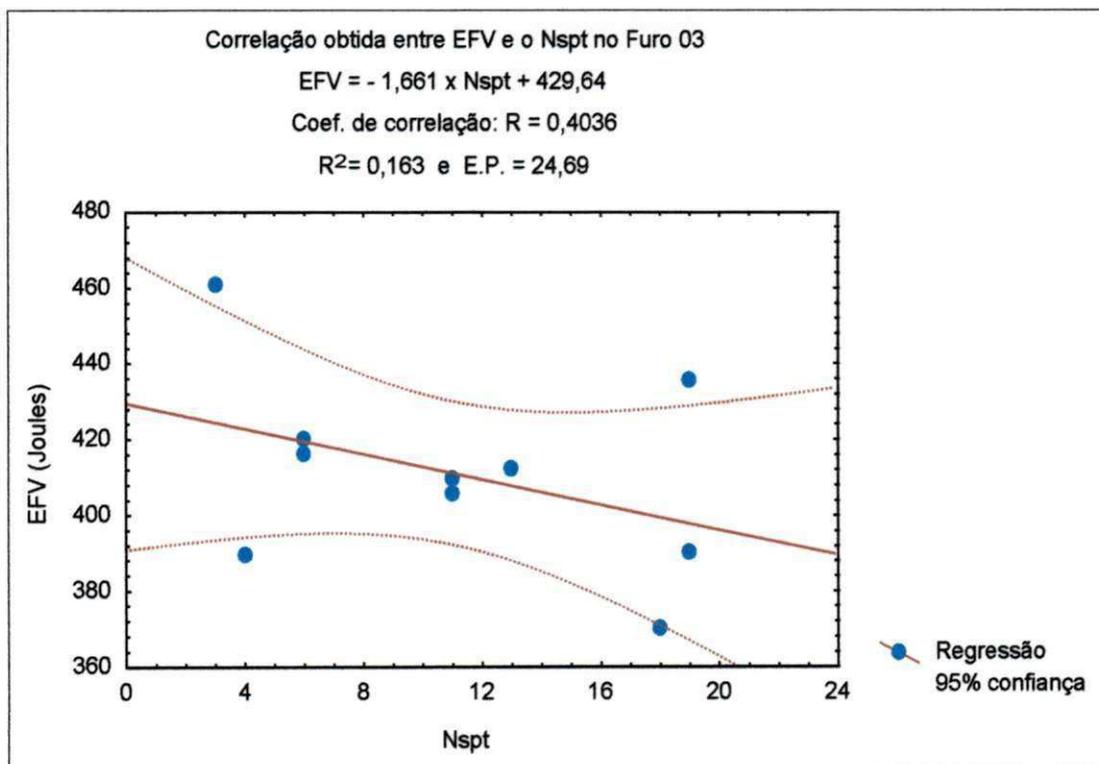


Figura B.6 Correlação entre EFV e N_{SPT} para a sondagem 3, efetuada no bairro do Bessa, no terreno da ATECEL.

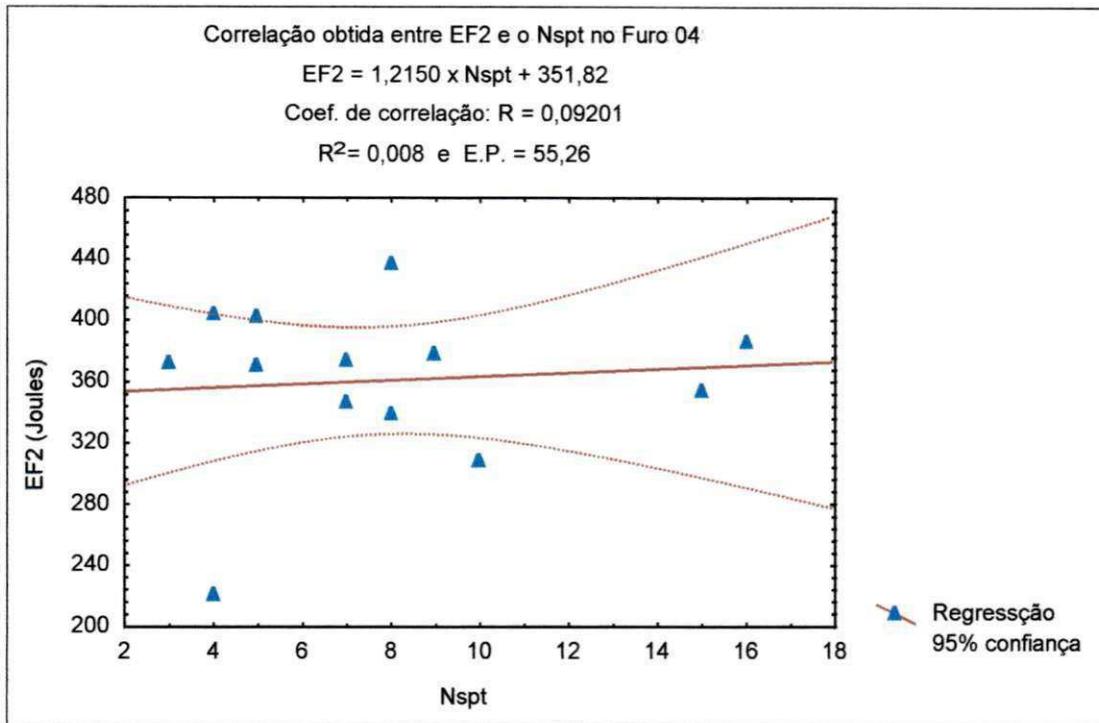


Figura B.7 Correlação entre EF2 e N_{SPT} para a sondagem 4, efetuada no bairro do Bessa, Elevatória 15.

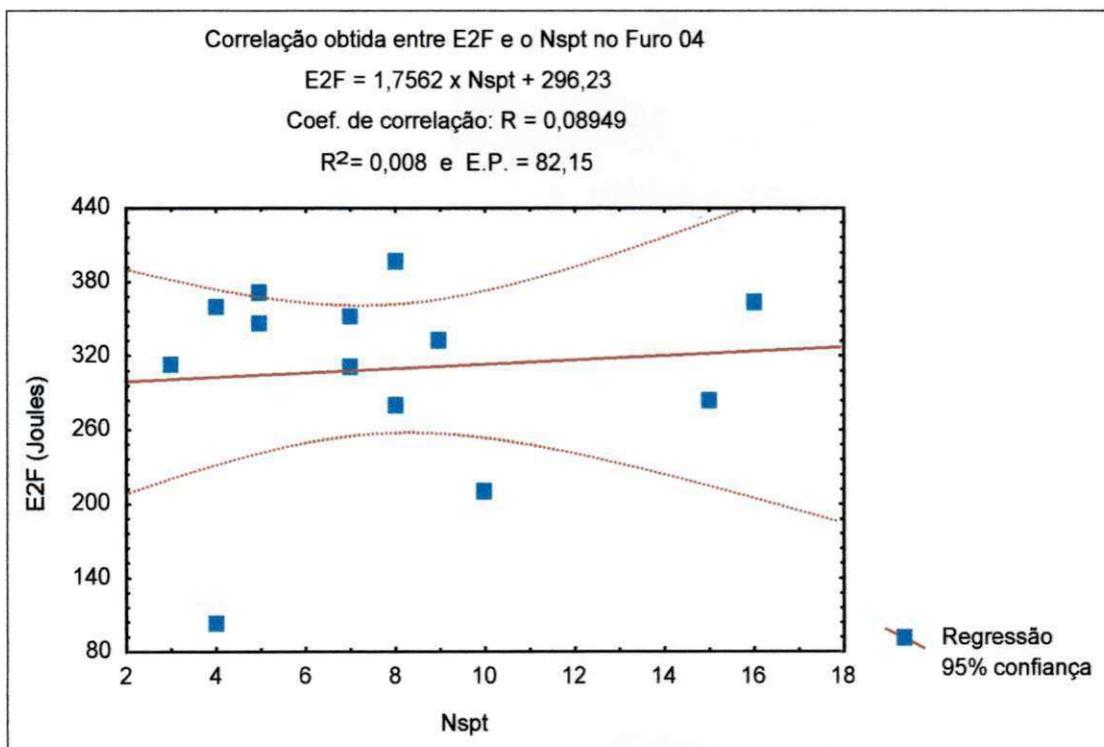


Figura B.8 Correlação entre E2F e N_{SPT} para a sondagem 4, efetuada no bairro do Bessa, Elevatória 15.

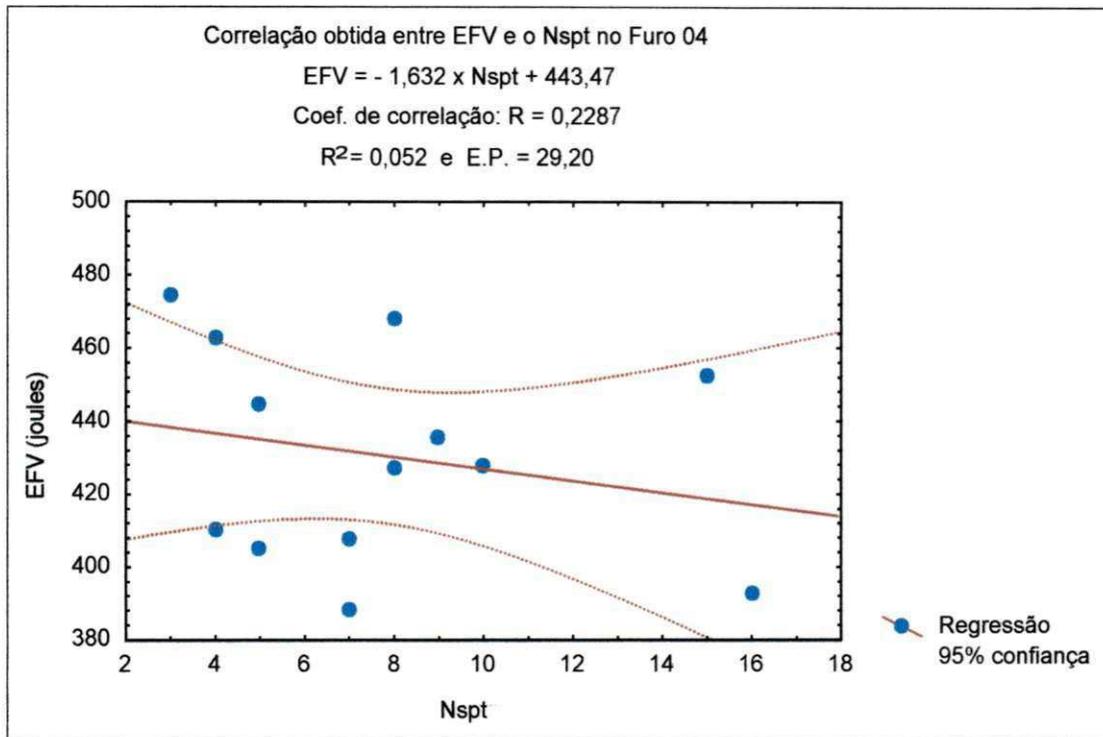


Figura B.9 Correlação entre EFV e N_{SPT} para a sondagem 4, efetuada no bairro do Bessa, Elevatória 15.

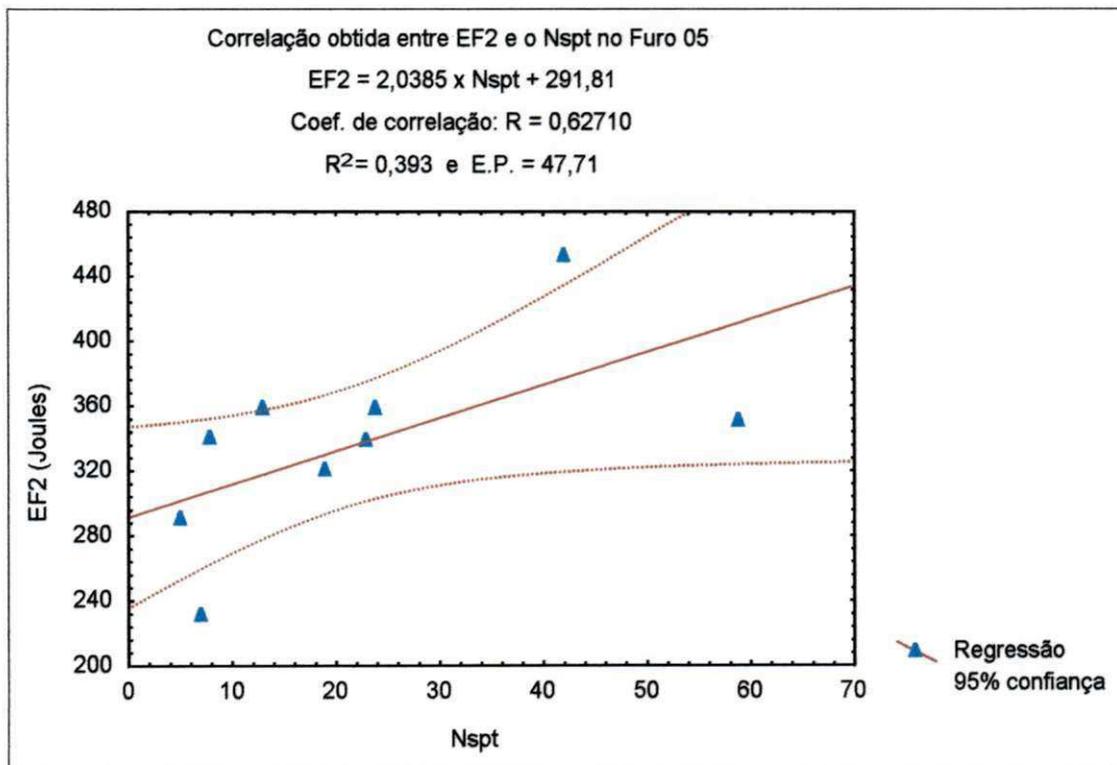


Figura B.10 Correlação entre EF2 e N_{SPT} para a sondagem 5, efetuada no bairro Renascer, Elevatória 14.

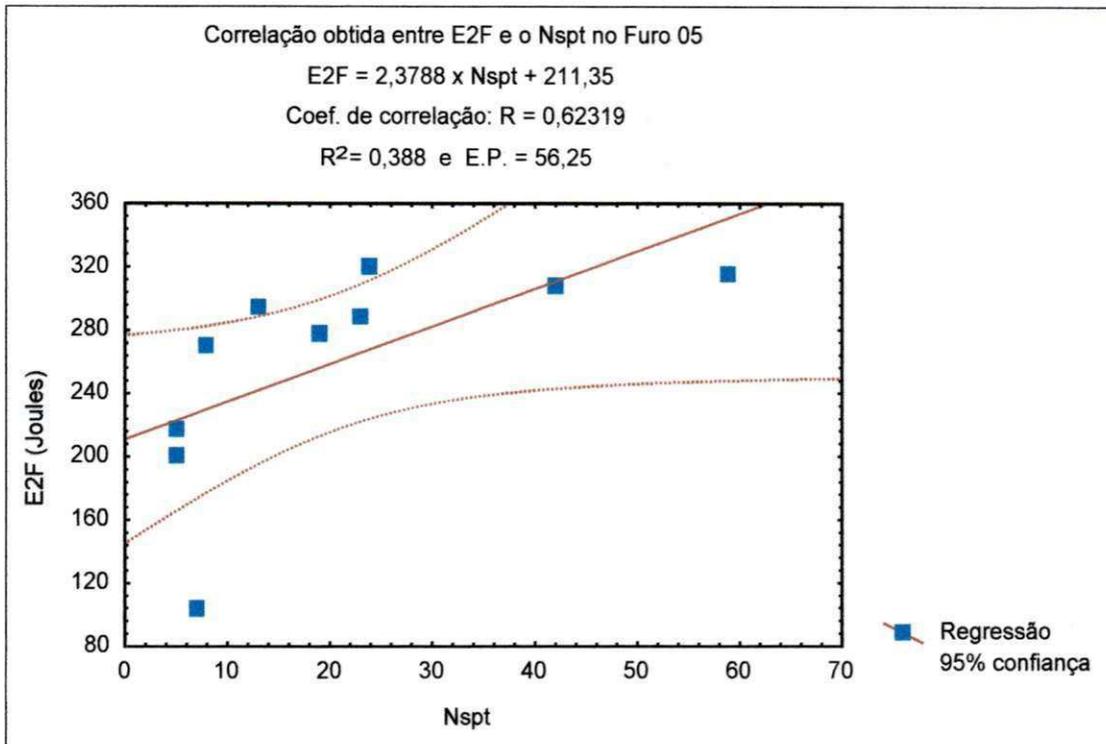


Figura B.11 Correlação entre E2F e N_{SPT} para a sondagem 5, efetuada no bairro Renascer, Elevatória 14.

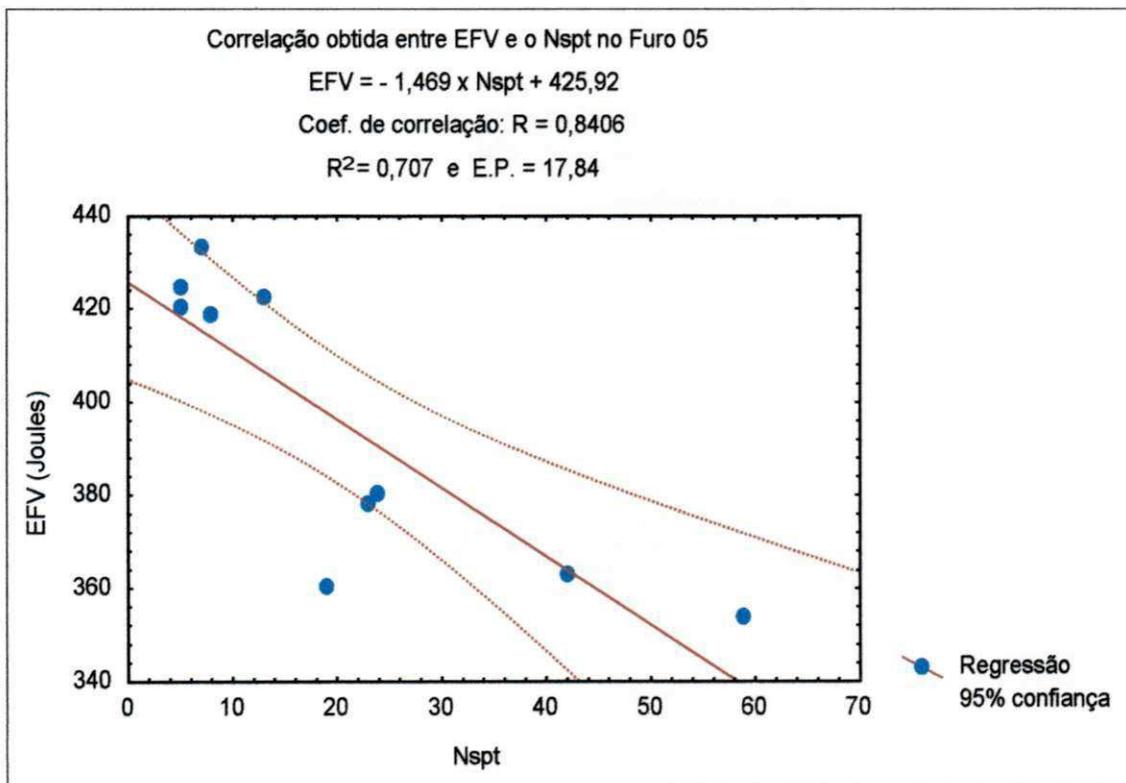


Figura B.12 Correlação entre EFV e N_{SPT} para a sondagem 5, efetuada no bairro Renascer, Elevatória 14.

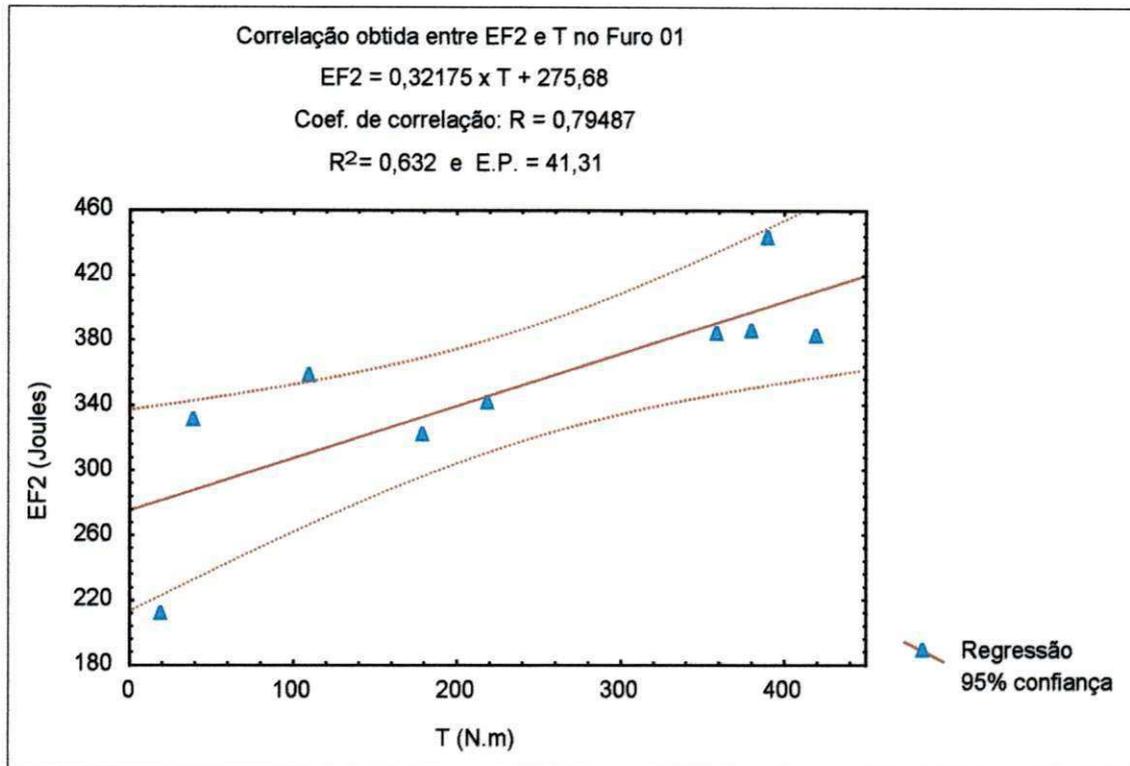


Figura B.13 Correlação entre EF2 e o torque para a sondagem 1, efetuada no bairro de Mandacaru.

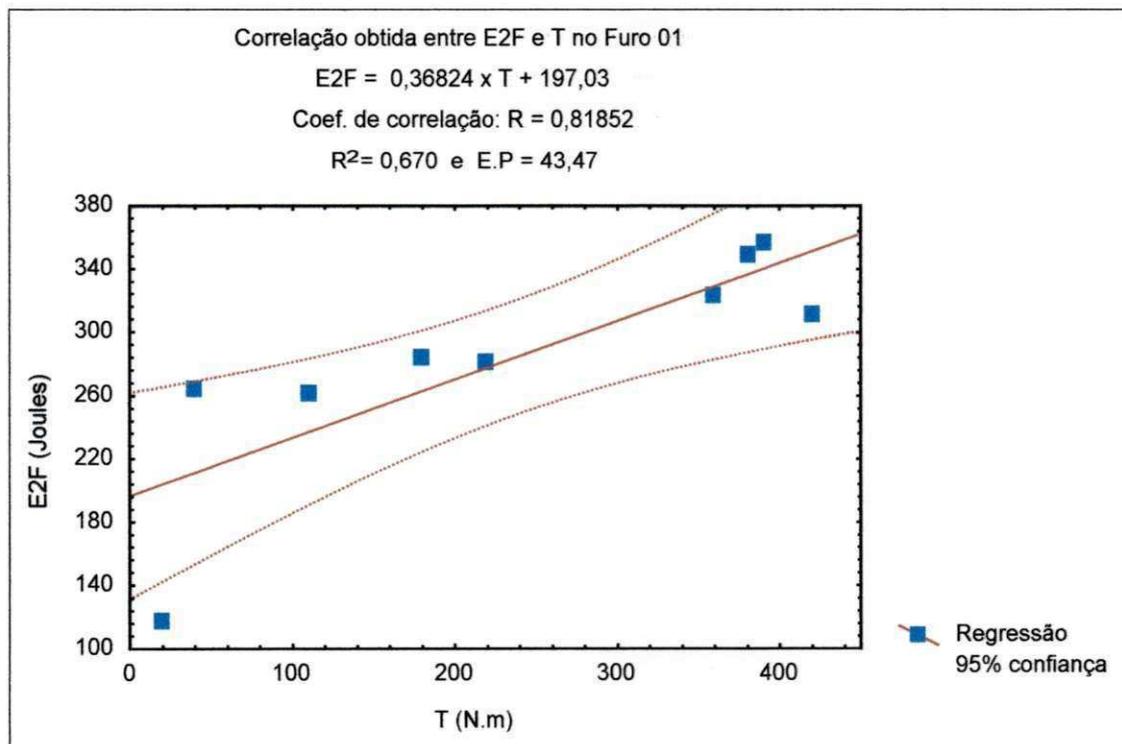


Figura B.14 Correlação entre EF2 e o torque para a sondagem 1, efetuada no bairro de Mandacaru.

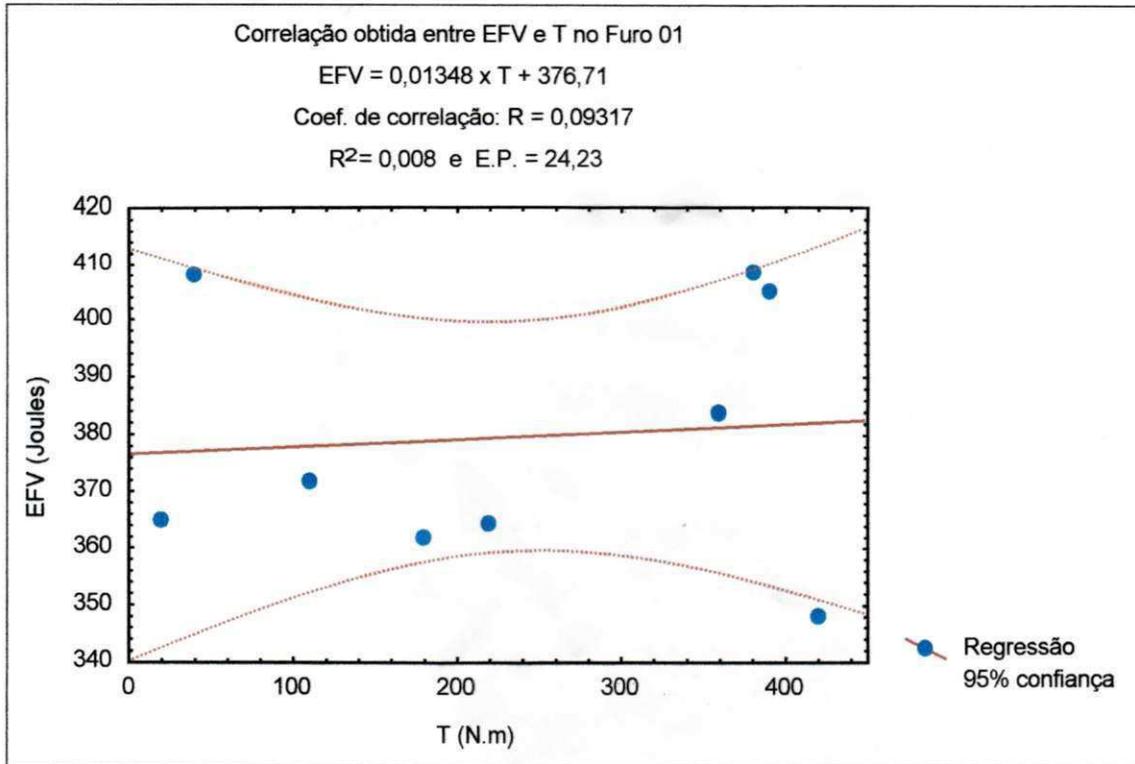


Figura B.15 Correlação entre EFV e o torque para a sondagem 1, efetuada no bairro de Mandacaru.

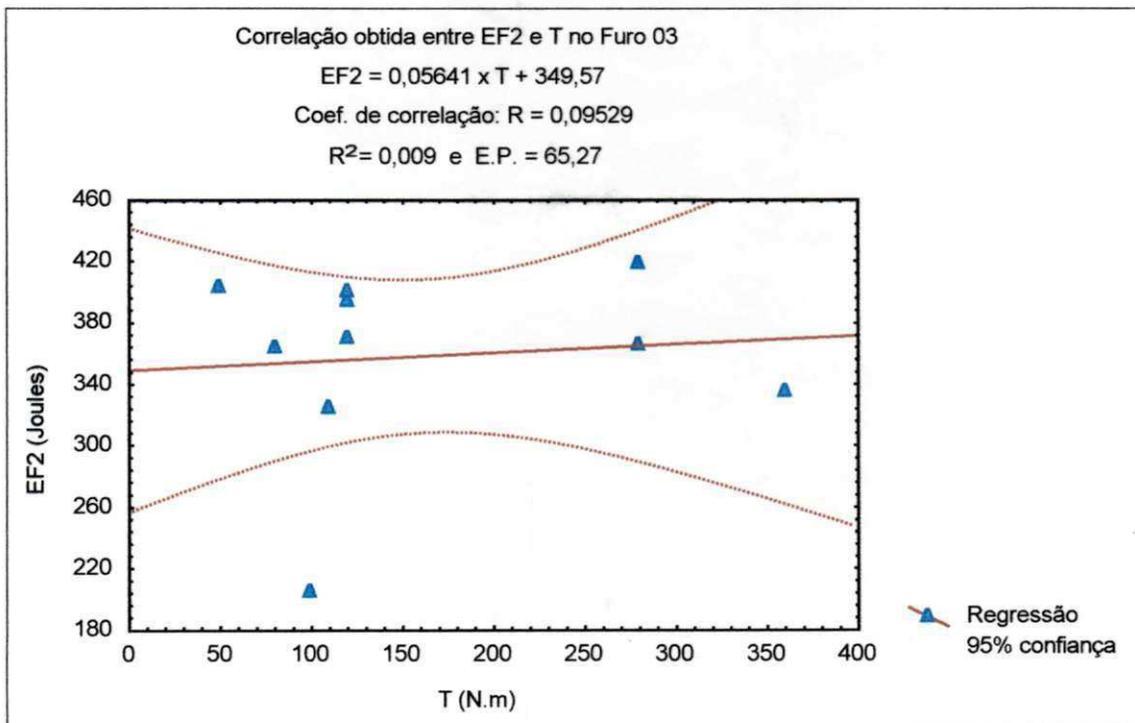


Figura B.16 Correlação entre EF2 e T para a sondagem 3, efetuada no bairro do Bessa, terreno da ATECEL.