Campus de São Carlos

Avaliação de fatores intervenientes no índice
de resistência à penetração do SPT
Volume 1

Antonio Belincanta

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

AVALIAÇÃO DE FATORES INTERVENIENTES NO ÍNDICE DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DO SPT

Volume 1

Antonio Belincanta

Tese apresentada à Escola de engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil: Geotecnia.

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Carlos A. Cintra

São Carlos
1998

DEDALUS - Acervo - EESC

31100016619

Class.	TESE
Cutt.	0746 V.1
Tombo	0253198

0999014

B431a

Belincanta, Antonio

Avaliação de fatores intervenientes no índice de resistência à penetração do SPT / Antonio Belincanta. São Carlos, 1998.

2v.

Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.

Orientador : Prof Dr. José Carlos A. Cintra

1. Fundações. 2. SPT. I. Título

AGRADECIMENTOS

O autor agradece às empresas e a todos os colegas e técnicos que viabilizaram a obtenção e análise destes dados, esperando que as informações técnicas, aqui contidas, façam-se de elevada utilidade e, desta maneira, constituam-se na verdadeira contrapartida do que de tão precioso anteriormente se recebeu.

Ao Prof. Dr José Carlos A. Cintra, pelo apoio e orientação.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo pelo apoio e incentivo dado através de seus pesquisadores, em especial Rubens Ramires Sobrinho, Flávio Mascaro Alvim e José Roberto Alves Machado.

Ao Dr Sussumu Niyama, pelo incentivo e apoio despendido.

Ao Engenheiro Luciano Décourt, que através de sua dedicação, paciência e seu saber tanto tem contribuído com este trabalho e para meu conhecimento.

Ao colega Artur R. Quaresma Filho que tem viabilizado dados muito preciosos, contidos e analisados neste trabalho.

Aos colegas Antonio Luciano Fonseca, Divonzir Magalhães, Gilnei Carneiro Bertoncin, por estarem presentes nas etapas em que foram exigidos.

Aos professores Carlos José M. Costa Branco, Dr. David de Carvalho, José V. Nery Filho e Dr. Renato P. Cunha, pela colaboração despendida.

Aos colegas de Pós-graduação da Escola de Engenharia de São Carlos, em especial Benedito J. I. Cameiro, Wilson Conciani e Nilton de Souza Campelo, entre outros.

À Universidade Estadual de Maringá, em especial, Prof^{es} Nelci H. M. Gutierrez e Marcela Z. Meneguetti, Prof^{es} José Wilson Assunção, Roberto Lopes Ferraz e Yoshiaki Fukushigue, meus agradecimentos.

Ao colega Juan Carlo Calo, pelo envio cuidadoso e precioso de dados técnicos do SPT argentino.

Aos colegas e amigos Sandoval Junqueira, Tânia M. C. Junqueira e ao pequeno João Pedro, por viabilizarem os trabalhos em São Paulo.

A todos, muito abrigado.

à memória de meus pais
à Ivani Ana, Juliana e
Mariana, esposa e filhas

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS E FOTOS	i
LISTA DE TABELAS	iv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	x
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 Breve relato histórico do SPT	6
2.2 SPT no Brasil.	17
2.3 Fases importantes da história nacional e internacional do SPT	28
2.4 Fatores intervenientes no SPT	31
2.5 Fatores referentes ao solo	49
2.6 Mecanismo de transferência de energia dinâmica no ensaio SPT	51
2.7 Alguns princípios a serem observados em correlações em geotecnia	58
2.8 SPT com medida de torque (SPT-T)	60
2.9 Fatores de correção de N do SPT para uso em projeto	68
3 SISTEMA ADOTADO PARA REGISTRO DE EVENTOS DINÂMICOS NO SPT E PARA CÁLCULO DA RESPECTIVA ENERGIA, TRANSFERIDA ÀS HASTES NA PRIMEIRA ONDA DE COMPRESSÃO INCIDENTE.	76
3.1 Introdução	76
3.2 Transdutores de deformação (célula de carga)	76
3.3 Módulo de tratamento e condicionamento de sinais	77
3.4 Módulo eletrônico de aquisição de dados (placa conversora A/D)	77

3.5	Microcomputador.	79
3.6	Software” aplicativo.	79
3.7	Aferição do sistema.....	80
4	EXPRESSÕES MATEMÁTICAS PARA CÁLCULO DE FORÇA SECCIONAL, ENERGIA INCIDENTE E EFICIÊNCIA CORRESPONDENTE.	83
4.1	Força seccional nas hastes em função do tempo, proveniente da propagação de impulsos de tensão, gerados pelo impacto do martelo	83
4.2	Determinação da energia dinâmica transferida às hastes	85
4.2.1	Cálculo da energia incidente nas hastes, tomando como base Schmertmann/Palacios.	86
4.2.2	Cálculo da energia incidente nas hastes, tomando como base Fairhurst. ...	86
4.3	Eficiência teórica da energia incidente.	86
5	ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS.	90
5.1	Introdução.	90
5.2	Empresas escolhidas para a realização dos ensaios.....	90
5.3	Forma de análise dos dados.	91
5.4	Apresentação de resultados.	91
5.5	Sistema NBR6484/80, com martelo cilíndrico com pino guia, acionado com corda manual ou com gatilho.	96
5.6	Sistema NBR6484/80, com martelo cilíndrico vazado, acionado com corda ou com gatilho.	100
5.7	Uso de cabo de aço no acionamento manual do martelo.	101
5.8	Martelo sem coxim de madeira.	102
5.9	Tamanho da cabeça de bater.	103
5.10	Acionamento de martelo com corda e roldana móvel.	105
5.11	Avanço da perfuração feita pela cravação do próprio amostrador.	106
6	CONCLUSÕES.	125
7	SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DOS TRABALHOS.....	129
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	132
	ANEXOS NO VOLUME 2	

LISTA DE FIGURAS E FOTOS

Figura 2.1	Tipos de amostradores apresentados por Hvorslev (1949)	10
Figura 2.2	Martelo do tipo “Pin Guided Hammer”, sem coxim de madeira. Hvorslev (1949).	12
Figura 2.3	Martelo do tipo “Pin Guided Hammer” com coxim de madeira e amostrador do tipo “Raymond”. Fletcher (1965).	12
Figura 2.4	Amostrador do tipo “Raymond”. NBR6484/80.	26
Figura 2.5	Tipos de martelos: prismático e cilíndrico vazado. NBR6484/80.....	27
Figura 2.6	Martelos automáticos dos tipos “Pilcon” e “Borros Co”.	28
Figura 2.7	Eficiência de energia cinética medida no instante do impacto. Sistema “cathead”. Kovacs (1980).	39
Figura 2.8	Altura de queda no martelo de queda livre em função da frequência de golpes. Kovacs (1979).	40
Figura 2.9	Esquema de instrumentação utilizado por Kovacs & Salomone (1982).	42
Figura 2.10	Eficiência de energias cinética E_v e dinâmica transferida às hastes E_n . Kovacs & Salomone (1982).	43
Figura 2.11	Eficiência de transferência de energia cinética para dinâmica E_n/E_v em função do tempo $2t/c$. Kovacs & Salomone (1982).	44
Figura 2.12	Número de golpes em função da penetração do amostrador. Teixeira (1993).	48
Figura 2.13	Eficiência da energia cinética em função do sistema operacional do martelo do SPT e, também, do número de voltas da corda no tambor. apud Skempton (1986).	49
Figura 2.14	Esquema simplificado de propagação de ondas de tensão no SPT. Palacios (1977), apud Belincanta et al.(1994).	52
Figura 2.15	Registro de força em função do tempo. (composição de hastes de 25,4mm, martelo cilíndrico com pino guia). Campus/USP/SP. Belincanta et al.(1994).	53

Figura 2.16	Sistema de aquisição de dados, do tipo IPT. Belincanta et al.(1994). ...	...55
Figura 2.17	Registros típicos de força e de velocidade de partícula em função do tempo em ensaio SPT. Belincanta (1985).	...55
Figura 2.18	Eficiência em função do comprimento da composição, para hastes de 25,4mm. Belincanta et al.(1994).	...56
Figura 2.19	Eficiência de energia em função do comprimento das hastes. Martelo cilíndrico com pino-guia e haste de 25,4mm. Campo Experimental/USP. Décourt et al.(1989).	...57
Figura 2.20	Exemplo de dispersão. Dados provenientes de Alonso (1994) Décourt & Quaresma Filho (1994).	...59
Figura 2.21	Torque T em função da resistência à penetração N_{72} . Solos da Bacia Sedimentar Terciária de São Paulo. Décourt & Quaresma Filho (1991).	...61
Figura 2.22	Torque T em função da resistência à penetração N_{72} . Solos residuais de migmatito, granito e gnaiss. Décourt & Quaresma Filho (1991). ...	...62
Figura 2.23	Relações torque T/N_{72} em função do tipo de solo. Décourt & Quaresma Filho (1994).	...63
Figura 2.24	Representação esquemática de instalação do torquímetro. Alonso (1994).	...67
Figura 2.25	Coeficiente que leva em consideração o modo operacional do martelo. Décourt (1989).	...69
Figura 2.26	Fator que leva em consideração o porte da cabeça de bater. Décourt (1989).	...69
Figura 2.27	Efeito do comprimento da composição de hastes sobre a eficiência de energia incidente na primeira onda de compressão. Schmertmann & Palacios (1979).	...72
Figura 3.1	Sistema de aquisição de dados do tipo IPT.	...78
Figura 3.2	Apresentação esquemática do circuito elétrico da célula de carga.	...78
Figura 3.3	Resultado de aferição de célula de carga.	...82
Figura 4.1	Representação esquemática do impacto do martelo de SPT.	...88
Figura 4.2	Registro típico de força em função do tempo e representação esquemática do intervalo de cálculo de energia incidente, para comprimento l' de interesse.	...89
Figura 4.3	Curvas típicas do tipo exponencial, ajustadas a valores de eficiências de energias extrapoladas.	...89

Foto 3.1	Aferição de célula de carga na prensa universal da UEM.	...81
Foto 3.2	Microcomputador, fontes, condicionadores de sinais e placa A/D, integrantes do sistema do tipo IPT.	...81
Foto 5.1	Acionamento com corda manual do martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg. Empresa 1. Campus/UEM.	.120
Foto 5.2	Posicionamento da célula de carga na composição de hastes, martelo cilíndrico com pino-guia, com cabeça de bater normal de 3,6kg, acionamento com corda manual. Empresa 3 – Moema/SP.	.120
Foto 5.3	Acionamento com cabo de aço manual do martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg. Empresa 1. Campus/UEM.	.121
Foto 5.4	Acionamento com dispositivo de soltura (gatilho) do martelo com pino-guia, com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg. Empresa 1. Campus/UEM.	.121
Foto 5.5	Posicionamento da célula de carga e do gatilho, em relação à composição de hastes, à cabeça de bater e ao martelo. Empresa 1. Campus/UEM.	.122
Foto 5.6	Sistema de registro de campo de eventos dinâmicos, do tipo IPT, constituído por fontes, multímetro, condicionadores de sinais, microcomputador, placa A/D e célula de carga.	.122
Foto 5.7	Cabeça de bater de tamanho variado: normal de 3,6kg, grande de 14kg e pequena de 1,2kg.	.123
Foto 5.8	Medidas de torque máximo e mínimo conjuntamente com o ensaio SPT. Empresa 1, Campus/UEM.	.123
Foto 5.9	Trado helicoidal utilizado no avanço da perfuração até o lençol freático d'água. Empresa 1. Campus/UEM.	.124
Foto 5.10	Avanço da perfuração com circulação d'água. Empresa 3. Moema/SP.	.124

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Algumas correlações propostas entre a resistência à penetração e propriedades de solo. Hvorslev (1949).	11
Tabela 2.2	Compacidade relativa de areias e siltes e consistência de argilas em função de IRP e N	20
Tabela 2.3	Compacidade relativa e consistência em função de IRP , N e RP	21
Tabela 2.4	Alguns fatores intervenientes na discrepância de N . Schmertmann (1978).	38
Tabela 2.5	Eficiência de energia cinética medida no instante do impacto do martelo, 100(energia medida/energia nominal), no sistema “cathead”. Kovacs (1980).	39
Tabela 2.6	Eficiência de transferência de energia em função do tipo de martelo. Kovacs & Salomone (1982).	43
Tabela 2.7	Número de golpes, em percentagem, para cada parcela de 152mm de cravação. Resistência de ponta e lateral, em porcentagem. Schmertmann (1979).	46
Tabela 2.8	Número de golpes, em percentagem, para cada parcela de 152mm de cravação, após a remoção dos “liners”. Schmertmann (1979).	46
Tabela 2.9	Valores de eficiência de energia no Brasil. Belincanta et al.(1994).	57
Tabela 2.10	Torque em função de N_{72} , para solos sedimentares e residuais.	62
Tabela 2.11	Torque T em função de N_{72} , para diversos tipos de solo. Décourt & Quaresma Filho (1994).	63
Tabela 2.12	Atrito/adeseção f_s e relações T/N para diversos tipos de solo e localidades. Alonso (1994).	65
Tabela 2.13	Coeficiente que leva em consideração o comprimento da composição..	68
Tabela 2.14	Fatores de correção de valores de N medidos. Décourt (1989).	70
Tabela 2.15	Fatores de correção referentes à eficiência de energia incidente, E_{π} . Décourt (1989).	70
Tabela 2.16	Eficiência de energia cinética e dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente. Skempton (1986).	73

Tabela 2.17	Eficiência de energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente em relação à padrão de 60%. Skempton (1986).	73
Tabela 2.18	Níveis de energia incidente usados no SPT em função da época. Kovacs (1994).	75
Tabela 5.1	Médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição de 14m de comprimento, para cabeça de bater normal de 3,6kg e alturas reais de queda.	107
Tabela 5.2	Resumo geral de médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição de 14m de comprimento, para martelo com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg e alturas reais de queda.	108
Tabela 5.3	médias de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada respectivamente para composição de 14m e de comprimento infinito, para martelo com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg e alturas reais de queda.	109
Tabela 5.4	Resumo geral de médias de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada respectivamente para composição de 14m e para comprimento infinito, para martelo com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg e alturas reais de queda.	110
Tabela 5.5	médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição velha de 14m de comprimento, para martelo cilíndrico com pino-guia, acionado com corda e gatilho, para cabeça de bater de tamanho variado e alturas reais de queda.	111
Tabela 5.6	Médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente, extrapolada para composição velha de 14m de comprimento, para martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, acionado com corda e roldana móvel, para cabeça de bater normal de 3,6kg e alturas reais de queda.	111

Tabela 5.7	Resumo geral de médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição velha de 14m de comprimento, para martelo cilíndrico com pino-guia, com e sem coxim de madeira, acionado com corda, para cabeça de bater normal de 3,6kg e alturas reais de queda. Sondagens SP1, 2, 11 e 12, realizadas pela empresa 1, no Campus da UEM.	..112
Tabela 5.8	Resumo geral de médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição velha de 14m de comprimento, para martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, para cabeça de bater de tamanho variado e alturas reais de queda. Sondagens SP11, 12 e 13, realizadas pela empresa 1, no Campus da UEM.	..112
Tabela 5.9	Resumo geral de médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição velha de 14m de comprimento, para martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, acionado com corda e roldana móvel, para cabeça de bater normal de 3,6 kg e alturas reais de queda. Sondagens SP11 e 12, realizadas pela empresa 1, no Campus da UEM.	..112
Tabela 5.10	Médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição de 14m de comprimento, para cabeça de bater normal de 3,6kg e altura convencional de queda de 75cm.	..113
Tabela 5.11	Médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição de 14m de comprimento, para martelo cilíndrico com pino-guia, acionado com corda e gatilho, para cabeça de bater de tamanho variado e altura convencional de queda de 75cm.	..114
Tabela 5.12	Médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição velha de 14m de comprimento, para martelo cilíndrico com pino-guia, acionado com corda e roldana móvel, para cabeça de bater normal de 3,6kg e altura convencional de queda de 75cm.	..114
Tabela 5.13	Acionamento com corda e gatilho disparador em confronto com	

	aquele com corda manual.	..115
Tabela 5.14	Confronto de acionamento manual com cabo de aço com aquele com corda manual.	..116
Tabela 5.15	Martelo cilíndrico com pino-guia e sem coxim de madeira em confronto com aquele com coxim de madeira.....	..117
Tabela 5.16	Cabeça de bater grande de 14kg em confronto com a cabeça normal de 3,6kg.	..118
Tabela 5.17	Cabeça de bater pequena de 1,2kg em confronto com a cabeça de bater normal de 3,6kg.	..119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico /Digital.
ABEF	Associação Brasileira de Engenharia de Fundações e Serviços Geotécnicos Especializados.
ABGE	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia.
ABMS	Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ASCE	American Society of Civil Engineering.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
Ax	haste de rotativa com 5,5kg/m.
Cathead	Tambor em rotação para levantamento e soltura de martelo do SPT, sistema muito utilizado nos Estados Unidos.
CCW	rotação anti-horária (counter clockwise rotation).
CME	Central Mining Equipments.
CPT	Cone Penetration Test.
d.p.	desvio padrão.
donut	martelo americano do tipo cilíndrico vazado brasileiro.
DP	Dynamic Probing.
dry sample	amostra colhida no amostrador SPT.
Enthru	energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente.
ESOPT	European International Symposium on Penetration Testing.
ICSMFE	International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A.
IRP	índice de resistência à penetração do amostrador Mohr-Geotécnica (número de golpes de um martelo de 65kg, caindo de 75cm, necessários para cravar os primeiros 30cm).
ISOPT	International Symposium on Penetration Testing.
ISSMFE	International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering.

liners	tubo de parede fina colocado internamente ao amostrador não bipartido, facilitando o manejo de amostras colhidas.
NBR	Norma Brasileira.
Pin Guided Hammer	martelo com pino-guia.
RP	índice de resistência à penetração do amostrador do tipo IPT (número de golpes de um martelo de 60kg, caindo de 75cm, necessário para cravar os primeiros 30cm do amostrador).
SPT	Standard Penetration Test.
SPT-T	SPT com medida de torque.
trip monkey	tipo de martelo de queda livre.
UEM	Universidade Estadual de Maringá.
USP	Universidade de São Paulo
WST	Weight Sounding Test.

LISTA DE SÍMBOLOS

a	área da seção transversal das hastes.
c	velocidade de propagação de impulsos de tensão, para o aço, $c=5.120\text{m/s}$.
$e_{1,2,3}$	índices propostos por Décourt(1989) para estimativa de E_i .
f_s	atrito/adesão desenvolvido na interface solo/amostrador.
g	aceleração da gravidade ($g=9,81\text{m/s}^2$)
h	penetração do amostrador.
ℓ	comprimento da composição de hastes.
ℓ'	comprimento da composição de hastes, correspondente ao tempo t ($\ell'=ct$).
m	relação entre a massa da composição de comprimento ℓ ou ℓ' e a do martelo, ($m=M_h/M_m$).
n	um número inteiro dado em função do tempo t , $2nL/c \leq t \leq 2(n+1)L/c$.
n'	é uma função do tempo t , ($n'=ct/2L$).
r	relação entre as áreas das seções transversais das hastes e do martelo, ($r=a/A$).
s	atrito/adesão desenvolvido na interface solo amostrador.
t	tempo decorrido após o impacto do martelo nas hastes.
t'	tempo de término da primeira onda de compressão incidente.
v	velocidade de partículas provenientes da passagem de impulsos de tensão.
<hr/>	
A	área da seção transversal do martelo.
C_1, C_2	coeficientes de ajustes para a resistência do CPT, respectivamente para ponta e atrito/adesão.
A_e	área projetada da base do amostrador.
D_i, D_e	diâmetro do amostrador, interno e externo respectivamente.
E	módulo de elasticidade, para o aço, $E=21.400 \text{ kPa}$.
E^*	energia nominal, 474J.
E_i	energia dinâmica incidente, referente à primeira onda de compressão incidente.
E_{it}	energia incidente nas hastes até o tempo t , contado 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 do impacto.
E_v	energia cinética máxima, contida no martelo no instante do impacto.
F	força seccional incidente nas hastes.
F_e	força estática de cravação do amostrador.
F_{h1}	força seccional incidente nas hastes, referente ao tempo de $2L/c$ a $4L/c$.
F_{h2}	força seccional incidente nas hastes, referente ao tempo de $4L/c$ a $6L/c$.
F_{hn}	força seccional incidente nas hastes dado em função de n .
F_{ho}	força seccional incidente nas hastes para o intervalo de tempo de zero a $2L/c$.
F_{ht}	força seccional incidente nas hastes dado em função de t .
F_{max}	força seccional máxima de impacto.
H	altura de queda do martelo.
K	coeficiente, $K=((1-r)/(1+r))^2$.
L	comprimento do martelo.
M	massa do martelo.
M_h	massa de composição de hastes de comprimento ℓ ou ℓ' .
M_m	massa do martelo.
N	número de golpes do martelo de 65kg, caindo de 75cm, necessário para a cravação do amostrador do tipo "Raymond" de 15cm a 45cm, (pela ASTM o martelo é de 63,5kg, altura de queda de 76,2cm e intervalo de penetração de 152mm a 457mm).
N_{eq}	índice de resistência à penetração equivalente ($N_{eq} = T/12$), sendo T em N.m.
N_1, N_2, N_3	parcela do número de golpes necessários para a cravação de cada um dos 15cm de penetração.
N_{15}, N_{30}, N_{45}	número de golpes do martelo, necessários à cravação do amostrador respectivamente por 15cm, 30cm e 45cm.
N_{0-30}	número de golpes do martelo, necessários à cravação do amostrador no intervalo de zero a 30cm de penetração.
N_{15-45}	número de golpes do martelo, necessários à cravação do amostrador no intervalo de 15 a 45cm de penetração.
N_{72}	índice de resistência à penetração, obtido com nível de eficiência de energia incidente de 72%.
N_{SPT}	índice de resistência à penetração, é o mesmo que N .
N_t	número total de golpes necessários à cravação de 45cm do amostrador.
Q_c	resistência de ponta (resistência de cone) do CPT.

- R_r** razão de atrito/adeseção e ponta do CPT.
- T** torque máximo, necessário à rotação do amostrador cravado em 45cm, quando do ensaio SPT, em N.m..
- V₀** velocidade do martelo no instante do impacto.
- W** peso da composição mais amostrador e cabeça de bater.
- Z** impedância das hastes.
- Z_h** impedância das hastes ($Z_h = EA/c$).
- Z_m** impedância do martelo ($Z_m = EA/c$).
- $\Delta N_1, \Delta N_2, \Delta N_3$** parcela do número de golpes utilizados na cravação de cada um dos 15cm.
- α** ângulo de saída da corda no tambor do “cathead”.
- η** eficiência de energia incidente nas hastes da composição.
- η_ℓ** eficiência de energia incidente nas hastes da composição de comprimento ℓ .
- $\eta_{1,2,3,4}$** coeficientes propostos por Bowles(1988), para correção de N.
- μ** relação de eficiência de energia incidente com a eficiência de energia cinética existente no martelo no impacto, $\mu = E_m/E_n$.
- ρ** massa por unidade de volume do material constituinte das hastes e do martelo, para o aço, $\rho = 7.850 \text{ kg/m}^3$.

RESUMO

BELINCANTA, A. (1998). Avaliação de fatores intervenientes no índice de resistência à penetração do SPT. São Carlos, 1998, 362p. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

São salientados neste trabalho de pesquisa alguns pontos importantes da origem, evolução e normatização do ensaio SPT (“Standard Penetration Test”) no Brasil e no exterior, bem como analisadas variantes, em uso, do método de ensaio proposto pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), tais como acionamento com cabo de aço e avanço da perfuração feita pela cravação do próprio amostrador, apresentando-se uma avaliação preliminar da influência nos valores dos índices de resistência à penetração N do SPT. Variáveis tidas como de relevância também serão avaliadas, com a quantificação da influência delas, de forma preliminar. Pode-se citar, entre estas variáveis, o tipo do martelo, o dispositivo para queda livre, o uso de roldana móvel, tamanho da cabeça de bater, estado de conservação da composição das hastes e o uso ou não do coxim de madeira.

Para a análise e avaliação tanto dos métodos variantes quanto das variáveis intervenientes foram coletados dados em sondagens/ensaios realizados, em quatro cidades de três Estados brasileiros, por seis empresas selecionadas e escolhidas em conformidade aos interesses específicos dos trabalhos.

Por fim, são feitas sugestões para continuidade dos trabalhos de pesquisa, visando a melhoria deste tipo de sondagem/ensaio, quanto ao entendimento de suas variáveis, evolução, normatização e, conseqüentemente, sua padronização.

Palavras chaves: Energia dinâmica no SPT; SPT; sondagem; sondagem com SPT.

ABSTRACT

BELINCANTA , A. (1998). Evaluation of intervenient factors in the penetration resistance of the SPT. São Carlos, 1998, 362p. Thesis (doctorate) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This research work presents some important aspects of the origin, evolution and standardization of the Standard Penetration Test (SPT), both in Brazil and abroad. It will also introduces the currently used variations of the proposed ABNT (Brazilian Association of Technical Standard) test method, which encompass the use of steel rope and drilling advance by sampler driving, and a preliminary evaluation on N values. Finally, it also analyses the influence on N results, of variables such as type of hammer, free weight fall system, use of mobile sheave wheel, size of anvil, state of conservation of sampling rods and use or not of a hard wood cushion.

Analysis and evaluation were performed using selected data obtained from six different companies which carried out tests in four cities at three different Brazilian States.

Finally suggestions are made for the continuity of research works on this subject aiming SPT test improvement by the understanding of the variables which affect N values which will contribute to its standardization.

Keywords: Dynamic energy in the SPT; SPT; drilling; drilling with SPT.

1 INTRODUÇÃO.

Não há como desenvolver projetos de fundações e de geotecnia em geral sem investigações de campo. Nesse contexto, o SPT, com sua simplicidade e robustez, tem-se mostrado suficientemente eficiente, tornando-se não só no seu país de origem, mas também no Brasil, um ensaio de uso corrente nas obtenções de parâmetros necessários a tais projetos.

Como ocorre em todos os ensaios de uso corrente, as empresas vão incorporando mudanças no procedimento de cada ensaio que, com o passar do tempo, constituem-se em variantes do respectivo método proposto pela norma então vigente.

Muitos fatores intervêm nos trabalhos de uniformização ou padronização de resultados de qualquer tipo de ensaio de uso corrente e, quando se trata do assunto padronização, há basicamente dois caminhos que podem ser seguidos, a saber:

- Estabelecimento de norma rígida no procedimento do ensaio, não permitindo nem alternativas de equipamento; ou
- Norma flexível ou parcialmente flexível e tentativa de padronização de resultados, pelo estabelecimento de um procedimento de referência.

Naturalmente para que o segundo caminho seja eficiente, há necessidade de que todos os fatores flexibilizados sejam plenamente entendidos e sua influência avaliada na forma quantitativa e não apenas na qualitativa.

Apesar de, no Brasil, a norma existente (NBR6484/80 da Associação Brasileira de Normas Técnicas), ser do primeiro tipo, contendo procedimentos de perfuração e de ensaio e ainda de adoção de um único tipo de amostrador (Raymond de diâmetro externo e interno de 51mm e 35mm respectivamente), há no meio técnico três tipos básicos de sondagem/ensaio SPT, a seguir enumerados:

1. Uso de martelo cilíndrico com coxim de madeira, operado manualmente com corda de sisal e com auxílio de uma roldana fixa. Perfuração com trado helicoidal até o nível d'água e abaixo com circulação d'água. Método da NBR6484/80.
2. Idem ao anterior exceto quanto ao acionamento do martelo que se faz com cabo de aço manual, auxiliado por uma roldana fixa.

3. Sondagem executada com avanço da perfuração feita pela cravação sucessiva do próprio amostrador .

Os dois primeiros tipos se caracterizam pela existência de pré furo, isto é, o amostrador desce livremente em perfuração previamente executada até a cota de ensaio em cada metro, a partir da qual o amostrador é cravado com o martelo os 45cm do ensaio SPT.

No terceiro tipo, o avanço da perfuração é feito pela cravação do próprio amostrador através de golpes do martelo, não se utilizando desta maneira qualquer tipo de trado ou circulação d'água. Toda vez que é alcançada uma cota de ensaio o amostrador é retirado e limpo. O ensaio em si começa a ser executado após a reinserção do amostrador até a cota anteriormente alcançada, quando então se cravam os 45cm do SPT, registrando-se o número de golpes necessários à penetração de cada 15cm.

Este terceiro tipo é de uso mais restrito a determinadas regiões, principalmente àquelas onde existe espessa camada superficial de solo não saturado, poroso e de baixa resistência, enquanto os dois primeiros, isto é, com corda de sisal ou com cabo de aço, são generalizados pelo Brasil inteiro.

Estes três tipos acima apresentados, considerados básicos, podem ser alterados se considerados o uso ou não de coxim de madeira ou de roldana móvel, o não uso de cabeça de bater ou uso de cabeça de bater de diferentes tamanhos e, por fim, nos dois primeiros tipos o uso de avanço da perfuração com circulação d'água ou com lama bentonítica desde a superfície, isto é, sem a utilização de trado até o nível d'água.

Os martelos de queda livre ("trip monkey") surgiram no exterior em meados dos anos sessenta em forma pioneira, tornando-se de uso generalizado somente a partir de 1990. Estes martelos podem ser separados basicamente em dois grupos em conformidade ao sistema de acionamento do gatilho disparador que pode ser manual ou automático. O sistema de levantamento e soltura automática destes martelos tem constantemente se aprimorado desde quando surgiram os primeiros de concepção muito simples.

No Brasil da atualidade, apesar do uso na forma experimental, há disponibilidade de dispositivo disparador de martelo (gatilho) de concepção muito simples, desenvolvido por Furnas Centrais Elétricas, assim como há também martelos automáticos importados.

Apesar dos esforços existentes em termos de normatização do SPT, bem como a opção pelo estabelecimento de um procedimento internacional de referência, este tipo de sondagem/ensaio não se encontra padronizado, nem em termos de resultados. O mesmo pode-se dizer quanto ao Brasil, onde métodos variantes àquele normatizado coexistem, dificultando a utilização dos parâmetros geotécnicos obtidos. Em função disto, estabeleceu-

se como meta neste trabalho a avaliação, numa forma preliminar, dos métodos variantes de execução do SPT existentes no Brasil e de algumas variáveis tidas como de relevância, caminhando no sentido de se obter subsídios não só a futuras normatizações mas também à padronização de resultados.

Para se atingir a meta acima, estabeleceu-se o plano de trabalho que se segue.

1. Acompanhamento interativo no desenvolvimento no IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A) de um instrumental simples, funcional e portátil para registro de eventos dinâmicos no SPT. Este instrumental constitui-se basicamente de:
 - Transdutores de deformação (células de carga) a serem acopladas na composição de hastes do SPT.
 - Módulo de tratamento e condicionamento de sinais.
 - Módulo eletrônico de aquisição de dados (Placa conversora A/D).
 - Microcomputador.
 - “Softwares” para aquisição e análise de dados.
2. Medições de campo, visando a avaliação de:
 - Eficiência do sistema brasileiro NBR6484/80, que se constitui de avanço da perfuração com trado e circulação d’água, martelo cilíndrico vazado ou com pino-guia, com coxim de madeira e acionamento com corda manual.
 - Eficiência do sistema anterior, mas com o uso de cabo de aço manual.
 - Sistema que utiliza o avanço da perfuração feita pela cravação do próprio amostrador.
 - Eficiência de martelos que não possuem coxim de madeira.
 - Eficiência de martelo acionado manualmente, com auxílio de duas roldanas, sendo uma delas móvel.

Acrescentou-se, com o decorrer dos trabalhos de coleta de dados, a avaliação da eficiência do uso de dispositivo de soltura do martelo (gatilho), da influência do tamanho da cabeça de bater e do estado da composição de hastes.

Para a avaliação dos diversos métodos existentes no Brasil, anteriormente enumerados, que se constitui no objetivo principal deste trabalho e, também, para a avaliação de alguns fatores considerados de relevância, foram utilizados preferencialmente os valores de energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, medidos com o sistema de aquisição de dados do tipo IPT, com o auxílio, em muitos casos, do

confronto direto de valores de N e de torque máximo, medidos em sondagens realizadas especificamente para este fim.

Os dados e registros foram coletados em locais distintos (oito locais de quatro cidades de três Estados brasileiros), em sondagens executadas por empresas escolhidas em conformidade ao seus ensaios de rotina, ao interesse dos trabalhos e dentro dos recursos disponíveis, sendo:

- Duas empresas que tradicionalmente utilizam martelo cilíndrico com pino-guia, acionado com cabo de aço manual.
- Uma empresa que utiliza o martelo cilíndrico vazado, acionado com corda manual.
- Duas empresas que utilizam martelo cilíndrico com pino guia, acionado com corda manual.
- Uma empresa que utiliza martelo cilíndrico e avanço da perfuração feita com a cravação do próprio amostrador.

Sem descaracterizar o método executivo de cada empresa, também foram feitos alguns registros de energia, utilizando-se dispositivo para soltura do martelo (gatilho).

Muitas das sondagens realizadas no Campus da UEM (Universidade Estadual de Maringá) foram feitas com o intuito específico de coleta de dados, permitindo desta maneira que se diversificasse o procedimento de ensaio dentro da própria sondagem, isto é, saindo daquele constituído pelo uso de martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg e acionamento com corda manual, que é o da norma NBR6484/80 e que, neste caso, também fazia parte da rotina da empresa executante.

No transcorrer dos ensaios no Campus da UEM, observou-se o que se segue.

1. A substituição da composição das hastes desgastadas pelo uso, por hastes novas, alterou o nível de energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente.
2. Existência de camadas distintas de solo, de pequena espessura, dificultando a análise de dados quando do confronto direto de N e de torque máximo.
3. A necessidade de realização de SPT e de medidas de torque máximo a cada meio metro de avanço da perfuração, aumentando com isto o número de dados coletados na mesma sondagem.

Os resultados obtidos neste trabalho de pesquisa são apresentados em dois volumes, constando no primeiro volume:

1. Uma revisão bibliográfica sucinta, incluindo pontos históricos importantes da evolução do SPT e de medidas de torque.
2. Sistema de registro de eventos dinâmicos no SPT brasileiro.
3. Método de estimativa de força seccional, energia e eficiência no SPT.
4. Análise de dados obtidos.
5. Sugestões para continuidade dos trabalhos.

Em função da quantidade de dados coletados, os mesmos são apresentados no volume 2, na forma de anexo, contendo detalhes específicos a futuras análises que se fizerem necessárias.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1 Breve relato histórico do SPT

Será feito neste trabalho um breve apanhado sobre a história do ensaio de campo denominado de SPT (Standard Penetration Test), pois não é possível entendê-lo sem que se faça um breve relato de sua origem.

Anteriormente a 1902, a obtenção da indicação do tipo de solo, com exceção de abertura de poços de diâmetro considerável e de escavações em verdadeira grandeza, era feita pela perfuração através da circulação de água. Naturalmente este processo conduzia a uma determinação precária do tipo de solo bem como de suas propriedades.

Em 1902, segundo Fletcher (1965) e Broms & Flodim (1988), Charles R. Gow introduziu o processo de cravação de um tubo de diâmetro nominal de 25,4mm, com martelo de 50kg de massa, retirando-se com isto nos pontos de interesse amostras do tipo "Dry Sample" e melhorando, portanto, o processo de obtenção de amostras em sondagem de simples reconhecimento que, até então, era feito pelo recolhimento de detritos oriundos da perfuração com circulação de água

Isto leva Fletcher (1965) a estabelecer 1902 como o ano do fim do processo de obtenção de amostras por circulação de água, em sondagem de simples reconhecimento, e o início da obtenção das mesmas através de processos dinâmicos de cravação.

Não há, nesta fase inicial, registro nem referência quanto ao controle de cravação deste tubo de 25,4mm de diâmetro interno nominal, isto é, quanto se cravava, qual a altura de queda do martelo e como se fazia a contagem do número de golpes, portanto não se pode definir como ensaio esta operação de cravação, pelo menos até meados da década de vinte.

Em 1927, a Raymond Concrete Pile Company e a The Gow Company, esta última subsidiária da primeira desde 1922, desenvolveram o amostrador composto de três partes, isto é, cabeça, corpo e sapata biselada. O corpo se constituía de um tubo bipartido, de 51 mm de diâmetro externo e 35mm de diâmetro interno, sendo estas dimensões válidas também para a sapata. Isto se constitui, a menos de algumas outras melhorias introduzidas com o

tempo, no amostrador de 51mm, do tipo Raymond até hoje conhecido e em uso. É importante salientar, a bem da história, que a Sprague and Henwood de Srenton, Pennsylvania, também desenvolveu um amostrador semelhante nesta mesma época.

Segundo relato de Mohr (1966), o martelo de 63,5kg surgiu com a adoção da média dos pesos utilizados na região de Boston na década de 20, os quais eram possíveis de serem levantados manualmente com auxílio de corda e roldana fixa até a altura de queda de 762mm, por dois auxiliares de sondagem.

Deve-se ainda ressaltar que, em desenho apresentado por Mohr (1966), o martelo utilizado nos primórdios do SPT era de concreto, prismático, continha coxim de madeira dura e pino-guia, isto é, o martelo era do tipo "pin guided hammer".

No início dos anos trinta, a operação de cravação do amostrador se consolida como ensaio, quando do surgimento das primeiras especificações feitas por Fletcher e Mohr contemplando o martelo de 63,5kg, altura de queda de 762mm e resultado de ensaio como sendo o número de golpes necessários à cravação do amostrador por 305mm dentro do solo. Não há referência a qualquer assentamento inicial do amostrador antes da contagem dos 305mm de penetração, apesar de Teixeira (1977) creditar a Mohr o emprego do procedimento de assentamento inicial de 152mm a partir de 1930, quando da utilização do amostrador de 51mm.

Após muita discussão quanto à aparente fragilidade das hastes de diâmetro interno nominal de 25,4mm e também pelas exigências da crescente mecanização neste tipo de sondagem/ensaio, elas começam a ser substituídas em 1945 por hastes de maior rigidez como as do tipo A de sondagens rotativas. Em 1949, Cummings realiza estudos minuciosos quanto à perda de energia em sondagens com revestimento de diâmetro nominal de 63,5mm e hastes de 25,4mm. Chega à conclusão de que a perda de energia em movimentos transversais das hastes é mínima, em sondagens de até 30m de profundidade, em comparação com o montante de energia fornecida pelo martelo.

No final da década de quarenta, Terzaghi e Peck (1948) descrevem, em seu livro, o procedimento de execução da sondagem de simples reconhecimento com perfuração por circulação de água, utilizando-se revestimento de 63,5mm de diâmetro, hastes de 25,4mm e amostrador do tipo Raymond de 51mm e 35mm de diâmetro externo e interno, respectivamente. Ressaltam os problemas de se classificar o solo somente pelos detritos oriundos da circulação d'água, recomendando portanto a retirada de amostra com amostrador cravado, pelo menos, quando da mudança de camada no subsolo. Se não adotado este procedimento, segundo ainda os autores acima, mesmo que os trabalhos sejam executados

com muita atenção e cuidado a prospecção não resulta de boa qualidade. Uma alternativa à sondagem de simples reconhecimento, com perfuração por circulação d'água, seria aquela executada com o emprego de trado, de qualidade superior, porém apresentando dificuldades operacionais quando da presença de água, principalmente em areias. Por este motivo e também pelo fato dos trados destruírem quase que por completo a estrutura dos solos, ainda permanece, a necessidade do uso concomitante de amostradores neste tipo de sondagem.

Nesse mesmo livro salienta-se também o uso de amostradores com diâmetro interno de 38mm dentro do qual se coloca um tubo de latão de parede fina para o recolhimento da amostra e proteção até sua utilização em laboratório. Neste ponto, fala-se, de certa maneira, no uso dos "liners", embora a preocupação fosse a retirada de amostras mais ou menos do tipo indeformada, para serem utilizadas em ensaios de laboratório, com o objetivo de determinação de propriedades índices.

Terzaghi & Peck (1948) afirmam que o método mais simples de se obter informações sobre o grau de compacidade do solo "in situ" seria o de contar o número de golpes do martelo de 63,5kg, caindo de uma altura de 762mm, necessários para cravar 305mm o amostrador do tipo Raymond de 51mm de diâmetro externo. O procedimento seria o de cravar o amostrador inicialmente 152mm, em forma de assentamento e, então, iniciar a contagem do número de golpes necessários para cravar mais 305mm. A este procedimento aqueles autores acima deram o nome de SPT (Standard Penetration Test) afirmando inclusive que, por apresentar informações muito úteis com pequeno esforço adicional, o mesmo deveria ser sempre usado.

Segundo Hvorslev (1949), a determinação da resistência à penetração dinâmica como um procedimento regular nas sondagens exploratórias e em amostragens na região da Nova Inglaterra é atribuída a H. A. Mohr, em 1927. Este procedimento inicial, bem como o equipamento, ainda eram utilizados em 1949 pela Gow Division da Raymond Concrete Pile Company. O que significa uso de revestimento de 51mm de diâmetro nominal e amostrador de 25,4mm de diâmetro interno, cravado com martelo do tipo "pin guided hammer" de 63,5kg e altura de queda de 762mm, sendo ainda a resistência à penetração expressa pelo número de golpes necessários à cravação de 305mm a partir do ponto de apoio do amostrador com o peso das hastes. Contudo, nessa mesma época, outras divisões da própria "Raymond Concrete Pile Company", apesar de usarem o mesmo martelo e a mesma altura de queda, se diferenciavam quanto ao tipo do amostrador, que era o de 51mm de diâmetro externo, e também quanto ao procedimento de ensaio, em que se fazia um assentamento de 152mm do amostrador antes de iniciar a contagem do número de golpes necessários à

cravação dos 305mm, reduzindo com isto a influência da zona perturbada na extremidade da perfuração.

É evidente a variedade de tipos de amostradores utilizados na época, bem como a falta de padronização decorrente disto, quando Hvorslev (1949) apresenta esquematicamente três amostradores típicos (Figura 2.1) e, correlações entre consistência ou compacidade relativa de solos e resistência à penetração dinâmica referentes ao amostrador de 25,4mm de diâmetro interno, creditada a Mohr, ao amostrador de 51mm de diâmetro externo, creditada à Terzaghi e Peck (1948) e, por último, aquela referente ao código da cidade de New York bem como aquela do “Corps of Engineers of New England Division”, (Tabela 2.1). A diferença na designação de estado do solo e no número de golpes é muito grande, como se pode ver na referida tabela, embora se chame a atenção para o caráter qualitativo destas correlações, as quais dependem das características do solo tais como distribuição granulométrica, permeabilidade e grau de saturação. Todavia Hvorslev(1949) concorda com Terzaghi & Peck (1948) quanto ao benefício/custo em se fazer sempre o ensaio SPT, embora se saiba que estas estimativas de consistência ou compacidade relativa nem sempre sejam confiáveis, pois as correlações decorrentes são inteiramente dependentes de muitos outros fatores associados a equipamento, procedimento e condições do solo, desconhecidos na época.

Nas Figuras 2.2 e 2.3 são apresentados os martelos do tipo “pin guided hammer”, um com coxim de madeira e outro sem, provenientes dos registros de Hvorslev (1949) e de Fletcher (1965).

Em 1954, Parson propõe o registro do número de golpes para cada um dos três intervalos de 152mm de penetração do amostrador, sendo a resistência à penetração dada pela soma mínima dos golpes de dois destes intervalos. Sua intenção era a de minimizar as perturbações no número de golpes, provenientes principalmente da presença de pedregulhos.

É talvez pelo exposto anteriormente bem como pelo início da fase de normatização, de que se tratará em seguida, que Kovacs et al.(1981) estabelecem meados de 1950 como a época do estabelecimento da resistência à penetração como sendo o número de golpes necessários à cravação de 305mm, após o assentamento inicial de 152mm do amostrador do tipo Raymond.

A tentativa de norma D1586-58T da ASTM (American Society for Testing and Materials), em 1958, especifica a cravação do amostrador por 457mm, sendo os 152mm iniciais considerados como de assentamento. Ela não define claramente o que é resistência à

penetração, mas determina que se registre o número de golpes necessários para se cravar o segundo e terceiro intervalos de 152mm .

Figura 2.1 - Tipos de amostradores apresentados por Hvorslev (1949)

Tabela 2.1 – Algumas Correlações Propostas entre a Resistência à Penetração e Propriedades de Solo. Hvorslev (1949)

“Cuidados deverão ser tomados no uso de qualquer correlação fora da área ou das condições em que tenha sido determinada, já que grandes desvios podem ser esperados. A resistência à penetração depende não somente das dimensões do equipamento, da consistência, da compacidade relativa dos solos e da profundidade do ponto do ensaio, mas também de muitos outros fatores ainda não plenamente conhecidos”

autor	H. A. MOHR		TERZAGHI & PECK		NEW YORK CITY CODE		NEW ENGLAND DIV, C. E.	
amostrador	tubo extra pesado Di=33,4mm De=24,3mm		Raymond Di=51mm De=35mm		De=63,5mm		De=76,2mm	
martelo	±63,5kg, queda±762mm		63,5kg, queda:762mm		136kg, queda:457mm		136kg, queda:457mm	
solo	designação	golpes/305mm	designação	golpes/305mm	designação	golpes/305mm	designação	golpes/305mm
Areia e Silte (compacidade)	fofa	< 9	muito fofa	< 4	fofa	0 - 15	muito fofa	< 8
	firme	9 - 13	fofa	4 - 10			fofa	8 - 16
	dura	14 - 49	média	4 - 30			média	16 - 55
	muito dura	> 50	compacta	30 - 50			compacta	55 - 110
			m ^{to} compacta	> 50	m ^{to} compacta	> 50	m ^{to} compacta	> 110
Argila (consistência)	mole média	< 5 5 - 10	m ^{to} mole	< 2	m ^{to} mole mole	0 - 2 3 - 10	m ^{to} mole	< 8
			mole	2 - 4			mole	8 - 16
			média	4 - 8			média	16 - 55
	dura	11 - 30	rija	8 - 15	rija	11 - 30	rija-dura	55 - 110
			m ^{to} rija	15 - 30			m ^{to} dura	> 110
			dura	>30	dura	> 30

Figura 2.2 - Martelo do tipo "pin guided hammer", sem coxim de madeira.

Hvorslev (1949)

Figura 2.3 - Martelo do tipo "pin guided hammer", com coxim de madeira e amostrador tipo "Raymond". Fletcher (1965)

Já a tentativa de norma D1586-63 T da ASTM, que sucede a de 1958, define com clareza o que é a resistência à penetração e determina que se faça o registro do número de golpes para a cravação de cada um dos três intervalos de 152mm, sendo a resistência à penetração N dada pelo número de golpes necessários à cravação do segundo e terceiro intervalos de 152mm. Esta última tentativa de norma continua a chamar de assentamento a cravação dos primeiros 152mm e passa a ser norma definitiva em 1967, sem modificações neste item.

Fletcher, mesmo em meados de sessenta, ainda defende a proposição apresentada por Parson em 1954, achando de fundamental importância o registro do número de golpes para cada um dos três intervalos de 152mm de penetração. Em seu entender, isso permitiria uma melhor avaliação do ensaio com a possibilidade de se escolher o número de golpes para os dois intervalos de 152mm de penetração mais convenientes. Fletcher é contra um assentamento fixo, como por exemplo, se considerar os primeiros 152mm como tal.

Lo Pinto (1966) defende a linha expressa em Terzaghi & Peck (1948) bem como aquela adotada pela ASTM (1963). Ele analisou milhares de registros verificando que o número de golpes dos primeiros 152mm de cravação não corresponde à realidade, pois sempre resulta em um valor muito baixo quando comparado com o restante da penetração, e portanto, não deve ser considerado na determinação da resistência à penetração N .

Palacios (1977) justifica a opção pelo assentamento inicial do amostrador, feita pela ASTM, quando do início da normatização, pelos motivos apresentados a seguir.

- a) Os processos de perfuração tendem a perturbar o solo na extremidade do furo;
- b) O furo pode não estar totalmente limpo antes da operação de ensaio começar. Sedimentos de perfuração se depositam na base da perfuração, criando uma camada de material solto que não representa o tipo de solo nem a resistência natural à penetração; e
- c) Desde que uma coluna de solo tenha sido removida, o solo na extremidade do furo está em alívio de tensões. Gibbs e Holtz, em 1957, mostram que a resistência à penetração se reduz com o alívio de tensões. Essa zona de alívio se estende por poucos centímetros, quando da utilização de processos adequados de perfuração.

Schnabel (1966) e Geisser (1966) também são favoráveis ao assentamento inicial de 152mm.

A diversidade de métodos de execução do SPT existentes na década de sessenta é expressa por Geisser (1966), conduzindo a perguntas do tipo: "O SPT é suficientemente

confiável? As experiências anteriores seriam consideradas suficientes para a garantia do uso presente e futuro do SPT? ” Renau (1966) responde à primeira das duas perguntas com o termo com restrição e a segunda com sim.

Mohr (1966), após apresentar mais alguns fatores intervenientes à lista de Fletcher, questiona a possibilidade de se trabalhar com dados do SPT que não apresentam consistência e acha errado chamá-lo de ensaio padronizado ou padrão. Portanto, para ele, os dados oriundos do SPT deveriam ser usados com restrição.

Somando-se a estes problemas, também começam em meados da década de sessenta a aparecer os primeiros martelos automáticos como o “pilcon”, havendo total desconhecimento do seu desempenho e, portanto, dividindo as opiniões quanto à sua adoção nos ensaios. Geisser (1966) e mesmo Fletcher (1965) são contra o uso deste tipo de martelo nos ensaios, apesar dos esforços de Stubbings (1966) em divulgá-lo.

Casagrande & Casagrande (1968), apud Kovacs et al. (1977), observam considerável diferença nos valores de resistência à penetração N , obtidos por duas empresas tradicionais, isto é, pela Raymond e pela Sprague-Henwood, que executaram quatro furos de sondagens com equipamentos diferentes, operados numa área relativamente pequena de um mesmo depósito de areia. Os resultados obtidos são tabelados a seguir, em função dos equipamentos utilizados. Não foram fornecidos maiores detalhes quanto à posição do nível de água natural nem quanto à perfuração, porém a sondagem do tipo original da Raymond foi executada com circulação de água e com acionamento manual do martelo.

tipo de equipamento	“Original Raymond”	“Flyght Auger Raymond”	“Rotary Equipment Sprague-Henwood”	“Hollow Stem Flyght Auger”
acionamento do martelo	manual	corda com tambor (cathead)	guincho com cabo de aço	corda com tambor(cathead)
número de golpes/30,5cm (N)	10	15	45	10

Conclui-se desse fato, que um requisito necessário à continuidade do uso do SPT seria uma melhoria na confiabilidade e na garantia do mesmo se tornar um ensaio repetitivo.

O propósito original dos idealizadores do SPT, era o de, através de um procedimento padronizado, proporcionar meios para o estabelecimento de correlações com a experiência de projeto bem como com o de execução de tubulões e caixões. A possibilidade de que este ensaio tivesse alguma aplicação em problemas de cravação de estacas também era considerada, mas a possibilidade de outras aplicações não era esperada.

Fletcher (1965), ao falar deste propósito inicial do SPT e de seu uso generalizado, ressalta que este ensaio deve ser considerado como a obtenção de um índice do solo, esperando-se desta maneira que solos com a mesma resistência à penetração, mas com diferenças em outros aspectos, se apresentem com comportamento diferenciado quando de outros tipos de solicitação.

Considerando as discrepâncias apresentadas pelo SPT e seu uso generalizado em correlações, seja como parâmetro-índice ou não, chega-se desta maneira à época em que se almeja uma padronização mais ampla para o ensaio, pois os métodos e equipamentos, muitos dos quais impróprios, sujeitam o ensaio a abusos que só podem ser corrigidos através de melhores especificações, inclusive com uma orientação mais competente dos trabalhos de campo. Todavia, ainda se acredita, nessa época, que se bem executado, o ensaio se constitui num ótimo instrumento de medida das propriedades do solo.

Será apresentada a seguir uma seqüência histórica dos trabalhos desenvolvidos por comissões, formadas com o intuito de normatizar ou padronizar alguns dos ensaios penetrométricos mais usados. Esta seqüência se encontra com mais detalhes em ISSMFE, Technical Committee on Penetration Testing of Soils, TC 16, Rio de Janeiro, 1989.

No quarto congresso internacional da ISSMFE (International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering), realizado em Londres, em 1957, foi formado um subcomitê técnico com o objetivo de estudar os métodos de ensaios com penetrômetros estáticos e dinâmicos com vistas à normatização. Entre 1957 e 1961, vários métodos foram examinados, no entanto nenhuma recomendação foi feita no congresso internacional de Paris em 1961. Apenas foi decidido que os trabalhos deveriam ser prosseguidos, com o objetivo específico de normatizar um número reduzido de ensaios, escolhidos entre aqueles mais correntemente usados na Europa Ocidental e na América. O grupo de trabalho foi subdividido em dois: um europeu, que trataria dos ensaios penetrométricos daquela região, e o outro americano, que trataria do SPT. No sexto congresso internacional de Montreal, em 1965, o professor Milton Vargas apresentou um relatório do grupo europeu e outro do grupo americano. Devido às divergências existentes entre os membros dos grupos de trabalho, recomendou-se a publicação dos resultados dos trabalhos, separados em grupos, em revistas

técnicas apropriadas, sendo os referentes ao SPT publicados em 1970, na *Géotechnique* vol. 20, com o título “The dynamic penetration test: a standard that is not standardized”.

Apesar da dissolução destes comitês internacionais, os europeus resolveram continuar os trabalhos com o objetivo de uma normatização regional, todavia nada foi apresentado nas congressos internacionais de 1969 e de 1973.

Em 1974, no Simpósio Europeu de Ensaaios Penetrométricos (ESOPT) foi discutido o tema “Normatização e Futura Cooperação”, concluindo-se que: “a padronização de equipamentos e procedimentos de ensaios não só é desejável mas também necessária e somente um pequeno número de penetrômetros deve ser normatizado”.

Em 1975, o grupo europeu decidiu pela normatização de quatro ensaios penetrométricos a saber:

- CPT (Cone Penetration Test)
- DP (Dynamic Probing)
- SPT (Standard Penetration Test)
- WST (Weight Sounding Test)

Esse grupo europeu apresentou ao Comitê Executivo da ISSMFE, no congresso internacional de Tóquio em 1977, normas regionais para estes quatro ensaios, as quais foram aprovadas.

Na segunda conferência européia sobre ensaios penetrométrico (ESOPT II) em 1982, foi constituído um novo comitê, agora de cunho internacional, para a normatização de ensaios penetrométricos, sob a presidência do professor Broms e tendo como secretário Bergdahl. A tarefa dada a este comitê era ampla, acrescentando-se as intenções de investigar correlações e comparações entre os diferentes métodos de ensaios penetrométricos, incluindo-se aplicações práticas e limitações dos métodos na previsão de capacidade de carga de fundações superficiais, tubulões e estacas.

Esse comitê decidiu, em 1983, dirigir os trabalhos no sentido de estabelecer procedimentos de referência para os quatro ensaios já definidos como importantes pelos europeus em 1977. Assim, foram criadas quatro comissões, uma para cada ensaio. Também foi decidido, que se deveria realizar uma conferência internacional tendo como tema os ensaios penetrométricos, a partir da qual se poderia pensar em correlações, comparações e aplicações destes ensaios. Essa conferência se constituiu no ISOPT I, que ocorreu em Orlando, em 1988, quando foram apresentadas as propostas de referência de cada um dos

quatro ensaios bem como artigos tratando de interpretação, desenvolvimento e correlações entre estes diversos ensaios.

Os trabalhos referentes ao SPT ficaram ao encargo de uma comissão presidida por Thorburn, tendo como membros Schmertmann, Nixon, Décourt, Muramachi e Zulkov.

Finalmente os "Reference Test Procedure" para os quatro ensaios, tidos como importantes (CPT, SPT, DP e WST), foram aprovados no congresso internacional do Rio de Janeiro, em 1989.

2.2 - SPT no Brasil

As sondagens no Brasil começam com a criação da Seção de Estruturas e Fundações do IPT, em 1935. Um fato marcante foi a viagem de estudos de Odair Grillo à Harvard University em 1936, onde fez curso inclusive com H. A. Mohr que, segundo Odair Grillo (1993), foi o idealizador e iniciador da medida de resistência à penetração dinâmica em sondagens de 51mm e 63,5mm.

A Seção de Solos e Fundações do IPT, que começou a ser organizada no final de 1938 com a volta de Odair Grillo, adotou para suas sondagens o revestimento de 51mm. No início, segundo D'Araujo Costa (1993), não se fazia o ensaio de penetração, sendo que a consistência das argilas era estimada pelo exame tátil-visual das amostras, obtidas durante as sondagens. Nas areias, o processo tátil-visual era muito problemático levando a estimativas não confiáveis da compacidade e, por isso, sentia-se a necessidade de algum método de campo menos qualitativo para se determinar estas características como, por exemplo, a medida de resistência à penetração.

Essas medidas de resistência à penetração de amostrador padrão começam a ser feitas no Brasil pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas, em 1943, em forma experimental e, em 1944, em caráter sistemático. O diâmetro externo do amostrador a ser utilizado ficou condicionado ao tubo de revestimento utilizado de 51mm, enquanto na fixação do diâmetro interno vários fatores concorreram, segundo Nápoles Neto (1961). Era desejável o maior diâmetro possível para se obter uma amostra de boa dimensão, mas o amostrador deveria ter resistência mecânica suficiente ao processo dinâmico de cravação para uma vida útil razoável, já que o ensaio se repetia a cada metro de perfuração da sondagem.

Considerando a necessidade de reposição e a disponibilidade de tubos na época da segunda grande guerra, optou-se por um tubo largamente utilizado em caldeiraria de alta

pressão, resultando num amostrador de 38,1mm de diâmetro interno e 46mm de diâmetro externo. Este amostrador também era constituído por três partes: cabeça, corpo bipartido com 420mm de comprimento e por fim sapata biselada. É interessante anotar que, apesar da sapata e o corpo do amostrador terem o mesmo diâmetro externo, o diâmetro interno da sapata é menor do que o diâmetro interno do corpo do amostrador, isto é, 36,5mm contra 38,1mm.

A resistência à penetração, na época, se constituía no número de golpes de um martelo de 60 kg caindo de 75 cm, necessários à cravação do amostrador por 30 cm no solo, a partir de seu apoio no fundo da perfuração obtido com seu próprio peso mais o das hastes da composição.

Outros detalhes são os que seguem:

- as hastes utilizadas eram as de rotativa do tipo G de aproximadamente 3,2kg/m;
- utilização de cabeça de bater;
- martelo cilíndrico vazado, acionado manualmente através de corda de sisal e roldana fixa;
- frequência média de 15 golpes por minuto;
- perfuração a trado até o nível d'água freático e através de circulação de água abaixo do mesmo; e
- revestimento de 51mm de diâmetro interno.

É bom lembrar também que, no início, o IPT usou um martelo de 70 kg e uma altura de queda de 75 cm, mudando posteriormente para o de 60 kg, não havendo registro da explicação para esta mudança, que talvez tenha sido por questões operacionais.

Os valores de resistência à penetração apresentam a vantagem de proporcionarem uma idéia mais quantitativa da consistência ou compacidade das camadas. No começo, os sondadores do IPT continuaram, independentemente, a estimar a consistência ou compacidade de forma qualitativa pela resistência que o solo oferecia às ferramentas de perfuração (trado, peça de lavagem etc.). Comparando esses valores fornecidos pelos sondadores com os da resistência à penetração do amostrador é que se estabeleceram as correlações de consistência e da compacidade com o índice de resistência à penetração do amostrador IPT, denominado de RP.

Isto levou, de certa maneira, a Nápoles Neto (1961) reconhecer uma certa arbitrariedade no estabelecimento destas correlações, que são apresentadas a seguir:

Argilas	
consistência	RP
mole	< 4
média	4 - 8
rija	8 - 15
dura	> 15

Areias	
compacidade	RP
fofa	< 5
média	5 - 10
compacta	10 - 25
muito compacta	> 25

Em 1944, a Geotécnica, empresa recém fundada por Odair Grillo, Otelo Machado e D'Araujo Costa, começa a utilizar um amostrador trazido pelo engenheiro Mohr quando de sua estada a serviço de consultoria a uma empresa americana, que estava se instalando no Brasil. Este amostrador, conhecido como Mohr-Geotécnica, tinha dimensões de 41,2mm de diâmetro externo e 25mm de diâmetro interno. A resistência à cravação era dada pelo número de golpes de um martelo de 65kg caindo de 75 cm, necessários à cravação do amostrador por 30cm, após o assentamento do mesmo no fundo do furo pelo próprio peso e da composição de hastes de 25,4mm. Denominou-se a resistência obtida por este amostrador de índice de resistência à penetração IRP.

Outros detalhes principais da sondagem Mohr-Geotécnica são os que seguem:

- hastes de 25,4mm com 3,2kgf/m;
- utilização de cabeça de bater;
- não há referência quanto ao tipo do martelo, mas o mesmo era operado manualmente através de corda de sisal e roldana fixa;
- frequência média de 15 golpes por minuto;
- perfuração a trado até o nível de água freático e através de circulação de água abaixo do mesmo; e
- revestimento de 51mm de diâmetro interno.

Em 1947, a Geotécnica lançou o amostrador do tipo Raymond de 51mm de diâmetro externo e 35mm de diâmetro interno, que era utilizado em sondagem de 63,5mm, isto é, com revestimento de 63,5mm. O restante do equipamento era o mesmo utilizado nas sondagens Mohr-Geotécnica, com exceção do revestimento que era de 63,5mm e da determinação da resistência à penetração que passou a ser o número de golpes do martelo de 65 kg, caindo de 75 cm de altura, necessários à cravação do amostrador em 30 cm após 15 cm de

assentamento inicial, isto é, cravação dos trinta centímetros finais dos 45 cm centímetros de penetração.

Machado & Magalhães (1955) apresentam correlações entre a compactidade e a consistência para o amostrador Mohr-Geotécnica, colocando junto às de Terzaghi-Peck (1948) para comparação (Tabela 2.2).

Machado & Magalhães (1955) também apresentam correlações entre o Mohr-Geotécnica e o Raymond, observando-se que são dependentes da textura do material como se segue.

N = IRP	areias médias e grossas com pedregulho
N = 2 IRP	argilas
N = 1,7 IRP	areias finas e argilas

Tabela 2.2 - Compactidade relativa de areias e siltes e consistência de argilas em função de IRP e N.

Tipo de amostrador		Mohr-Geotécnica 41mm - 25mm (IRP)	Raymond (Terzaghi&Peck-1948) 51mm - 35mm (N)
areias	fofa	0 - 2	0 - 4
	pco compacta	3 - 5	5 - 10
	comp. média	6 - 11	11 - 30
siltes	compacta	12 - 24	31 - 50
	muito compacta	> 24	> 50
argilas	muito mole	< 1	< 2
	mole	2 - 3	2 - 4
	média	4 - 6	4 - 8
	rija	7 - 11	8 - 15
	muito rija	-	15 - 30
	dura	> 11	> 30

Para ilustração apresentam-se, na Tabela 2.3, correlações amplamente divulgadas entre a compactidade ou consistência e a resistência à penetração para os três amostradores: Mohr-Geotécnica, Raymond (Terzaghi-Peck) e IPT. Nota-se que a correlação com o

amostrador Raymond é obtida pela aplicação com aproximação da relação $N = 1,7 \text{ IRP}$, apresentada por Machado & Magalhães (1955), válida para solos do tipo areias finas e argila.

Costa Nunes (1956) chama a atenção da falta de normatização e consequentemente da padronização das sondagens à percussão no Brasil. Por isso, passa-se neste relato a apresentar os esforços despendidos neste sentido, tomando como base as publicações de Teixeira (1966, 1974, 1977, 1993), Oliveira (1974), Gaioto (1974), Gerber (1974), Quaresma (1974) e Décourt (1974).

A tendência à normatização e, consequentemente, à padronização era anseio internacional, quando em 1957, no congresso internacional de Londres, foi formado um comitê com a tarefa de normatização dos ensaios penetrométricos tanto os estáticos quanto os dinâmicos. Neste comitê se encontrava como secretário o professor Milton Vargas. Mas os trabalhos não alcançaram os objetivos, pois existiam pessoas favoráveis à normatização e pessoas veementemente contra, umas por considerar impossível enquanto outras entendiam que normas impedem a evolução dos próprios ensaios.

Tabela 2.3 – Compacidade relativa e consistência em função de IRP, N e RP.

solo	denominação	Mohr- Geotécnica $\phi_e = 41\text{mm}$ $\phi_i = 25\text{mm}$ (IRP)	Raymond (Terzaghi-Peck) (brasileira) $\phi_e = 51\text{mm}$ $\phi_i = 35\text{mm}$ (N)	IPT $\phi_e = 46\text{mm}$ $\phi_i = 38\text{mm}$ (RP)
Areias Siltes arenosos	fofa	≤ 2	≤ 4	< 5
	pco compacta	3 – 5	5 - 8	-
	med. compacta	6 – 11	9 - 18	5 - 10
	compacta	12 – 24	19 - 41	11 - 25
	mto compacta	> 24	> 41	> 25
Argilas siltes argilosos	muito mole	< 1	< 2	-
	mole	1 – 3	2 - 5	< 4
	média	4 – 6	6 - 10	4 - 8
	rija	7 – 11	11 - 19	8 - 15
	dura	> 11	> 19	> 15

Fletcher (1965) julga que o SPT deve ser normatizado e padronizado, já que ele deve ser considerado um índice do solo. Mohr (1966) avalia que o SPT, pelo imenso número de

variáveis intervenientes, independente de normatização, não pode ser confiável nem consistente, sendo que estes resultados devem portanto ser usados com muita reserva e restrição.

Com o “State of the art: The Standard Penetration Test”, no 4º Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações em Porto Rico, em 1971, Mello começa a valorizar o SPT, creditando a ele a posição de ensaio. Décourt (1991c) considera este trabalho de Mello e também o de Mello (1967) como os marcos internacionais de uma nova era no SPT, sendo compartilhado da mesma opinião por Schmertmann (1978).

Foi neste clima de crença e descrença, de uniformização e padronização que, em 1970, a Geotécnica e o IPT passaram a utilizar exclusivamente o amostrador do tipo Raymond de 51mm de diâmetro externo. Para o procedimento do ensaio tomou-se como base a norma da ASTM, D1586-67, com as devidas adaptações às condições brasileiras. Portanto o amostrador passou a ser cravado por quarenta e cinco centímetros através de golpes de um martelo de 65 kg, com altura de queda de 75 cm, utilizando-se hastes de 25,4mm de diâmetro nominal interno e de 3,2kg/m. A resistência à penetração N passou a ser dada pelo número de golpes para se cravar os últimos 30cm.

Segundo Teixeira (1974), na década de setenta, a sondagem se encontrava numa condição desanimadora, sendo realizada como um verdadeiro artesanato com uso de diversos procedimentos e equipamentos, levando a resultados dispersos, apesar de passos já terem sido dados no sentido da uniformização. Desta maneira e nestas condições muitos diziam que o SPT deveria ser abandonado. Todavia os ensaios de laboratório não conseguiam dar resposta às necessidades e apresentavam dificuldades não só pelos custos e tempo de execução mas também por serem dependentes da qualidade das amostras, cuja evolução estava estagnada no tempo, principalmente quando se tratava de areia.

A Associação Paulista de Geologia de Engenharia, atual Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, lançou em 1971 uma publicação intitulada “Diretrizes para Execução de Sondagens – 1ª Tentativa”, sendo este o início da normatização brasileira.

Em 1974, a Associação Brasileira de Mecânica dos Solos preparou uma proposta de norma intitulada de “Método de Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos” que foi amplamente discutida no 5º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, realizado em São Paulo, neste mesmo ano, e também no 1º Simpósio de Prospecção do Subsolo - Núcleo Nordeste, realizado em Recife, em 1977. Alguns dos tópicos discutidos por usuários e pesquisadores, nestes dois eventos, serão apresentados a seguir.

Gaioto (1974) analisa com certa profundidade a questão da normatização do ensaio SPT, considerando-o um ensaio índice e portanto, altamente dependente de padronização para que seus resultados possam ser utilizados. Faz um paralelo com outros ensaios laboratoriais, como os triaxiais que representam mais um modelo e portanto menos dependente de padronização, ou mesmo desaconselhável de serem padronizados.

Os ensaios que estão associados a modelo procuram reproduzir condições específicas existentes na obra, enquanto outros que se referem a índices como por exemplo limite de liquidez ou mesmo limite de plasticidade devem ser necessariamente padronizados, pois eles são utilizados em correlações de primeira aproximação com outros parâmetros tidos como fundamentais do solo.

Os valores de resistência à penetração, obtidos nas sondagens à percussão, não representam propriedades fundamentais do solo mas apenas representam o resultado de um número grande de variáveis tais como consistência, porosidade, estrutura, coesão, estado de tensões atual, etc. É impossível representar matematicamente a resistência à penetração como uma função destas variáveis, ainda mais quando da utilização de um único amostrador, como ressaltado por Mello (1971). Dessa maneira, um mesmo índice de resistência à penetração pode representar uma infinidade de combinações de variáveis. Gaioto (1974) conclui que o índice de resistência à penetração fornece somente elementos preliminares de investigação, que devem ser complementados com outros ensaios de campo e/ou laboratório, e propõe que no item objetivo da futura norma conste a seguinte redação: "Sondagem à percussão é um método de investigação de subsuperfície que tem por objetivo a obtenção de informações geotécnicas preliminares. Não pode ser utilizada como método único, a não ser quando se dispõem de informações seguras da inexistência de condições especiais do subsolo e, também, quando já existem correlações geotécnicas estatisticamente determinadas, conjuntamente com este método de investigação, dentro de áreas pertencentes ao mesmo universo geológico de amostragem".

Gerber (1974) noticia muito bem as condições em que se encontravam as sondagens no início da década de setenta. Para se utilizar os resultados havia necessidade de se saber qual era a empresa que executara as sondagens, pois havia uma multiplicidade de procedimentos e equipamentos em uso. Uma normatização, além de promover uma seleção, daria de certa maneira força legal às sondagens bem executadas.

Quaresma (1974) ressalta que uma padronização só de equipamento, e mesmo de procedimento, não é suficiente para a padronização de resultados, de sondagens à percussão, havendo necessidade de uma sólida estrutura de empresa para o preparo de sondadores à altura da qualidade dos trabalhos. Oliveira (1974) afirma que os trabalhos de sondagem

nunca podem ser de qualidade superior de quem as executa, portanto ele recomenda a permanência constante de fiscais de campo de bom nível.

Gontijo de Paula (1974) ressalta a importância da energia que alcança o amostrador, cuja padronização passa pela padronização rigorosa dos componentes do ensaio que se relacionam com esta energia, tais como: cabeça de bater, martelo, hastes, corda, cabo de aço e roldanas. Segundo esse autor, as hastes devem ser as de 25,4mm que são de uso generalizado no Brasil. Quanto à corda com roldana fixa ou cabo de aço com roldana fixa e com tambor que também é de uso generalizado, deve-se optar por um dos dois inclusive com todos os detalhes decorrentes.

Tanto para Décourt (1974) quanto para Quaresma (1974), a norma brasileira deve espelhar as condições brasileiras, já que não existe uma normatização internacional e pelo visto não será alcançada nem a médio prazo, pois o comitê internacional de 1957, formado para isto, não alcançou os seus objetivos quanto à normatização.

Mário Brandi (1974) e Bogossian (1974), ainda neste 5º Congresso Brasileiro, expõem o outro lado da moeda da normatização, pois as normas não são feitas para substituir o raciocínio, nem a inteligência de ninguém, devendo as mesmas serem rígidas mas nunca inflexíveis.

No 1º Simpósio de Prospecção do Subsolo, do Núcleo da ABMS do Nordeste, realizado em Recife, Teixeira (1977) discute principalmente a utilização de lama bentonítica cujo único inconveniente é a determinação do nível de água, de grande importância para a engenharia de fundações. Todavia, a lama bentonítica é importante na estabilização do furo, consequentemente na melhor preservação do estado de tensões do solo, na cota de ensaio. Um outro item também muito discutido foi o uso do coxim de madeira.

Em 1977, a proposta de norma da ABMS foi enviada à Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, para discussão e aprovação, tornando-se oficialmente a primeira norma brasileira, em 1979, com a denominação de “Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos”, MB 1211/79, com a mudança posterior na numeração para NBR 6484/80

Esta norma se compõe basicamente de cinco partes a saber:

- aparelhagem (equipamento e ferramentas);
- processos de avanço da perfuração;
- ensaio penetrométrico e amostragem;
- observação do nível de água; e
- apresentação formal dos resultados.

Quanto ao equipamento deve-se ressaltar que foi prevista a utilização de dois tipos de martelos de 65 kg, de acionamento manual com corda e roldana fixa e contendo coxim de madeira dura: o cilíndrico vazado e o prismático com pino-guia, apesar do uso difundido do martelo sem coxim de madeira. As hastes, inicialmente propostas para serem do tipo A de rotativa com 5,6 kg/m, de uso internacional, foram substituídas pelas de 25,4mm com 3,2kg/m, de uso generalizado no Brasil, pois as mesmas servem também como composição de perfuração.

O avanço da perfuração, segundo esta norma, é feito com trado helicoidal até o lençol freático e através de circulação de água, abaixo do mesmo. Para contenção do furo, quando necessário, utilizam-se tubos de revestimento de 67 mm ou 76 mm de diâmetro interno e manutenção de nível de água interno ao furo sempre acima daquele do lençol freático natural, quando da perfuração com circulação de água. É permitido, em casos especiais de solos muito resistentes ao corte do trado ou não aderentes, a utilização de circulação de água acima do lençol freático e em outros casos, também tidos como especiais, o uso de lama bentonítica em substituição parcial ao revestimento.

O amostrador especificado é o do tipo Raymond de 51mm de diâmetro externo e 35mm de diâmetro interno, constituído de três partes: cabeça, com válvula de esfera e orifícios laterais, corpo bipartido ou não e sapata biselada. Nas Figuras 2.4 e 2.5, são mostrados detalhes do amostrador e martelos padronizados pela norma brasileira NBR 6484/80.

O ensaio como especificado pela NBR 6484/80, é executado com a cravação do amostrador por 45 cm, com golpes do martelo de 65 kg, com altura de queda de 75 cm, registrando-se o número de golpes necessários à cravação de cada 15 cm de penetração. A resistência à penetração N é definida como o número de golpes necessários à cravação dos últimos 30cm do amostrador.

Para o aumento da consistência do ensaio, recomendam-se precauções especiais para se evitar que, durante a queda livre do martelo, haja perda de energia de cravação por atrito, principalmente nos equipamentos mecanizados que devem ser dotados de dispositivo disparador que garanta a queda totalmente livre do martelo.

Como exemplo, apresentam-se na Figura 2.6, esquematicamente, dois tipos de martelo automático de queda livre, um do tipo Pilcon e o outro do tipo Borros Co, que se caracterizam também pelo eficiente controle de altura de queda.

Figura 2.4 – Amostrador do Tipo “Raymond”. NBR6484/80

Figura 2.5 - Tipos de martelos: prismático e cilíndrico vazado. NBR 6484/80

Figura 2.6 – Martelos automáticos dos tipos “Pilcon” e “Borros Co”.

2.3 - Fases importantes da história nacional e internacional do SPT

1927 Desenvolvimento do amostrador do tipo Raymond de 51 mm e primeira especificação de ensaio para a cravação de 305 mm.

1943 Introdução da medida de resistência à penetração pelo IPT nas sondagens de simples reconhecimento.

1945 Substituição, no exterior, das hastes de 25,4 mm de diâmetro, de 3,2 kg/m. Começa o uso generalizado das hastes do tipo A, de 5,6 kg/m.

1948 e 1949 Divulgação do ensaio por Terzaghi & Peck (1948) e por Hvorslev (1949), com apresentação de correlações principalmente para o amostrador do tipo Raymond de 51 mm, referente à cravação de 305 mm, após o assentamento inicial de 152 mm.

1957 Correlações de Gibbs e Holtz entre o N do SPT e a compacidade relativa das areias, obtidas em tanque de prova em laboratório, considerando o efeito da pressão vertical.

1958 Primeira tentativa de normatização do SPT pela ASTM (D1586-58T).

1965 Fletcher publica o artigo “Standard Penetration test: its uses and abuses”, na ASCE. Relaciona três tipos de variáveis intervenientes no ensaio:

- elemento humano envolvido;
- método (procedimento) e
- equipamento

As preocupações da época se concentram nas técnicas de perfuração, imaginando que isto se constituía na grande barreira para a padronização, mas já se considerava de fundamental importância a uniformização do ensaio. Apesar do comitê internacional, formado no congresso internacional de 1957, em Londres, que foi desmembrado em dois grupos no congresso internacional de 1961, em Paris (grupo europeu e grupo americano), ter fracassado na tentativa de apresentar normas internacionais para os ensaios penetrométricos.

1966 Mohr acrescenta outros fatores intervenientes no SPT na lista de Fletcher e afirma ser errado considerar que o SPT é confiável e consistente, portanto, os dados provenientes do mesmo devem ser usados com restrição.

1968 A. Casagrande e L. Casagrande encontram diferenças significativas nos valores de N do SPT, obtidos em sondagens realizadas por duas firmas tradicionais americanas, num mesmo depósito de areia, quando aplicaram a norma da ASTM. Concluem que, da maneira que o SPT é realizado, os resultados não são consistentes.

1970 Geotécnica e IPT se uniformizam no uso único do amostrador do tipo Raymond de 51mm de diâmetro externo, começando-se portanto os primeiros trabalhos no sentido de se estabelecer uma norma brasileira.

1971 Victor de Mello apresenta um “State of the art: Standard Penetration Test” no 4º Congresso Panamericano de Mecânica de Solos e Engenharia de Fundações, em Porto Rico, em que, além de discutir o seu procedimento, também defende a aplicação de correlações mais diretas com o índice de resistência à penetração N , afirmando que o N se correlaciona melhor com ângulo de atrito interno ϕ das areias do que com a compactidade relativa (D_r). Considera difícil se correlacionar c e ϕ em solos de comportamento misto, pois o ensaio SPT realizado com um só tipo de amostrador pode fornecer somente o valor de uma das duas variáveis. Neste trabalho se apresenta também um estudo profundo sobre energia transferida às hastes tomando como base a teoria newtoniana de impacto com coeficiente de restituição.

1974 No 5º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, é discutida uma proposta de Método de Execução de Sondagem de Simples Reconhecimento dos Solos, elaborada pela

ABMS e a ser enviada como sugestão à ABNT. Teixeira apresenta, neste congresso, as relações em percentagem do número de golpes para cada um dos quinze centímetros de penetração, isto é, 23%, 33% e 44%.

1975 Aoki e Velloso apresentam na 5ª Conferência Panamericana de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, em Buenos Aires, um método aproximado para estimativa de capacidade de carga de estacas, tomando como base correlações entre a resistência à penetração N e a resistência de ponta e atrito lateral local do CPT.

1977 Kovacs et al., na 9ª International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, realizada em Tóquio, apresentam medidas da energia cinética do martelo no instante do impacto, ficando evidente que variações da mesma podem até triplicar o valor do índice de resistência à penetração N . Neste mesmo congresso, os europeus apresentam normas européias para os seus principais ensaios penetrométricos, as quais são aprovadas.

1978 Décourt e Quaresma apresentam, no 6º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, no Rio de Janeiro, um método para estimativa de capacidade de carga em estacas, inteiramente baseado no ensaio SPT.

1977, 1978, 1979 Palacios e Schmertmann fazem medições de energia realmente transferidas às hastes através de células de carga, chegando a resultados coerentes com aqueles medidos por Kovacs em 1977. O SPT começa a ter tratamento de ensaio, podendo ser confiável e consistente e possível de ser entendido e padronizado. Schmertmann chama a atenção para o fato do SPT, por ser um ensaio dinâmico, se constituir numa excelente ferramenta na determinação de parâmetros dinâmicos dos solos.

1979 Surge a norma brasileira sobre o SPT intitulada “Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos”, MB 1211/79, que posteriormente muda de numeração para NBR 6484/80. Há, desta maneira, a aceitação definitiva do amostrador do tipo Raymond de 51mm de diâmetro externo.

1981 Nakao apresenta resultados de estudos voltados ao entendimento dos eventos dinâmicos nas cravações de estacas.

1982 Kovacs et al. fazem estudos medindo valores de energia cinética do martelo no instante do impacto e de energia realmente transferidas às hastes, comparando a real eficiência dos conjuntos existentes e em uso nos Estados Unidos, constituídos por martelo, cabeça de bater, haste e sistema de acionamento. No ESOPT II, Nixon apresenta um estado da arte do SPT, onde também são apresentados outros trabalhos importantes para o entendimento deste ensaio.

1985 Belincanta apresenta em Dissertação de Mestrado, na Escola Politécnica da USP, resultados de medições de energia dinâmica do SPT brasileiro, obtidos através de células de carga e acelerômetros.

1986 Skempton analisa a dependência de N do SPT com a textura, compacidade relativa, envelhecimento, pressão vertical e pré-adensamento das areias.

1988 Ranzini propõe medidas de torque no SPT.

1988 e 1989 No ISOPT I, nos Estados Unidos, discute-se um procedimento de referência ao ensaio SPT, no lugar de uma normatização internacional. Este procedimento de referência é aprovado no 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, no Rio de Janeiro em 1989. Neste mesmo congresso, Décourt apresenta um estado da arte do SPT, ressaltando o comportamento diferenciado das areias chamadas de pré-adensadas e/ou envelhecidas, em relação às normalmente adensadas e/ou não envelhecidas. Apresenta ainda uma discussão sobre os fatores que influenciam o N do SPT, e divulga o nível de energia de referência brasileira como sendo 72%, correlações para extrapolação na determinação do N do SPT em ensaios em que não houve penetração de 45cm e, outras correlações oriundas da prática brasileira.

1991 Décourt e Quaresma Filho apresentam resultados obtidos em medidas de torque no SPT, pondo em prática a proposição inicial de Ranzini (1988). Décourt (1991c) considera a medida do torque como a mais importante melhoria introduzida no SPT nos últimos tempos.

1994 Discussão sobre métodos de medida de energia dinâmica no SPT é apresentada por Belincanta et al. na revista Solos e Rochas.

2.4 - Fatores Intervenientes no SPT

Hvorslev (1949) discute os fatores intervenientes no SPT e classifica-os em três grupos, em função da sua pertinência.

- equipamento;
- procedimento; e
- condição do solo.

No grupo de equipamento o autor inclui os seguintes fatores, quanto ao amostrador: diâmetro, razão de área projetada, rugosidade das paredes interna e externa, forma de corte

da sapata, folga interna e externa ("clearance"), área e forma das aberturas de alívio; quanto ao martelo: peso e altura de queda; quanto às hastes: tipo e comprimento da composição; e quanto ao diâmetro da perfuração: diâmetro interno do revestimento em relação ao diâmetro externo do amostrador.

No grupo de procedimento, relaciona: avanço, limpeza e estabilidade do furo de sondagem, profundidade relativa do furo e do revestimento, intervalo de tempo entre a perfuração e amostragem, espaçamento entre as amostragens e, por fim, profundidade de penetração do amostrador.

No terceiro grupo, o dos fatores referentes ao tipo de solo, inclui além da resistência, compactidade relativa ou consistência, permeabilidade, grau de saturação, sensibilidade (solos coesivos) e forma, distribuição e tamanho dos grãos (solos granulares).

Muitos dos fatores relacionados por Hvorslev (1949), no grupo do procedimento, poderiam ser também agrupados naquele de condição do solo, pois eles alteram as condições naturais do solo na cota de amostragem e ensaio.

Muitas dessas observações são notadamente válidas por serem precedentes à fase de normatização, como por exemplo, aquelas referentes ao diâmetro do amostrador, compactação do solo proveniente da não observância de intervalo conveniente de amostragem e avanço de revestimento à frente da perfuração. No entanto, outras perduram ainda hoje, mesmo após a normatização, como a limpeza da perfuração e a instabilidade do furo pelo desmoronamento ou pelo fluxo de solo para dentro da perfuração.

Deve-se ainda salientar dois fatos neste trabalho de Hvorslev(1949):

- a) a existência do conhecimento qualitativo da influência da profundidade (pressão geostática) nos valores de resistência à penetração; e
- b) a descrição do mecanismo estático da penetração de um amostrador, observado através do registro de cravação.

A curva típica de resistência em função da penetração do amostrador, conforme os registros de campo observados, pode ser dividida em três partes distintas: uma primeira parte errática; uma segunda parte de evolução linear governada pela resistência de ponta e atrito lateral interno e externo do amostrador; e a terceira parte também linear governada pelo atrito lateral externo do amostrador e pela ponta ampliada quando do embuchamento do solo. Hvorslev (1949) chama de profundidade de segurança aquela a partir da qual se verifica o embuchamento do amostrador, sem mais a possibilidade de entrada de material no mesmo.

Na década de sessenta, Fletcher (1965) classifica os fatores que intervêm no SPT como sendo de natureza humana, de método (procedimento) e de equipamento, afirmando

ser de fundamental importância o bom entendimento destes fatores e de outras limitações para a compreensão e uso dos resultados do ensaio SPT. Nota-se também que a classificação de fatores intervenientes contempla a mesma natureza daqueles que afetam qualquer outro tipo de ensaio de campo ou mesmo de laboratório.

Sem fazer distinção nesta classificação, Fletcher (1965) apresenta um conjunto de variáveis que foram complementadas por Mohr (1966), as quais são brevemente discutidas a seguir.

- **limpeza do furo de sondagem**

Os processos de perfuração, quando não adequados e com utilização de ferramentas também não adequadas, deixam resíduos de perfuração suficientes para prejudicar o ensaio. Estes resíduos podem obstruir os orifícios e válvula existentes na cabeça do amostrador, aumentando a pressão interna e dificultando a cravação do mesmo, aumentando assim o número necessário de golpes. No sistema de perfuração com rotativa e tubo de revestimento, muito utilizado nos Estados Unidos, os resíduos de perfuração ficam acumulados na parte interna da extremidade do revestimento. Nestas condições, o ensaio é realizado com o solo confinado, quando da cravação do amostrador, aumentando em muito o número de golpes, principalmente no caso de areias. Existem situações contrárias em que o solo é enfraquecido ou mesmo remexido, perdendo a sua resistência natural e, portanto, diminuindo o número de golpes à cravação do amostrador.

- **desequilíbrio hidrostático**

Quando da perfuração abaixo do lençol freático, é importante sempre manter a carga hidráulica, no interior da perfuração, igual ou superior à natural do terreno, evitando o desbalanceamento hidrostático desfavorável à estabilidade do solo na cota do ensaio. Recomenda-se, em muitos casos, o uso de lama de estabilização, o que seria salutar como norma, porém, adviriam algumas dificuldades como a da observação da posição do lençol freático. Os efeitos prejudiciais do fluxo d'água do maciço para o interior da perfuração são mais pronunciados no caso de areias e siltes.

Uma situação muito específica de desequilíbrio hidrostático é aquela proveniente de artesianismo em que, em muitos casos, o equilíbrio hidrostático pode ser recomposto pelo uso de lama de estabilização. Caso não seja restabelecido este equilíbrio, o resultado do ensaio simplesmente deve ser desconsiderado.

- **bomba d'água**

Não existe, mesmo ainda hoje, uma especificação quanto à bomba d'água, em termos de vazão e pressão necessárias à desagregação e à adequada limpeza da perfuração. Sabe-se que seu efeito é considerável na perturbação do solo na cota de ensaio, mas não tem sido feito um estudo mais científico. Teixeira (1977) apresenta um estudo teórico sobre o caso, dimensionando a vazão em função do diâmetro do revestimento e da dimensão dos grãos a serem trazidos à superfície, utilizando a lei de Stokes.

- **uso d'água na perfuração acima do lençol freático**

O uso d'água na perfuração acima do lençol freático pode falsear os resultados do ensaio, não só pela desagregação excessiva mas também pela destruição da estrutura natural do solo, principalmente nos casos de areias finas e de siltes. Além disto, a umidade pode ter um efeito deletério na resistência do solo.

- **amostrador sem condição de uso**

A sapata do amostrador e mesmo os demais componentes do amostrador, se danificados pelo uso ou mal uso e deteriorados pelo efeito abrasivo das areias e pedregulhos ou mesmo por deformações plásticas, oriundas de esforços concentrados, aumentam a resistência à cravação e, portanto, o número de golpes.

- **altura de queda do martelo**

Na década de sessenta, começa a ser usado o sistema de manuseio do martelo com corda e tambor em rotação (sistema "cathead"), o qual com qualquer tipo de martelo que dependa de marca na haste guia para controle de altura de queda, resulta uma altura de queda maior do que a predeterminada. No entanto se o martelo for acionado manualmente, por corda com roldana fixa na torre de sondagem, a altura de queda do martelo, que é superior à predeterminada no início da jornada, passa a ser inferior no final da mesma.

O efeito de qualquer desvio na altura de queda do martelo se faz sentir diretamente no número de golpes, por exemplo, quanto menor a altura de queda, menor a energia portanto, maior será o número de golpes necessários para cravar o amostrador. Por fim, é bom lembrar que, na década de sessenta, os martelos de queda livre se encontravam em fase experimental, não se conhecendo sequer as suas variáveis intervenientes.

- **amortecimento do martelo**

Apesar de, no projeto de norma D1586-58T, da ASTM em 1958, já haver especificação de que o martelo de 63,5 kg deveria ter uma queda livre de 762mm, isto nunca acontece, pois sempre existem atritos na guia e no sistema corda-roldana. Um outro fator de

amortecimento é a inércia do sistema ainda mais quando se utiliza de tambor em rotação. Fletcher (1965) questiona veementemente o uso, por parte de determinadas empresas, de cabo de aço e guincho, em que se confirmam elevadas perdas de energia.

- **tipo e comprimento de hastes**

Por muito tempo foram formuladas questões a respeito do comprimento das hastes, bem como de sua rigidez. Cummings (1949), apud Fletcher (1965), concluiu que, em sondagens com revestimento de 63,5mm, hastes de 25,4mm de diâmetro nominal interno e comprimento de até 30m, a perda de energia nas oscilações laterais era desprezível, sendo posteriormente estendida esta condição a comprimento de hastes de até 42m. Porém com 60m os resultados de SPT já não são mais confiáveis. Fletcher (1965) considera desaconselhável a utilização de hastes de rotativas do tipo N.

- **martelo sem coxim de madeira**

No início dos ensaios os martelos eram providos de coxim de madeira dura. Com o tempo, foram sendo retirados, sem que houvesse um estudo mais apurado e satisfatório sobre o efeito destes coxins de madeira.

- **martelo com excentricidade**

A guia do martelo, quando é mal posicionada e numa forma excêntrica, conduz a um mal contato do martelo com a cabeça de bater no instante do impacto, contribuindo com o aumento das perdas de energia e, portanto, resultando no aumento no número de golpes.

- **presença de pedregulhos e seixos**

A presença de pedregulhos e seixos conduz o SPT a valores erráticos, mesmo quando realizado numa mesma camada de solo de comportamento homogêneo.

- **peso próprio do solo e compacidade relativa das areias**

Gibbs e Holtz (1957) realizaram uma extensa pesquisa para verificar a influência da pressão geostática de um solo arenoso e de sua compacidade relativa sobre o valor N do SPT. Naturalmente quanto mais densa for uma areia maior será o valor de N porém, mantendo a mesma densidade, o valor de N é crescente com o valor da pressão vertical existente. Este fato deve ser considerado quando o SPT é realizado antes de uma escavação, pois a remoção do solo conduzirá a um forte alívio de pressão vertical nas cotas de instalação das futuras fundações.

- **erros de contagem do número de golpes**

A contagem do número de golpes é feita pelos próprios operadores, sem auxílio de nenhum dispositivo de registro. Isto geralmente tem se constituído em fonte de erro.

Além dos fatores acima enumerados, Mohr (1966) chama a atenção para outros fatores, entre os quais a necessidade de lucros das empresas executantes das sondagens, os equipamentos colocados no mercado com fins de obter um aumento de produtividade, mesmo às custas da qualidade dos trabalhos, a equipe de sondagem que geralmente é constituída por pessoas rudes necessitando, portanto, de uma maior supervisão por parte de um inspetor que nem sempre está presente nos trabalhos e, por fim, a necessidade de especificações bem claras, para evitar confusões e melhorar a qualidade dos ensaios.

Apesar da importância atribuída aos processos de avanço da perfuração na determinação do N do SPT, na época do início da normatização americana, a ASTM D1586-58T ou mesmo a D1586-63T não especificam devidamente o processo de avanço da perfuração. Qualquer equipamento é aceitável, desde que proporcione um furo razoavelmente limpo antes da inserção do amostrador, assegurando que a penetração seja executada em solo não perturbado pela escavação.

Uma outra observação importante desta década de sessenta é que, apesar das especificações claras da ASTM quanto ao intervalo de penetração a ser considerado na determinação de N do SPT, perduram ainda ensaios realizados sem o assentamento de 152mm antes da contagem do número de golpes para a penetração de 305mm de ensaio.

Na década de setenta começam os trabalhos para um entendimento mais efetivo dos fatores intervenientes no SPT, iniciando-se a quantificá-los, já que a normatização não se mostrava suficientemente eficiente na uniformização e padronização de resultados. Neste sentido destacam-se os trabalhos, até certo ponto pioneiros, de Palacios, de Schmertmann e de Kovacs, os quais serão discutidos em detalhes, a seguir.

Schmertmann (1978) acredita que as maiores causas das discrepâncias nos valores de N do SPT podem ser separadas em dois grupos básicos:

- a) aquelas referentes às condições de tensão efetiva, na extremidade do furo, no instante do ensaio; e
- b) aquelas referentes à energia que realmente é transferida às hastes e alcança o amostrador na forma de uma onda de compressão.

Na Tabela 2.4, também de autoria de Schmertmann (1978), são colocados os fatores distribuídos não somente em dois mas sim, em quatro grupos a saber:

- tensões efetivas na extremidade do furo, quando da realização do ensaio;
- energia do martelo transferida às hastes e que alcança o amostrador;
- projeto do amostrador; e

- intervalo de penetração.

Nesta mesma tabela procura-se quantificar as influências, algumas delas ainda na forma qualitativa, e com o sentido indicativo de que sua influência é considerável, como aquelas referentes ao primeiro grupo, isto é, referentes à tensão efetiva na extremidade da perfuração que podem falsear por completo o valor de N do SPT. Como exemplo, cita-se o desbalanceamento hidráulico com fluência de material para dentro da perfuração, alterando o valor de N em até mais do que 100%.

Para melhorar as condições de estabilidade e mesmo para se ter a mínima perturbação possível no solo, na cota de ensaio, ou mesmo para evitar qualquer problema de ruptura, tanto Palacios (1977) quanto Schmertmann (1978) são plenamente favoráveis ao uso de lama de estabilização nas perfurações.

Na década de setenta, já era muito clara a influência das tensões efetivas no valor N do SPT, bem como as condições de pré-adensamento (Gibbs e Holtz, em 1957, ou Bazaraa, em 1967). Portanto as condições de tensões horizontais influem muito no valor de N do SPT. Estas observações são reforçadas pelos experimentos laboratoriais de Marcuson e Bieganousky, em 1977.

A preservação do estado de tensão natural ou mesmo a estabilidade do furo de sondagem se torna problemático quando se usam trados mecânicos contínuos com orifício interno abaixo do nível d'água, assim como quando do aumento do diâmetro de perfuração.

A década de setenta se caracteriza não só pelo entendimento da importância da energia transferida às hastes e que alcança o amostrador, mas também pelo mecanismo pelo qual ela se processa. Nesta época é de uso generalizado o sistema de acionamento do martelo através de corda com tambor em rotação, isto é, sistema "cathead", sendo também já consolidado o uso de martelos de queda livre.

Serota & Lowter (1973) apud Palacios (1977) comparam o sistema americano de "cathead" com o sistema inglês de queda livre "Pilcon", notando-se que o sistema americano com uma volta de corda no tambor se compara muito bem com aquele do sistema inglês, todavia com duas voltas de corda no tambor a diferença já era apreciável (em torno de 40% maior o número de golpes para o sistema americano).

Tabela 2.4 - Alguns fatores intervenientes na discrepância de N. Schmertmann (1978)

causa		estimativa da mudança de N (%)
básica	detalhada	
tensão efetiva na extremidade do furo (areias)	uso de lama de estabilização versus revestimento e água	+100
	uso de "hollow stem auger" versus revestimento e água e desbalanceamento hidráulico	±100
	pequeno diâmetro do furo (75mm) versus grande diâmetro (200mm)	+50
energia transferida às hastes e que alcança o amostrador (todos os solos)	de 2 a 3 voltas de corda no tambor versus o sistema de queda livre	+100
	cabeça de bater grande versus cabeça de bater pequena	+50
	comprimento de hastes: menor do que 3m	+50
	de 9m a 24m	0
	maior do que 30m	+10
	variação na altura de queda	±10
projeto do amostrador	hastes A contra NW	10
	amostrador p/ "liners", mas s/ "liners"	-10(areias) -30(argilas sensíveis)
intervalo de penetração	N_{0a30} versus N_{15a45}	-15(areia) -30(argilas sensíveis)
	N_{30a60} versus N_{15a45}	+15(areias) +30(argilas sensíveis)

Foi Kovacs que, em meados da década de setenta, começou de fato e de uma maneira mais sistemática e científica, a determinar a energia cinética do martelo no instante do impacto, através de medida de velocidade máxima alcançada pelo martelo. Os resultados foram surpreendentes como se pode observar na Figura 2.7, em que a eficiência de energia é colocada em função do número de voltas da corda no tambor, no sistema americano do tipo "cathead". Estes mesmos valores são dispostos na Tabela 2.5, podendo se notar que para uma e duas voltas de corda a eficiência de energia é a mesma, mas para três e quatro voltas ela é surpreendentemente muito menor. Este valor está um pouco em desacordo com aqueles de Serota & Lowter (1973), devendo-se salientar que estes últimos não fizeram medida de energia, mas deduções através de observações de resultado final de número de golpes, onde entram em jogo outras variáveis.

Kovacs (1979) também determinou a energia de martelos de queda livre do tipo “pilcon”, através de medidas de velocidade no instante do impacto, observando que em termos de eficiência de energia cinética eles são muito eficientes, chegando a 100% da energia nominal, isto é, $E_{rv} = 100\%$.

Para este tipo de martelo automático surge, no entanto, um outro tipo de variável que é a frequência de golpes, a qual pode alterar a altura de queda do martelo devido à inércia do sistema, como se pode notar na Figura 2.8.

Figura 2.7 - Eficiência de energia cinética medida no instante do impacto. Sistema “Cathead”- Kovacs (1980)

Tabela 2.5 – Eficiência de energia cinética medida no instante do impacto do martelo, $100(\text{energia medida/energia nominal})$, no sistema “cathead”. Kovacs (1980).

nº de voltas de corda no tambor		eficiência de energia cinética $E_{rv}=100(E_v/E^*)$ (%)
voltas contadas	voltas reais	
1	0,81	67
2	1,81	64
3	2,81	43
4	3,81	25

E^* é a energia nominal de 474J

Concomitante às medidas da energia cinética surgem as medidas da energia que realmente se transfere às hastes e alcança o amostrador. Estas medidas começam a serem feitas por Palacios, com a orientação de Schmertmann, através da instalação de pelo menos uma célula de carga junto à extremidade superior da composição das hastes. Além de permitir a medida da energia após as perdas constantes no impacto, também possibilita melhores condições ao entendimento do fenômeno que realmente acontece neste evento dinâmico do SPT.

Figura 2. 8 - Altura de queda no martelo de queda livre em função da frequência de golpes. Kovacs (1979)

Palacios (1977), Schmertmann (1978) e Schmertmann & Palacios (1979) chegam à conclusão de que:

- a) o valor de N do SPT é inversamente proporcional à energia que se transmite ao amostrador e, ainda mais surpreendentemente, à energia contida na primeira onda de compressão incidente, "Enthru". Isto tem sido contestado por outros pesquisadores como por exemplo Décourt & Quaresma Filho.(1994), que tem encontrado discrepâncias na aplicação do conceito de primeira onda de compressão incidente nas explicações de variação da relação T/N com a profundidade.
- b) a energia transferida pelos martelos americanos varia de 30 a 85% da energia nominal de 474J, isto é, de um martelo de 63,5kg caindo livremente de 762mm.

Tomando em consideração estas duas conclusões acima, pode-se facilmente notar que o valor N do SPT pode variar até três vezes só pela variação da energia, o que é maior do que o valor de 100% constante da Tabela 2.4, quando se comparam duas e três voltas de corda no tambor com o sistema de queda livre.

Palacios (1977) justifica a baixa eficiência verificada em um martelo do tipo cilíndrico vazado, nos Estados Unidos denominado de tipo “safe T - driver”, pelo fato de utilizar cabeça de bater maior do que de outros martelos como por exemplo o “safety hammer”. Esta mesma explicação foi usada também por Skempton (1986) para justificar a baixa eficiência do martelo de queda livre inglês, “pilcon”.

No início da década de oitenta, Kovacs et al. (1981) e Kovacs & Salomone (1982) começam a fazer medidas da energia cinética do martelo no instante do impacto e da energia dinâmica realmente transferida às hastes, utilizando a configuração instrumental apresentada na Figura 2.9. Esta sistemática de medida abre a possibilidade de realmente se entender o que acontece no instante da transferência da energia cinética do martelo para a energia dinâmica nas hastes, associando a isto os sistemas martelo - cabeça de bater - hastes. As perdas de energia no impacto são grandes no martelo cilíndrico vazado do tipo “donut” e bem menores no sistema com martelo “safety hammer”, como se pode notar nas Figuras 2.10 e 2.11. Existem algumas incoerências de certo modo físicas nestas medidas, mas ainda assim elas servem como base para indicar comparativamente o comportamento. Os dados constantes nestas figuras são aqueles referentes à eficiência de energia em relação a nominal de 474J, sendo E_v a eficiência de energia cinética no instante do impacto e E_π a eficiência de energia transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente. A explicação para a diferença nos martelos do tipo “donut” e “safety hammer”, quanto a transferência de energia, tem sido o tamanho da cabeça de bater, já que simulações em computador deram como de pouca influência a configuração do martelo.

Na Tabela 2.6 também se apresentam as eficiências de transferência para os dois tipos de martelo, lembrando que Schmertmann (1979) estimava as perdas de energia no impacto dos martelos de 10 a 20%, valores estes até certo ponto incompatíveis com os valores conseguidos por Kovacs & Salomone (1982).

Um outro fator de redução de energia tem sido o comprimento das hastes, que até um determinado ponto impede a entrada de mais energia contida na primeira onda de compressão mas, a partir de um determinado comprimento, começam a prevalecer as perdas pelo amortecimento da onda dos impulsos de tensão na sua propagação em direção ao amostrador.

As medições têm confirmado que a altura de queda do martelo no sistema corda com tambor pode ser controlada dentro dos 10% de influência sobre o SPT. Todavia, quando somado aos outros fatores, como a atitude deliberada dos operadores em alterar o número de voltas da corda em torno do tambor, levaram Schmertmann a preferir a mecanização do acionamento do martelo nos Estados Unidos, isto é, a utilização de martelo automático. Isto de fato eliminaria uma série de variáveis e tornaria o sistema menos dependente do operador, como é o caso de corda com tambor. Serota e Lowter (1973), apud Palacios (1977), já tinham salientado que o martelo "pilcon" inglês conseguia realizar o SPT dentro de uma reprodutibilidade de 10%.

OBS:

- O MARTELO PODE SER DE OUTRO TIPO.
- O SISTEMA DE LEVANTAMENTO DO MARTELO VARIA CONFORME O EQUIPAMENTO.

Figura 2.9 - Esquema de instrumentação utilizado por Kovacs & Salomone (1982).

Figura 2.10 - Eficiência de energias cinética E_v e dinâmica transferida às hastes E_{rr} . Kovacs & Salomone (1982)

Tabela 2.6 - Eficiência de transferência de energia em função do tipo de martelo.

Kovacs & Salomone (1982)

Tipo de martelo	nº de voltas da corda “cathead”	E_v (%)	E_{rr} (%)	E_{rr} / E_v (%)	E_{rr} / E_v (%) Média
safety	2,2	73	73	100	100
hammer	2,8	68	67	99	
donut	2,2	78	61	78	73
	2,2	75	50	67	

Para uma melhor compreensão do uso ou não dos “liners”, bem como do intervalo de penetração do amostrador, quanto à influência no valor do SPT, é bom se voltar ao artigo “Statics of SPT”, de Schmertmann (1979), bem como a Hvorslev (1949) e também a Teixeira (1993).

Figura 2.11 – Eficiência de transferência de energia cinética para dinâmica E_{rr}/E_{rv} em função do tempo $2l/c$. Kovacs & Salomone (1982).

Schmertmann (1979) estabelece uma expressão que governa a resistência oferecida pelo solo à penetração do amostrador, sendo uma parcela de atrito/adesão, nas paredes interna e externa do amostrador, e a outra da resistência de ponta atuante sobre a projeção da superfície anelar da sapata do amostrador. Esta resistência do solo é estaticamente contrabalanceada pelo peso da composição com amostrador e cabeça de bater, acrescida dos esforços estáticos provenientes da energia dinâmica, sendo dada pela expressão.

$$F_e = \{ C_1 A_e + (D_i + D_e) \pi L C_2 R_f \} Q_c - W \quad (2.1)$$

onde

F_e - força estática de cravação.

C_1 - coeficiente de ajuste da resistência de ponta do CPT, $C_1 = 1,0$.

A_e - área projetada da base do amostrador.

D_i e D_e - diâmetros interno e externo do amostrador.

L - comprimento cravado do amostrador.

C_2 - coeficiente de ajuste do atrito/adesão do CPT, $C_2 = 0,7$.

R_f - razão de atrito/adesão e ponta do CPT.

Q_c - resistência de ponta do CPT.

W - peso da composição mais amostrador e cabeça de bater.

Considerando que o número de golpes ΔN necessário para a cravação de cada uma das parcelas de 152mm do amostrador é uma função linear da respectiva resistência estática média, em cada uma destas parcelas de cravação, Schmertmann chegou às respectivas percentagens parciais contidas na Tabela 2.7, em função do tipo de solo expresso pelo R_f . Nesta tabela também estão anotadas as resistências de ponta e lateral em percentagem, estimadas pela expressão matemática 2.1. Nota-se, nessa tabela, que a maior parcela da resistência à penetração nas argilas se constitui da resistência lateral, enquanto nas areias prevalece a parcela de ponta.

A remoção dos “liners” reduz o atrito interno do amostrador, permitindo inclusive quase 100% de recuperação das amostras, todavia altera completamente o valor de N do SPT e a percentagem de distribuição dos golpes como se pode ver na Tabela 2.8, fazendo com que N dependa muito mais da resistência de ponta. Este efeito de redução é maior quanto menos resistente for o solo, pois neste tipo de solo a dependência de N é maior em relação à resistência lateral, a qual é parcialmente reduzida pela retirada dos “liners”.

Tabela 2.7 - Número de golpes em percentagem para cada parcela de 152mm de cravação. Resistência de ponta e lateral em percentagem. Schmertmann(1979)

R_f (%)	$\Delta N_1 / N_t$ (%)	$\Delta N_2 / N_t$ (%)	$\Delta N_3 / N_t$ (%)	Ponta (%)	lateral (%)
1	25	33	42	56	44
2,5	22	33	45	43	57
4	19	33	48	29	71
8	15	33	52	15	85

Tabela 2.8 - Número de golpes em percentagem para cada parcela de 152mm de cravação, após remoção dos “liners”. Schmertmann (1979).

R_f (%)	$\Delta N_1 / N_t$ (%)	$\Delta N_2 / N_t$ (%)	$\Delta N_3 / N_t$ (%)
1	29	33	38
2,5	25	33	42
4	23	33	44
8	20	33	47

Em solos menos resistentes, a cravação é essencialmente comandada pela resistência lateral, enquanto em argilas sensíveis o N do SPT se torna baixo pois a relação atrito/adesão é perdida pela quebra da estrutura do solo, sendo propriamente o N do SPT correspondente a 25% daquele em que o solo não é sensível.

É interessante que Schmertmann, apesar de notificar que os amostradores com “liners” geralmente se encontram totalmente embuchados a partir de 305mm de penetração, não tenha considerado tal situação quando do cálculo dos valores constantes na tabela acima. No entanto, esta condição de embuchamento tem sido considerada nas proposições de Hvorslev (1949) bem como nas de Teixeira (1993).

Uma conclusão importante que Schmertmann tirou de seus estudos sobre a estática do SPT é aquela de que se deve esperar uma melhor correlação de N do SPT com R_f ou mesmo com a resistência de atrito lateral f_s do CPT, do que com a resistência de ponta Q_c .

pois o valor de N depende mais da resistência lateral do que da resistência de ponta, principalmente nos solos de R_f elevado.

Uma outra conclusão ainda retirada da expressão matemática anterior é a de que o peso da composição W , dentro dos valores usuais, não tem tanta importância quanto a resistência do solo tem na determinação do valor de N do SPT. Gibbs e Holtz (1957) apud Palacios (1977) também tinham chegado à conclusão de que o peso das hastes não tinha grande importância sobre os valores de N , sendo a magnitude de sua influência em torno de 5%. Ainda segundo Palacios (1977) o mais importante é o tamanho da cabeça de bater, pois as diferenças de N do SPT, encontradas com hastes de rotativa do tipo N ao invés de hastes do tipo A , têm sido até certo ponto insignificantes.

Teixeira (1977, 1993) analisa 4.000 ensaios de SPT determinando, em relação ao número total de golpes necessários à cravação de 45 cm, os valores de golpes parciais N_1 , N_2 , N_3 necessários para cada 15 cm de penetração, em percentagem, independentemente do tipo de solo desde que homogêneo:

$$N_1 = 0,22 N_t$$

$$N_2 = 0,33 N_t$$

$$N_3 = 0,45 N_t$$

Teixeira também analisa a evolução da penetração em função do número de golpes constatando, independente do tipo de solo, que (Figura 2.12):

- a) a evolução pode ser representada por uma curva até aproximadamente os trinta centímetros iniciais de penetração; e
- b) deste ponto em diante a evolução pode, com boa aproximação, ser representada por uma reta.

É interessante salientar que é justamente em torno de 30 a 35 cm em que, sistematicamente, há o embuchamento do amostrador.

Por fim, Kovacs et al.(1981) fazem um resumo dos fatores intervenientes ao SPT tomando como base aqueles apresentados por Fletcher (1965), Marcuson & Bieganousky. (1977) e Schmertmann (1978). Resulta, desta maneira, a tabela de Schmertmann (1978), anteriormente apresentada, acrescida dos seguintes fatores que aumentam o valor de N do SPT:

- uso de amostrador deformado;
- cravação do amostrador antes do início do ensaio;
- cravação do amostrador em solo dentro do revestimento;

- uso de guincho com cabo de aço
- falta de lubrificação em roldana e;
- outros que tanto podem diminuir como aumentar o valor de N do SPT, como por exemplo, inadequada limpeza de perfuração ou mesmo descuido na contagem do número de golpes.

Figura 2.12 - Número de golpes em função da penetração do amostrador.

Teixeira (1993)

É importante também se apresentar a Figura 2.13 que contém um resumo da eficiência de energia cinética, determinada por diversos pesquisadores, na qual se pode visualizar, com facilidade, diferenças marcantes de eficiência entre alguns dos diversos sistemas de operação do martelo do SPT.

Figura 2.13 - Eficiência da energia cinética em função do sistema operacional do martelo do SPT e, também, do número de voltas da corda no tambor. apud Skempton (1986).

2.5 – Fatores referentes ao solo

Estes fatores, referentes ao solo, serão discutidos tomando como base os trabalhos de Pinto (1966), Mello (1967 e 1971), Palacios (1977), Schmertmann (1978, 1979 e 1991), Skempton (1986) e Décourt (1989).

Índice de vazios

Com o decréscimo do índice de vazios há um aumento do N do SPT, o que facilmente se pode notar pelas inúmeras correlações existentes com a compacidade relativa das areias.

Tamanho médio dos grãos

Fica muito claro no trabalho de Pinto (1966) que, para as areias graduadas, N é crescente com o aumento do tamanho médio dos grãos.

Tamanho dos grãos em areia uniforme

No mesmo trabalho de Pinto (1966), ou em de Mello (1967, 1971), constata-se que N é pouco sensível à variação do tamanho dos grãos, quando das areias uniformes.

Uniformidade das areias

As areias uniformes apresentam baixos valores de N quando comparados com as graduadas.

Pressão neutra

Areias finas ou siltes quando compactos e abaixo do nível d'água, desenvolvem pressão neutra negativa, aumentando sua resistência e portanto o valor de N . Todavia, areias ou siltes, quando no estado fofo, tendem a se contrair, gerando pressões neutras positivas e conduzindo a um baixo valor de N ou mesmo à liquidação. Estes fenômenos são discutidos por Terzaghi & Peck (1948), Mello (1971) e Schmertmann (1978), entre outros.

Forma dos grãos

Segundo Pinto (1966) a angulosidade e rugosidade de superfície dos grãos de areia tendem a aumentar N .

Cimentação

A cimentação conduz também ao aumento de N .

Nível de tensões

Com o aumento da tensão octaédrica há um aumento de N , que não só é sensível à pressão vertical, mas mais ainda às pressões laterais. Isto tem sido muito bem salientado por Décourt (1989), como também por Schmertmann (1978) e Jamiolkowski et al. (1988).

Pré-carga

Mello (1967) e (1971) tem notificado que nas areias o valor de N é pouco sensível à pré-carga, portanto o SPT não serve para indicar tal condição.

Pré-adensamento

Este é outro fator que se pronuncia com ênfase no aumento do valor de N do SPT, sendo exaustivamente discutido por Décourt (1989), Bowles (1988), Skempton (1986) e o pelo próprio Schmertmann (1978), que faz referências à experiência de Marcuson e Bieganousky, de 1977.

Envelhecimento

O efeito do envelhecimento é muito pronunciado sobre o valor de N do SPT como salientado por diversos pesquisadores tais como Skempton (1986), Décourt (1989) e Schmertmann (1991), entre outros.

Décourt (1989) consegue demonstrar, levando em consideração dados reais de obra, que as correlações nas areias de Gibbs e Holtz, de 1957, e as de Marcuson e Bieganousky, de 1977, são coerentes com aquelas de Bazaraa de 1967. Estas últimas são provenientes de

dados de campo onde existem os efeitos do envelhecimento e do pré-adensamento, enquanto as primeiras são provenientes de experimentos feitos em laboratório sem envelhecimento e sem condição de pré-adensamento, tendo no máximo pré-carga que é de pouca eficiência em termos de SPT.

Para as argilas tem-se os fatores: o pré-adensamento, e em decorrência, as próprias tensões laterais; a estrutura, muitas vezes expressa pela própria sensibilidade, e a cimentação, entre outras. Schmertmann (1991) trata com muita ênfase o envelhecimento nas argilas, estudando inclusive o seu mecanismo.

Um outro item que pode ser incluso nas condições do solo é a presença d'água que, segundo Meyerhof (1965), apud Palacios (1977), se reflete diretamente no valor de N do SPT.

2.6 - Mecanismo de transferência de energia dinâmica no ensaio SPT.

O mecanismo de transferência da energia contida no martelo, no instante do impacto, para as hastes é, em primeira aproximação, aquele correspondente ao impacto de um peso sobre uma composição de hastes, sendo ambos constituídos pelo mesmo material. A energia é transmitida ao martelo em impulsos de tensão cuja duração depende do tipo do martelo e do material das hastes.

Desta maneira, quando do impacto do martelo na cabeça de bater, uma onda de tensão se propaga no sentido descendente da composição das hastes, composta de impulsos de tensão sucessivos e decrescentes na intensidade, até aproximadamente o tempo $2\ell/c$, onde ℓ é o comprimento da composição e c é a velocidade de propagação destes impulsos de tensão. O martelo e as hastes permanecem em contato até este tempo de $2\ell/c$, quando ocorre o início da chegada dos impulsos refletidos junto ao amostrador. Posteriormente, o martelo e a cabeça de bater entram novamente em contato, porém muito tardiamente para influir significativamente na cravação do amostrador, segundo Schmertmann & Palacios.(1979).

Na Figura 2.14, é apresentado, esquematicamente, o mecanismo de transferência, propagação, reflexão e absorção de uma onda longitudinal de compressão, notando-se por este esquema que, ao contrário da teoria newtoniana de impacto de corpos rígidos, o amostrador só toma conhecimento do impacto após o tempo correspondente a ℓ/c .

Na Figura 2.15, apresenta-se um registro típico de força no tempo, obtido através de célula elétrica de carga, instalada na extremidade superior da composição, podendo-se observar que:

Figura 2.14 - Esquema simplificado de propagação de ondas de tensão no SPT. Palacios (1977), apud Belincanta et al. (1994).

a) a força de compressão começa a sensibilizar e ser registrada pela célula elétrica de carga a partir do ponto A, alcançando o máximo valor no ponto B;

b) a partir do máximo alcançado no ponto B, começa a haver um decréscimo na intensidade da força de compressão, com o tempo e até o ponto C, quando do início da chegada das reflexões iniciais oriundas da cabeça do amostrador;

c) a análise do registro da força começa a ser complexa a partir do ponto C, pois se constitui no resultado de ondas de tensões ascendentes e descendentes na composição.

d) os pontos D e F correspondem à superposição de impulsos de três ondas de tensões: onda de tensão incidente (compressão), reflexão da cabeça do amostrador e, finalmente, reflexão junto do amostrador; e

e) há perda de contato do martelo e cabeça de bater num tempo correspondente entre o ponto D e F. A norma D4633-86, da ASTM, adota como tempo de término da primeira onda de compressão incidente aquele correspondente ao ponto E.

Figura 2.15 - Registro de força em função do tempo. (composição de hastes de 25,4mm, martelo cilíndrico com pino-guia). Campus/USP/SP. Belincanta et al. (1994)

A energia contida num impulso de compressão é composta de duas parcelas: uma de deformação e a outra cinética, provenientes, respectivamente, da compressão do elemento e da velocidade das partículas. A energia dinâmica transferida às hastes, referente à primeira onda de compressão, pode ser calculada pelas expressões a seguir, em função da força seccional e/ou velocidade de partícula, onde F e v representam a força e velocidade de partícula em função do tempo, registradas na seção instrumentada; t' é o tempo de término da primeira onda de compressão incidente, corresponde ao tempo do ponto E da Figura 2.15; E e a são o módulo de elasticidade e seção transversal das hastes respectivamente; e, por fim, c é a velocidade de propagação dos impulsos de tensão.

$$E_i = \frac{c}{aE} \int_0^{t'} F^2 dt \quad (2.1)$$

$$E_i = \frac{aE}{c} \int_0^{t'} v^2 dt \quad (2.2)$$

$$E_i = \int_0^{t'} Fv dt \quad (2.3)$$

Em função destas expressões existem três metodologias para a determinação da energia dinâmica no SPT que são:

a) obtenção da curva de força em função do tempo, através de célula elétrica de carga instalada na extremidade superior da composição;

b) obtenção das curvas de força e de velocidade de partícula em função do tempo, através de célula elétrica de carga e acelerômetro, instalados na extremidade superior da composição; e

c) obtenção de duas curvas de força em função do tempo, através de duas células elétricas, instaladas junto à extremidade superior da composição.

A primeira metodologia, que corresponde também ao emprego da fórmula (2.1), só conduz a resultado verdadeiro quando não há reflexões da onda de tensão, a não ser aquelas junto do amostrador.

A segunda metodologia, que corresponde ao emprego da fórmula (2.3) conduz a resultados verdadeiros, como foi demonstrado por Belincanta (1985) e discutidos por Sy & Campanella (1991), Goble & Abou-Matar (1992), Abou-Matar et al. (1996), Butler et al. (1998) e Farrar (1998), todavia depende da sensibilidade e estabilidade dos acelerômetros instalados.

A terceira metodologia, que também corresponde à utilização da fórmula (2.3), permite a determinação das curvas de força seccional e velocidade de partículas em função do tempo, é o "Two Point Strain Measurement", que parece ser muito promissor, como apresentado por Matsumoto et al.(1992).

Na Figura 2.16 é apresentada, em forma esquemática, a instrumentação de campo constituída por duas células elétricas de carga, conjuntamente com os respectivos registros, enquanto na Figura 2.17 são apresentados registros típicos de força e velocidade de partículas em unidade de força, obtidos respectivamente através de célula de carga e de acelerômetros.

Figura 2.16-Sistema de aquisição de dados, do tipo IPT. Belincanta et al. (1994).

Figura 2.17 - Registros típicos de força e de velocidade de partícula em função do tempo em ensaio SPT. Belincanta (1985).

Na Figura 2.18 é apresentada a eficiência teórica de energia transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, em função do comprimento da composição, para hastes de 25,4mm, considerando-se duas teorias: a da equação de onda e a newtoniana com coeficiente de restituição.

Figura 2.18 - Eficiência em função do comprimento da composição, para hastes de 25,4mm. Belincanta et al. (1994).

Na Tabela 2.9 são apresentados valores de eficiência de energia transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, medidos em ensaios de SPT brasileiro, não se fazendo distinção do tipo de martelo. Na mesma tabela também são apresentados valores de eficiência para o caso de hastes mais pesadas, Ax, que no entanto não são recomendadas pela NBR 6484/80.

Tabela 2.9 – Valores de Eficiência de Energia no Brasil. Belincanta et al. (1994).

Ensaio	Tipo de haste(mm)	Cabeça de bater (kg)	Estado do coxim	Instrumento utilizado	Comprimento compos. (m)	Efic. média 100(E _i /E*)
1	25,4	4,2	velho	célula IPT	9 a 15	63,9
2	25,4	4,2	novο	célula IPT	14	72,4
3	25,4	4,2	novο	Imp.PDI	12 a 15	63,6
4	25,4	4,2	novο	célula IPT	16 a 22	77,0
5	Ax	3,4	novο	Imp PDI	11 a 22	60,3
6	Ax	3,4	novο	célula IPT	12 a 19	67,2

Na Figura 2.19, apresenta-se a evolução da eficiência com o comprimento da composição das hastes de 25,4mm, observada em ensaios realizados no Campo Experimental da USP, em São Paulo, em 1989.

Figura 2.19-Eficiência de energia em função do comprimento das hastes. Martelo cilíndrico com pino-guia e haste de 25,4mm. Campo Experimental /USP. Décourt et al. (1989).

2.7 - Alguns princípios a serem observados em correlações em geotecnia.

Wroth (1988) procura estabelecer o que ele considera como princípios gerais que formam as bases a serem observadas quando do estabelecimento de correlações ou quando da própria interpretação de ensaios “in situ” em geotecnia.

Muitos dos ensaios de campo surgiram sem que houvesse conhecimento dos princípios e variáveis envolvidas no ensaio sendo, portanto, o seu uso de cunho estritamente empírico baseado em correlações muitas vezes insatisfatórias e que deveriam ser abandonadas.

A escolha das propriedades que vão ser correlacionadas com o resultado de determinado ensaio é de fundamental importância. Para Wroth, o sucesso de qualquer escolha de propriedades e suas correlações vão depender da validade do que se adotou como:

- a) base física de porque se espera tal correlacionamento;
- b) suporte teórico (modelo teórico de comportamento); e
- c) expressão de relacionamento das variáveis, que deve ser em termos adimensionais para se tirar vantagem das regras de escala da mecânica contínua.

A estas condições, Jamiolkowski (1988), apud Décourt (1989), acrescenta uma quarta que é a necessidade de suporte dado através de ensaios em câmara de calibração em laboratório ou através de observação de comportamento de campo.

Wroth (1988) estabelece uma hierarquização nas correlações, separando-as em duas categorias: primárias e secundárias. As primárias se caracterizam pelo vínculo forte existente entre a propriedade e a variável correlacionada, enquanto nas secundárias este vínculo é fraco, sujeitando-as portanto a maiores dispersões.

Como exemplo desta hierarquização pode-se usar a observação de Pinto (1966) e a afirmação de Mello (1971), quanto às correlações, nas areias, entre N do SPT e capacidade de carga, ângulo interno de atrito e compacidade relativa. Nesta seqüência hierárquica, portanto, N se correlaciona melhor com o ângulo de atrito interno do que com a compacidade relativa.

Um outro exemplo poderia ser aquele apresentado por Décourt (1989), que dá ênfase ao uso, como variável, das pressões octaédricas no lugar da pressão vertical, quando da avaliação de N em função da profundidade, nos depósitos de areias.

Hachich & Nader (1992) chamam a atenção quanto ao objetivo das correlações, que é o de prever uma variável (propriedade) em função de uma outra variável, que é de fácil obtenção e, portanto, de custo mais conveniente. Ressalta-se também, no trabalho destes

autores, a diferença entre uma relação funcional e uma relação de estimativa, sendo esta última sempre acompanhada de dispersão.

As dispersões em correlações são fatos marcantes, por causa de fatores que intervêm nos ensaios, fatores estes de naturezas humana, de equipamento, de procedimento e, por fim, aqueles inerentes ao próprio solo. Naturalmente, quando se procura regionalizar as correlações não se está fazendo nada mais do que tentar uniformizar o ensaio e diminuir a extensão do universo referente ao solo.

Os exemplos de dispersão são inúmeros, como se pode notar pelas publicações de Alonso (1980) e Albiero (1990), entre outros.

Na forma de ilustração apresenta-se, na Figura 2.20, um exemplo com dados mais recentes, provenientes de Décourt & Quaresma Filho (1994) e Alonso (1994), envolvendo retas de melhor ajuste aos valores de torque máximo e índice de resistência à penetração N_{72} . Este é um exemplo típico de dispersão proveniente da característica dos solos envolvidos e não de padronização, já que as medidas de torque máximo foram feitas com o emprego do mesmo procedimento de ensaio.

Figura 2.20 – Exemplo de dispersão. Dados provenientes de Alonso (1994) e Décourt & Quaresma Filho (1994).

Hachich & Nader (1992) alertam que as expressões matemáticas que representam as correlações devem sempre vir acompanhadas de informações suficientes para caracterizar a precisão e exatidão dos dados estimados.

2.8 - SPT com Medida de Torque (SPT-T)

Tomando em consideração que o SPT é um ensaio penetrométrico conhecido e empregado internacionalmente a décadas, Ranzini (1988) pensou na possibilidade de se extrair algo a mais deste ensaio simples e rude, sem alterá-lo em sua metodologia.

Sua idéia veio na proposição da medida do atrito/adesão desenvolvido na interface solo-amostrador, quando da realização do SPT nas sondagens de simples reconhecimento, o que não demanda alteração de procedimento no referido ensaio, pois os sondadores normalmente aplicam torque às hastes de cravação com o objetivo de girar o amostrador cravado, facilitando com isto a remoção do mesmo.

A medição do torque pode facilmente ser feita, com “confiança”, por torquímetro disponível no mercado e o atrito/adesão pode ser determinado pela expressão a seguir, em cuja dedução, Ranzini (1988) considera a variação linear do atrito/adesão na base do amostrador e atrito/adesão constante e uniforme nas interfaces laterais interna e externa do mesmo.

$$s = 1000 \cdot T / (40,537 \cdot h - 17,406)$$

onde

s - atrito/adesão desenvolvido na interface solo-amostrador, em kPa;

T - torque aplicado na extremidade superior da composição de cravação, (N.m);

h - penetração do amostrador, em cm.

Esta mesma fórmula foi alterada por Ranzini (1994):

$$f_s = 1000 \cdot T / (40,537 \cdot h - 3,171)$$

onde:

f_s é o atrito/adesão desenvolvido na interface solo-amostrador, em kPa.

Décourt & Quaresma Filho (1991) e Décourt (1991a,b,c,d), tomando como base a proposição de Ranzini e, de fato, sem mudar o procedimento do SPT, iniciaram uma série de medidas de torque em diferentes tipos de solo, correlacionando-os com a resistência à penetração N_{72} brasileira (N obtido com um nível de energia equivalente a 72% da energia nominal de um martelo de 65 kg caindo de 75 cm).

Os resultados obtidos nas primeiras medições de torque indicaram as correlações contidas na Tabela 2.10, onde T é dado em N.m, sendo estes mesmos valores fornecidos na forma de gráfico nas Figuras 2.21 e 2.22.

Uma explicação, dada pelos autores à diferença marcante de resultados entre solos residuais e aqueles da Bacia Sedimentar Terciária de São Paulo, é que os solos residuais (solos de alteração) exibem um valor de K_0 maior do que aqueles correspondentes em solos sedimentares. Foi descartada a possibilidade de efeitos de sucção nos solos residuais não saturados, pois os resultados se apresentaram semelhantes quando os dados foram tratados independentemente em dois grupos separados pelo lençol freático.

Figura 2.21 - Torque T em função da resistência à penetração N_{72} . Solos da Bacia Sedimentar Terciária de São Paulo. Décourt & Quaresma Filho (1991).

Existem fatores que afetam a resistência à penetração N, porém para os quais o torque é pouco sensível tais como a eficiência de energia incidente, comprimento e diâmetro da composição de hastes ou mesmo presença de heterogeneidades tais como pedregulhos.

Figura 2.22- Torque T em função da resistência à penetração N₇₂. Solos residuais de migmatito, granito e gnaiss. Décourt & Quaresma Filho (1991).

Tabela 2.10 – Torque em função de N₇₂, para solos sedimentares e residuais

Tipo de solo	Torque T em função de N ₇₂
Solo da Bacia Sedimentar	$T = 20 + 10 N_{72}$
Terciária de São Paulo	$T = 11 N_{72}$
Solos Residuais de Migmatito, Granito e Gnaiss	$T = 20 + 17 N_{72}$ $T = 18 N_{72}$

obs. torque T em N.m

Havendo correlações bem estabelecidas entre o torque e a resistência à penetração N, no caso brasileiro N₇₂, para cada tipo de solo classificado principalmente pela sua origem, pode-se estimar o valor de N₇₂ a partir do valor de torque medido, independentemente de

uma série de fatores que afetam o SPT. Há indícios de que a relação é simples e linear, do tipo $N_{72} = T/\text{constante}$.

Uma conclusão importante advinda da análise dos dados de torque é que o comprimento das hastes não tem uma importância considerável sobre o SPT. Isto já havia sido observado por Palacios (1977), quando os seus resultados de campo demonstravam que a influência não era tão acentuada quanto à prevista teoricamente.

Em 1994, Décourt & Quaresma Filho (1994) divulgaram resultados novos e também outros provenientes de reanálise de anteriores, os quais são apresentados na Tabela 2.11, onde T é o torque em N.m. Estes mesmos resultados estão apresentados na forma de gráfico na Figura 2.23.

Tabela 2.11 – Torque T em função de N_{72} , para diversos tipos de solo. Décourt & Quaresma Filho (1994)

Tipo de Solo	Relação entre Torque T e N_{72}
Bacia Sedimentar Terciária de São Paulo	$T = (10 - 12) N_{72}$
Solos Residuais do Campo Experimental da USP em São Paulo	$T = 20 N_{72}$
Solos Residuais Saprolíticos de Gnaisse ou Granito	$T = (17 - 20) N_{72}$
Argilas Marinhas de Santos	$T = (35 - 40) N_{72}$
Argilas Porosas e Laterizadas da Avenida Paulista	$T = (25 - 50) N_{72}$

Figura 2.23 - Relações Torque T / N_{72} em função do tipo de solo. Décourt & Quaresma Filho, 1994.

Ainda segundo Décourt & Quaresma Filho (1994), o mais ambicioso objetivo nas medidas de torque é o de servir como instrumento de passagem de experiência adquirida ou consolidada num determinado solo, de um determinado local, para outro solo em outro local.

Propõe-se desta maneira o uso do que se chama de N_{eq} , ou seja o torque medido dividido por um número advindo do local de onde se quer extrapolar a experiência adquirida. Um exemplo disto é a utilização, em outros locais que não os da Bacia Sedimentar Terciária de São Paulo, das fórmulas empíricas de previsão de capacidade de carga em estacas, do método muito conhecido Décourt-Quaresma, usando o N_{eq} dado por T em N.m dividido por 12.

A utilização de N_{eq} começou a ser feita por Décourt desde 1991, quando da reanálise de provas de carga do campo experimental USP/ABEF.

A medida de torque, além de não alterar significativamente os custos de uma sondagem à percussão, proporciona ao engenheiro uma segunda medida de resistência inclusive estática, sendo a primeira aquela dinâmica proveniente do próprio SPT.

A relação T/N é um índice que parece crescer também com a sensibilidade do solo, isto é, com a estrutura do mesmo, podendo ser inclusive um fator a identificar comportamento metaestável de determinados solos.

Pelos dados disponíveis até 1994, valores menores do que dez para T/N_{72} são indicadores de problemas, tais como, a presença de pedregulhos e o desenvolvimento de pressões neutras negativas, como as que ocorrem na presença de areias finas ou siltes compactos.

Menezes & Dall'Aglia Sobrinho (1994) obtêm valores de T/N sistematicamente menores do que dez ($T/N_{72} = 6$) em solos da cidade de Ilha Solteira - SP, que são constituídos por areia fina pouco argilosa porosa, coluvionar e com N menor do que 8 até 11m, aluvionar e com N igual a 10, de 11m a 17m. Valores de T/N igual a 6 também foram encontrados por Décourt (1994) em sondagem executada na cidade de Bauru em 1994, começando a exigir revisão no conceito de $T/N < 10$ como indicador de problemas de heterogeneidade ou mesmo de má execução da sondagem SPT.

Alonso (1994) reafirma que o torque não está sujeito a maioria dos fatores que intervêm na medida do SPT, sendo mais influenciado pelo estado da parede lateral do amostrador, pela velocidade de aplicação do torque e pelos erros aleatórios ou mesmo sistemáticos que são comuns a todas as medidas de qualquer grandeza. Ranzini (1994) acrescenta a esta gama de variáveis que intervêm no SPT, mas não no torque, outras

referentes à energia tais como atrito nas hastes, em roldanas e em cordas, assim como a própria altura de queda do martelo.

O processo de cravação dinâmica do amostrador com a posterior medida do torque e, conseqüentemente, do atrito/adesão na interface solo-amostrador se constitui num sistema muito econômico, quando em comparação com o “cone penetration test” que é um sistema muito mais complexo e dependente de ancoragem ou de carga de reação.

Por fim, Alonso (1994) apresenta (Tabela 2.12) resultados de medições feitas nas cidades de São Paulo, São Carlos e Campinas, onde se nota, para argilas silto-arenosas sedimentares na cidade de Campinas, valores de T/N menores do que dez.

Tabela 2.12 – Atrito f_s e relações T/N para diversos tipos de solos e localidades.

Alonso (1994)

Local	Tipo de Solo	N	f_s (kPa)	T/N
Cidade de São Paulo	Areia fina e média pco argilosa a argilosa ou Argila siltosa pco arenosa a arenosa(sedimentar)	1 - 52	$98,1 \cdot N / 17,8$	10,1
	Silte arenoso pco argiloso (residual)	6 - 38	$98,1 \cdot N / 15$	12,0
USP São Carlos	Areia fina e média pco argilosa (sedimentar)	2 - 15	$98,1 \cdot N / 10$	18,0
UNICAMP	Argila siltosa arenosa (sedimentar)	2 - 7	$98,1 \cdot N / 33$	5,5
Campinas	silte argiloso, pco arenoso (residual)	2 - 19	$98,1 \cdot N / 11,5$	15,7

obs. torque T em N.m

Tanto para Alonso (1994) quanto para Décourt (1995b) a relação T/N não é universal, pois os resultados até hoje divulgados confirmam a alta dependência que tem do tipo de solo.

Ranzini (1994) recomenda que a medição do torque no SPT não pode ser vista somente como um aferidor do SPT, mas deve ser vista como um sistema de medida de atrito/adesão na interface solo-amostrador na condição de ruptura, muito mais confiável e com um grande potencial à previsão de capacidade de carga em estacas principalmente

aquelas por atrito lateral, dependendo somente de coeficientes de ajustes que devem ser determinados por prova de carga instrumentada e em verdadeira grandeza.

Décourt (1995c) considera que o valor T/N não está tão associado à origem sedimentar ou residual do solo, mas sim à condição de seu desenvolvimento estrutural inclusive de sua condição de pré-adensamento.

Ainda segundo esse autor, as medidas de torque não tem sido usadas somente na função de aferidor do SPT, mas tem sido reservadas a elas outras funções muito mais nobres, tais como as que a prática já tem consagrado:

- identificação da presença de pedregulho em camadas de areia, que falseiam os valores de N , contra a segurança.
- identificação de valores de N_{72} , irrealisticamente elevados em camadas de areia fina ou mesmo de siltes compactos, quando situadas abaixo do nível d'água freático.
- identificação de solos colapsíveis.
- identificação do grau de estrutura dos solos.
- extrapolação da experiência obtida e consagrada em uma dada região para solos de características as mais diversas de outra região, utilizando-se do conceito de N_{eq} . Isto tem sido feito com sucesso, extrapolando-se dados da Bacia Sedimentar de São Paulo para os solos residuais da borda da mesma bacia, Décourt (1991a) e Décourt (1994).

Apresentou-se ao meio técnico, recentemente, uma sugestão para especificação da medição de torque nas sondagens de simples reconhecimento com SPT. O método é aquele utilizado e aprimorado pela Engesolos, cuja aparelhagem se constitui de: torquímetro de 490 N.m (50 kgf.m) e de 785 N.m (80 kgf.m), pino adaptador e disco centralizador, cujo conjunto é mostrado esquematicamente na Figura 2.24.

O procedimento do ensaio proposto nesta sugestão de especificação é o que se segue:

“Terminado o ensaio de penetração (SPT) ou seja, cravado o amostrador padrão conforme prevê a norma brasileira NBR 6484/80, retira-se a cabeça de bater, coloca-se o disco centralizador até apoiar-se no tubo-guia e rosqueia-se, na mesma luva onde estava acoplada a cabeça de bater, o pino adaptador sextavado.

Encaixa-se no pino uma chave soquete de medida tal que se ajuste perfeitamente ao pino sextavado. Acopla-se o torquímetro à chave soquete e, em seguida, inicia-se o movimento de rotação das hastes de 25,4mm através de um operador, usando o torquímetro como braço de alavanca.

Cuidado especial deve ser tomado para manter o torquímetro na horizontal, não forçando desnecessariamente o encaixe do mesmo com a chave soquete e desta com o pino sextavado.

Um observador deve acompanhar o instrumento de leitura do torquímetro, anotando a máxima leitura lida e notificando o operador para que interrompa a rotação após alcançada esta leitura máxima. A operação deve ser repetida a cada metro, observando-se sempre a capacidade do torquímetro”.

Quanto aos registros de dados de campo e apresentação em relatório final, os mesmos são feitos junto às resistências à penetração N , anotando-se na forma de fração, em que no numerador vai o torque T em N.m, e no denominador o comprimento cravado do amostrador em cm.

Figura 2.24 - Representação Esquemática de Instalação do Torquímetro.

Alonso (1994).

2.9 - Fatores de correção de N do SPT para uso em projeto

Alguns pesquisadores como Décourt (1989), Bowles (1988), Skempton (1986) e Soares (1994) apresentam, na forma de tabela, fatores para correção de N com o objetivo de emprego em projeto.

Décourt (1989) propõe inicialmente fatores para a estimativa da energia transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, quando não se dispõem de medidas de campo, a serem usadas na expressão a seguir, que é uma função do sistema operacional do martelo, do porte da cabeça de bater e do comprimento da composição.

$$E_i = e_1 \cdot e_2 \cdot e_3 \cdot E^*$$

onde

e_1 - coeficiente que leva em consideração o sistema operacional do martelo, constando seus valores na Figura 2.25;

e_2 - coeficiente que leva em consideração o porte da cabeça de bater, constando seus valores na Figura 2.26;

e_3 - coeficiente que leva em consideração o comprimento da composição. Seus valores constam da Tabela 2.13 e são estimados através da relação m entre a massa da composição e a do martelo;

$$m = (M_{\text{composição}} / M_{\text{martelo}}); \text{ e}$$

E^* - energia nominal do martelo (474J).

Esse autor discorda dos coeficientes da Tabela 2.13, que a teoria propõe mas que a experiência prática não confirma, lembrando que Skempton não adota valores menores do que 0,75.

Tabela 2.13 - Coeficiente que leva em consideração o comprimento da composição

m	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,9
e_3	0,33	0,55	0,70	0,85	0,93	0,99

Figura 2.25 - Coeficiente que leva em consideração o modo operacional do martelo.
Décourt(1989).

Figura 2.26 - Fator que leva em consideração o porte da cabeça de bater.
Décourt (1989).

Ainda nesse trabalho de Décourt (1989), são propostos coeficientes para a correção direta de N em função da massa por metro linear de haste, de uso ou não de "liners" e/ou coxim de madeira, do diâmetro do furo, da frequência de golpes e, por último, daqueles

referentes à eficiência de energia. Todos esses coeficientes são apresentados na Tabela 2.14 e Tabela 2.15.

Tabela 2.14 - Fatores de correção de valores de N medidos. Décourt (1989).

Massa das Hastes para $\ell < 8$ m	6 - 8 kg / m	1,00	Décourt et al. (1989)
	3,23 kg / m	1,15	
Amostrador	normal com "liners"	1,00	Skempton (1986)
	sem "liners"	1,20	
Diâmetro do Furo (somente areias)	65 - 115 mm	1,00	Skempton (1986)
	150 mm	1,05	
	200 mm	1,15	
Frequência de Golpes (somente areias)	30 - 40 golpes / min.	1,00	Seed et al. (1985)
	$N_{60} < 20$	0,95	
	$N_{60} > 20$	1,05	
	10 - 20 golpes / min.	1,05	
Coxim de Madeira Dura	sem	1,00	Décourt et al.(1989)
	novo	0,95	
	velho	0,90	

**Tabela 2.15 - Fatores de Correção Referentes à Eficiência de Energia Incidente, E_{rr} .
Décourt (1989)**

País	Martelo		100Ei/E* (%)	Coef.	Referência
	Tipo	Forma de soltar			
Argentina	donut	Cathead	45	0,75	Seed et al.(1985)
Brasil	Pin weight	Manual	72	1,20	Décourt(1989)
China	donut	free – fall	60	1,00	Seed et al.(1985)
Colômbia	donut	Cathead	50	0,83	Comunicação pessoal
Japão	donut donut	free – fall	85	1,40	Riggs (1986)
		cathead	68	0,13	
Paraguai	pin weigt	Manual	72	1,20	Comunicação pessoal
Inglaterra	donut	free – fall	60	1,00	Skempton(1986)
	donut	cathead	50	0,83	
EUA	donut	Cathead	45	0,75	Seed et al.(1985)
	safety	Cathead	60	1,00	Seed et al.(1985)
	safety	free – fall	85	1,40	Riggs (1986)
Venezuela	donut	Cathead	43	0,72	Comunicação pessoal

Bowles (1988) propõe uma expressão semelhante para a correção dos valores de N do SPT, adaptada para o nível de eficiência de energia da primeira onda de compressão incidente de 60%, desconsiderando-se a correção do efeito da pressão vertical.

$$N_{60} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot N$$

Onde os fatores η são dados nas tabelas a seguir, em função do tipo de martelo, sistema operacional, país de procedência, comprimento da composição, uso ou não uso de “liners” e, por fim, do diâmetro do furo de sondagem.

η_1 - coeficiente da eficiência de energia transferida às hastes

país	donut		safety	
	cathead	free - fall	cathead	free - fall
EUA	0,75	-	1,17 - 1,33	1,33 - 1,67
Japão	1,12	1,30	-	-
Inglaterra	-	-	0,83	1,00
China	0,83	1,00	-	-

η_2 - coeficiente referente ao comprimento da composição

> 10 m	$\eta_2 = 1,00$
de 6 a 10 m	0, 95
de 4 a 6 m	0,85
de 0 a 4 m	0,75

η_3 - coeficiente referente ao uso ou não dos “liners”

sem “liners”	$\eta_3 = 1,00$
com “liners”, areias densas e argilas	0,80
Com “liners”, areia fofa	0,75

η_4 - coeficiente referente ao diâmetro do furo

de 60 a 120 mm	$\eta_4 = 1,00$
150 mm	1,05
200 mm	1,15

Os valores dos coeficientes de correção de N em função do comprimento das hastes, quando estimado por curvas ajustadas a dados de campo, tem sido menores do que os previstos teoricamente, como ilustrado pela figura 2.27.

Figura 2.27 - Efeito do comprimento da composição de hastes sobre a eficiência de energia incidente na primeira onda de compressão. Schmertmann & Palacios (1979).

Para confrontar os valores dos coeficientes tabelados por Décourt (1989) e por Bowles (1988), e também para análise de perdas de energias no instante do impacto, apresentam-se nas Tabelas 2.16 e 2.17 valores de eficiência de energia cinética do martelo no instante do impacto e dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão

incidente, coeficiente de transferência de energia cinética do martelo para energia dinâmica incidente e relação da energia dinâmica incidente com aquela de eficiência padrão de 60%, agrupados por Skempton (1986), em função do país de procedência, do tipo de martelo e de seu modo de operação.

Tabela 2.16 - Eficiência de energia cinética e dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente. Skempton (1986)

país	Sistema operacional		Sistema de martelo		$E_{rv} \text{ (%)}$ $100E_v/E^*$	$E_{rr} \text{ (%)}$ $100E_r/E^*$	η E_{rr}/E_{rv}
	tipo	tambor	martelo	cabeça kg			
WES	free-fall		vicksburg	0	100	83	0,83
Japão	tombi		donut	2	100	78	0,78
Japão	Cathead 2 voltas	pequeno	donut	2	83	65	0,78
EUA	Cathead 2 voltas	grande	safety	2,5	70	55	0,79
Inglaterra	Cathead 1 volta	pequeno	old	3	85	60	0,71
USA	Cathead 2 voltas	grande	donut	12	70	45	0,64
Inglaterra	free-fall		pilcon	19	100	60	0,60

Tabela 2.17 – Eficiência de energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente em relação à padrão de 60%. Skempton (1986)

país	Martelo	Sistema Operacional	$E_{rr} \text{ } 100E_r/E^*$	$E_{rr}/60$
Japão	donut	Tombi	78	1,3
	donut	2 voltas	65	1,1
China	pilcon	Free-fall	60	1,0
	donut	Manual	55	0,9
EUA	safety	2 voltas	55	0,9
	donut	2 voltas	45	0,75
Inglaterra	pilcon, dando	Free-fall	60	1,0
	padrão velho	2 voltas	50	0,8

À medida que martelos mais eficientes, acompanhados dos respectivos procedimentos, vão se introduzindo no mercado de execução do SPT, os projetos vão se tornando mais e mais conservadores, pois os valores de N do SPT estão progressivamente diminuindo para o mesmo tipo de solo.

O crescente aumento da eficiência do SPT, nos Estados Unidos, vem da mudança do martelo do tipo “donut” para o “safety” que atualmente está sendo substituído pelos martelos automáticos de queda livre, bem como do não uso dos “liners”, que hoje faz parte da norma da ASTM, (ver D1586-84 e D1586-92).

As normas ainda deixam muita liberdade quanto à execução do ensaio, conduzindo a uma diferença muito grande de resultado, podendo facilmente a resistência à penetração N variar até três vezes e fazendo prescrever com isto as correlações existentes até o momento.

Segundo Kovacs (1994), os fatores que influem no ensaio são de quatro tipos: operador, modelo específico de equipamento de perfuração, equipamento do SPT e, por fim, o procedimento usado que contempla a perfuração e o ensaio em si.

As variáveis que mais influem no valor do N do SPT, entre outros e excluindo o operador, são o uso ou não de “liners”, tipo do martelo, sistema de cabeça de bater, número de voltas da corda no tambor, tipo e direção de fluxo d’água nas peças de perfuração, cuidados específicos e manutenção da carga hidráulica nas perfurações, entre outros fatores.

Kovacs (1994) ainda vê duas maneiras de tratar as correlações antigas em que o SPT era realizado com um nível de eficiência diferente do atual, isto é, mais baixo:

a) converter os valores de N do SPT para a eficiência correspondente da época em que tal correlação foi feita; ou

b) converter as correlações para o nível de eficiência atual.

Em função do exposto acima, apresentam-se na Tabela 2.18 os níveis de energia no SPT em função da época, existentes nos Estados Unidos, com algumas modificações que se fizeram necessárias.

Desta maneira, a comparação entre o N de SPT obtido, num mesmo depósito natural, com o equipamento (martelo do tipo “donut”) e metodologia da década de 1950 e aquele obtido na década de 1980 (martelo do tipo “safety hammer”) ou aquele obtido na década de 1990 (martelo do tipo queda livre), é a que se segue.

- Considerando somente a energia dinâmica, o valor de N do SPT obtido com martelo “safety hammer”, na década 1980, é 33% inferior àquele obtido com martelo do tipo “donut” na década de 1950. Se considerado também o não uso de “liners” na década de 1980, esta percentagem passa a ser de 44%.

- Considerando somente a energia dinâmica, o valor de N do SPT obtido com martelo automático de queda livre na década 1990 é 56% inferior àquele obtido com martelo do tipo “donut” na década de 1950. Se considerado também o não uso de “liners” na década de 1990, esta percentagem passa a ser de 63%.

Em resumo:

$$N_{1950} = 1,50 \text{ ou } 1,80 N_{1980} \quad \text{para martelo "safety hammer"}$$

$$N_{1950} = 2,25 \text{ ou } 2,70 N_{1990} \quad \text{para martelo automático de queda livre}$$

Naturalmente estes coeficientes seriam ainda alterados se considerado o fato que em 1950 o ensaio SPT era executado de duas maneiras, isto é, com e sem assentamento inicial de 152mm do amostrador.

Tabela 2.18 - Níveis de energia incidente usados no SPT em função do tempo.

Kovacs (1994).

Ano	Penetração do amostrador (mm)	$100E_i/E^*$	“Liners”
1950 - 1960	305	40	sim
1950 - 1960	457	40	sim
1960 - 1990	457	60	sim
1960 - 1990	457	60	não
1990	457	90	sim
1990	457	90	não

3 SISTEMA ADOTADO PARA REGISTRO DE EVENTOS DINÂMICOS NO SPT E PARA CÁLCULO DA RESPECTIVA ENERGIA, TRANSFERIDA ÀS HASTES NA PRIMEIRA ONDA DE COMPRESSÃO INCIDENTE.

3.1 Introdução

Para o registro de eventos dinâmicos em ensaios SPT, utilizou-se o sistema desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A – IPT, constituído por “hardwares” e “softwares” necessários a captação e armazenamento de sinais no campo, manuseio, interpretação e cálculo em escritório.

Este sistema, apresentado de forma esquemática na Figura 3.1, compõe-se basicamente de :

- transdutor de deformação (célula de carga) ;
- módulo de tratamento e condicionamento de sinais ;
- módulo eletrônico de aquisição de dados (placa conversora analógica/digital) ;
- microcomputador; e
- “softwares” para aquisição e análise de sinais.

3.2 Transdutores de deformação (célula de carga)

As células de carga, para uso em hastes de 25,4mm de diâmetro nominal interno e de massa de 3,23 kg/m, foram confeccionadas em segmentos de 30cm destas mesmas hastes, procurando-se desta maneira não criar singularidade na composição de hastes.

A superfície externa de cada segmento de haste foi preparada para receber dois pares de extensômetros elétricos (“strain gages”), instalados em posições diametralmente opostas.

Cada par de dois extensômetros foi posicionado de forma que um dos extensômetros fosse sensível à deformação no sentido longitudinal do segmento de haste e o outro à deformação no sentido transversal.

Finalmente os quatro extensômetros de 120Ω foram ligados numa configuração de ponte de “Wheatstone” completa, obtendo-se desta maneira uma célula de carga sensível às deformações provenientes de esforços axiais (longitudinais) e pouco sensível à variação de temperatura. Na Figura 3.2 apresenta-se esquematicamente a configuração do circuito elétrico de cada célula de carga.

3.3 Módulo de tratamento e condicionamento de sinais

O módulo de tratamento e condicionamento de sinais possui dois canais, sendo cada um deles constituído por uma fonte de alimentação para os elementos sensores ("strain gages"), um amplificador de sinais de saída dos elementos sensores e de uma unidade de filtro.

Cada fonte de alimentação de cada ponte de "Wheatstone" (cada célula de carga) é ajustada, através de potenciômetro, para o fornecimento estável de um nível de voltagem escolhido na faixa de 4 a 15V, tendo sido usado 5V.

O amplificador utilizado em cada canal possui características de baixo ruído, baixo "drift" e é otimizado para amplificar sinais provenientes de transdutores (células de carga) que possuam nível de resposta baixo (até 2mV/Volt de fundo de escala). O ganho é programável pelo usuário na faixa de 1 a 2.500 vezes em relação ao sinal de saída dos sensores elétricos, tendo sido escolhida a amplificação de 500 vezes.

A unidade de filtro de cada canal se constitui de um filtro passa baixo (Butterworth de dois polos), em que o usuário pode escolher a frequência de corte em que deseja trabalhar desde 10 Hz até 20 KHz, tendo sido escolhido o corte de 1.000 Hz, que é o recomendado para medidas de eventos dinâmicos do tipo que ocorre no SPT.

3.4 Módulo eletrônico de aquisição de dados (Placa Conversora A/D).

Este módulo foi desenvolvido para máquina do tipo IBM/ PC, principalmente por se tratar de um padrão adotado mundialmente em instrumentação e em sistema de medições, tornando qualquer máquina que possua este padrão num sistema de aquisição de dados, através da simples conexão desta placa A/D em um "slot" de expansão.

Este módulo de aquisição de dados é constituído por uma seção de processamento analógico, um conversor analógico/digital e um sistema de controle e de interface digital para microcomputador.

As características principais deste módulo eletrônico de aquisição de dados é a de possuir dois canais que trabalham a uma taxa de 8.000Hz cada um e com resolução de 12bits de amplitude.

Figura 3.1 – Sistema de aquisição de dados do tipo IPT.

Gages 1 e 3, sensíveis à deformação longitudinal
 Gages 2 e 4, sensíveis à deformação transversal

Figura 3.2-Apresentação esquemática do circuito elétrico da célula de carga

3.5 Microcomputador

O microcomputador utilizado foi um “Notebook”, PC 486, DX 33 com 4 MB de RAM e 240 MB de “hard disk”, com “slots” de expansão.

3.6 “Software” aplicativo

Serão apresentados somente detalhes de interesse do “software”, desenvolvido pelo IPT, para aquisição e análise de sinais dinâmicos do SPT. A maior parte das rotinas deste “software” foi implementada em Pascal, com exceção daquelas mais críticas em relação ao tempo de processamento que foram desenvolvida em linguagem “Assembly”. Foi ainda desenvolvida uma biblioteca gráfica em Pascal, orientada a objeto, para plotagem em telas dos sinais de cada canal.

O “software” permite, além da aquisição e análise em campo dos sinais amostrados relativos a cada golpe do ensaio SPT, o armazenamento destes sinais em arquivo, para uma posterior análise em escritório. Pode-se ainda com facilidade no campo ou no escritório, para cada registro de força seccional em função do tempo, calcular o valor da força seccional máxima e a energia transferida às hastes da composição, referente à primeira onda de compressão incidente e com base no comprimento das hastes.

Inclui-se a possibilidade de se definir os pontos inicial e final de integração do sinal de força seccional em função do tempo, podendo-se desta maneira determinar, além da força seccional em qualquer tempo, a energia dinâmica referente à primeira onda de compressão incidente e simulada para o comprimento de hastes de interesse, isto é, energia extrapolada.

Os gráficos de força seccional em função do tempo, digitalizados e apresentados na tela do computador, podem ser impressos com o auxílio de uma impressora, emitindo-se inclusive relatório, contendo para cada golpe proveniente de cada célula de carga, a força máxima observada e o instante em que se registrou, a energia transferida às hastes e sua eficiência em relação à energia nominal de 474J.

O “software” foi estruturado para as seguintes funções:

- entrada de constantes;
- aquisição e análise de campo; e
- análise de sinais gravados.

Na função de entrada de constantes, são fornecidos os parâmetros necessários à aquisição de campo e à análise de sinais gravados, tais como constantes de calibração das células de carga, fator de ampliação, massa por unidade de comprimento das hastes e área da seção transversal, massa do martelo e altura de queda, velocidade de propagação de impulsos de tensão, intervalo de tempo de exibição na tela e fundo de escala.

Na função de aquisição e análise em campo, o sistema permanece constantemente digitalizando os sinais capturados e plotando os gráficos em tela, apresentando o valor de força seccional máxima, até que seja interrompido pelo usuário. Nesta função pode-se, através de comando em submenu, especificar o desejo de gravação dos sinais em disco e, também, de estabelecer o nível de “trigger” de aquisição, isto é, o nível de tensão que quando ultrapassado aciona-se a aquisição do sinal.

Pode-se a qualquer instante interromper a aquisição de campo e passar-se à análise do registro exposto na tela ou de qualquer outro anteriormente gravado.

Na opção de análise de sinais gravados, permite-se o reprocessamento dos sinais já armazenados em disco redefinindo-se, se necessário, parâmetros tais como, comprimento de hastes, constantes de aferição de células de carga, intervalo de integração no registro de força seccional em função do tempo, em que serão calculadas a energia e eficiência correspondente, assim como o próprio valor da força seccional.

Este “software” foi elaborado para trabalhar com sinais obtidos em duas células de carga, permitindo inclusive que se faça a estimativa de energia absorvida junto ao amostrador quando da reflexão da primeira onda de compressão incidente, utilizando para isto da metodologia proposta por Schmertmann e Palacios (1979).

3.7 - Aferição do Sistema

As células de carga após sua confecção foram aferidas, utilizando-se cargas estáticas aplicadas por prensa hidráulica e controladas por outra célula de carga de referência, anteriormente aferida.

As células de carga, montadas em segmentos da própria haste de composição, têm apresentado mudanças na constante de aferição, o que indica o elevado nível de tensão a que são submetidas. Isto tem conduzido à adoção do procedimento de se fazer constantemente aferições da célula no seu período de utilização, assim como tem demonstrado a necessidade de se confeccionar células mais robustas e com aço de resistência mais elevada.

Para a aferição das células foi desenvolvido um “software” que permite a leitura do valor da voltagem de retorno, após cada aplicação de carga, diretamente no micro, utilizando-se o sistema completo, isto é, célula de carga, módulo de tratamento e condicionamento de sinais, módulo eletrônico de aquisição e microcomputador.

Nas Fotos 3.1 e 3.2, apresentam-se o sistema de aquisição de dados do tipo IPT e o posicionamento da célula de carga na prensa universal da UEM (Universidade Estadual de Maringá) para os trabalhos de aferição, cujo resultado é apresentado na forma de gráfico, como aquele na Figura 3.3.

FOTO 3.1

Aferição de célula de carga na prensa universal da UEM

FOTO 3.2

Microcomputador, fontes, condicionadores de sinais e placa A/D, integrantes do sistema do tipo IPT

Figura 3.3 – Resultado de aferição de célula de carga

Aferição da Célula Especial 26 de novembro de 1997

carga da célula kN	leitura em voltagem (V)				
	1	2	3	4	média

4,9	0,111	0,111	0,111	0,111	0,111
9,8	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271
14,7	0,431	0,431	0,431	0,431	0,431
19,6	0,571	0,571	0,571	0,571	0,571
24,5	0,731	0,731	0,731	0,731	0,731
29,4	0,891	0,891	0,891	0,891	0,891
34,3	1,031	1,031	1,031	1,031	1,031
39,2	1,191	1,191	1,191	1,191	1,191
44,1	1,351	1,351	1,351	1,351	1,351
49,1	1,491	1,491	1,491	1,491	1,491
54,0	1,651	1,651	1,651	1,651	1,651
58,9	1,791	1,791	1,791	1,791	1,791

4 EXPRESSÕES MATEMÁTICAS PARA CÁLCULO DE FORÇA SECCIONAL, ENERGIA INCIDENTE E EFICIÊNCIA CORRESPONDENTE.

4.1 Força Seccional nas hastes em função do tempo, proveniente da propagação de impulsos de tensão, gerados pelo impacto do martelo.

O impacto do martelo é simulado pelo impacto de um peso cilíndrico em uma barra de comprimento infinito, constituída pelo mesmo material elástico linear (representação esquemática na Figura 4.1, inclusive com simbologia e dados pertinentes). Nesta simulação desconsidera-se a existência do coxim de madeira e da cabeça de bater e, nas seções de contato do martelo com as hastes, considera-se o que se segue:

- contato pleno entre as seções transversais inferior do martelo e do topo das hastes; e
- equilíbrio de forças seccionais e compatibilidade de deslocamentos e de velocidades.

Pela teoria da propagação da onda longitudinal de tensão em meio elástico linear, tem-se uma relação biunívoca entre força seccional F e velocidade de partícula v , isto é, $F=vZ$, sendo $Z=Ea/c$, onde E , a e c são respectivamente módulo de elasticidade, área de seção transversal e velocidade de propagação dos impulsos de tensão.

Quando o martelo, que se encontra com a velocidade de queda V_o , choca-se no topo das hastes, uma vez que foi desconsiderada a existência da cabeça de bater, geram-se a partir do contato martelo/hastes dois impulsos de compressão: um ascendente desacelerando as partículas do martelo, e o outro descendente acelerando as partículas das hastes.

Pelo equilíbrio de forças e compatibilidade de deslocamentos e de velocidades, aplicados às seções de contato, na condição inicial para força seccional incidente nas hastes F_{ho} , no intervalo de tempo de zero a $2L/c$, onde L é o comprimento do martelo, tem-se:

$$F_{ho} = V_o \cdot Z_m \cdot Z_h / (Z_m + Z_h) \quad (1)$$

Sendo Z_m e Z_h iguais respectivamente a EA/c e Ea/c , onde E é o módulo de elasticidade, c é a velocidade de propagação dos impulsos de tensão, A e a são áreas das seções transversais do martelo e das hastes respectivamente.

No intervalo de tempo de $2L/c$ a $4L/c$, pela imposição novamente das condições de equilíbrio de força e compatibilidade de deslocamentos e de velocidades, tem-se para a força seccional:

$$F_{h1} = [V_o.Z_m.Z_h/(Z_m + Z_h)][(Z_m - Z_h)/(Z_m + Z_h)]$$

Para o intervalo de tempo de $4L/c$ a $6L/c$:

$$F_{h2} = [V_o.Z_m.Z_h/(Z_m + Z_h)][(Z_m - Z_h)/(Z_m + Z_h)]^2$$

Desta maneira e na forma geral, a expressão da força seccional em função do tempo passa a ser:

$$F_{hn} = [V_o.Z_m.Z_h/(Z_m + Z_h)][(Z_m - Z_h)/(Z_m + Z_h)]^n \quad (2)$$

onde n é um número inteiro e uma função do tempo t decorrido após o impacto do martelo, determinado pela expressão abaixo:

$$2nL/c \leq t \leq 2(n+1)L/c \quad (3)$$

As funções matemáticas acima indicam que a transferência de energia cinética do martelo para energia dinâmica incidente nas hastes, a partir do instante do impacto, se dá através de impulsos de compressão sucessivos, de duração igual a $2L/c$, sendo os mesmos decrescentes na intensidade com o tempo.

Considerando-se:

- $E = \rho c^2$, proveniente da teoria da onda longitudinal de tensão, onde ρ é a massa por unidade de volume do material constituinte do martelo e das hastes;
- $r = a/A$, sendo a e A as áreas das seções transversais das hastes e do martelo respectivamente; e
- $n' = tc/2L$, isto é, n' é uma função contínua e linear do tempo;

a força seccional incidente nas hastes em função do tempo t , contado a partir do impacto do martelo, passa a ser:

$$F_{ht} = \frac{V_0 \cdot \rho \cdot c \cdot a}{1 + r} \left(\frac{1 - r}{1 + r} \right)^{\frac{c}{2L} t} \quad (4)$$

Para a condição em que a área da seção transversal do martelo for muito maior que a área da seção transversal das hastes, isto é, martelo considerado rígido e r tendendo a zero, a expressão matemática deduzida por Fairhurst (apud Schmertmann e Palacios, 1979), torna-se.

$$F_{ht} = V_0 \cdot \rho \cdot c \cdot a \cdot \exp\left(-\frac{a \cdot \rho \cdot c \cdot t}{M_m}\right) \quad (5)$$

Onde:

F_{ht} , a força seccional nas hastes no tempo t ; V_0 , a velocidade do martelo no instante do impacto; ρ , massa por unidade de volume do martelo e das hastes; c , velocidade da propagação dos impulsos de tensão; a , área de seção transversal das hastes; t , tempo contado a partir do impacto do martelo e M_m , massa do martelo.

4.2 Determinação da energia dinâmica transferidas às hastes.

A energia dinâmica contida numa onda de tensão é teoricamente composta por duas partes iguais: uma correspondente à energia armazenada na deformação elástica e a outra cinética proveniente da velocidade com que as partículas estão animadas.

A teoria ainda nos indica que a energia dinâmica incidente, até o tempo t , pode ser calculada somente pelo uso da força seccional incidente nas hastes em função do tempo, de acordo com a expressão:

$$E_{it} = \frac{c}{Ea} \int_0^t F^2 dt \quad (6)$$

4.2.1 Cálculo da energia incidente nas hastes, tomando como base Schmertmann/Palacios.

Associando-se as expressões 2 e 6, a energia dinâmica incidente nas hastes no intervalo de tempo de zero a t , onde t é um tempo menor do que aquele necessário à chegada dos impulsos de reflexão provenientes do amostrador, pode ser calculada pela expressão de Schmertmann/Palacios.

$$E_{it} = \frac{2V_0^2 E a L}{c^2} \left[\frac{(1 - K^n)}{4r} + \left(\frac{tc}{2L} - n \right) \frac{K^n}{(1 + r)^2} \right] \quad (7)$$

Onde:

L – comprimento do martelo;

c – velocidade de propagação dos impulsos de tensão;

a – área de seção transversal das hastes;

E – módulo de elasticidade;

V_0 – velocidade do martelo no instante do impacto;

r – relação entre áreas das seções transversais ($r = a/A$);

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

n – um número inteiro correspondente ao tempo t contado a partir do impacto do martelo, obtido segundo a expressão 3;

4.2.2 Cálculo da energia incidente nas hastes, tomando como base Fairhurst

Associando-se as expressões 5 e 6, tem-se a expressão abaixo de Fairhurst para o cálculo da energia dinâmica incidente nas hastes no intervalo de tempo de zero a t .

$$E_{it} = \frac{M_m V_0^2}{2} \left[1 - \exp \left(- \frac{2a\rho c t}{M_m} \right) \right] \quad (8)$$

4.3 Eficiência teórica da energia incidente.

A eficiência teórica da energia dinâmica incidente, transferida às hastes até o tempo t , com referência à energia nominal do martelo de massa M_m caindo de uma altura H , isto é, $E_{\text{nominal}} = M_m g H = 1/2 M_m V_0^2$, pode ser determinada pela expressão de Schmertmann/Palacios ou por aquela de Fairhurst, que são oriundas das expressões 7 e 8, respectivamente.

$$\eta_{\text{schmertmann/palacios}} = \left[(1 - K^n) + 4r \left(\frac{ct}{2L} - n \right) \frac{K^n}{(1+r)^2} \right] \quad (9)$$

$$\eta_{\text{fairhurst}} = \left[1 - \exp \left(- \frac{2a\rho ct}{M_m} \right) \right] \quad (10)$$

A transferência de energia referente à primeira onda de compressão incidente é interrompida quando da chegada de impulsos refletidos junto à interface solo/amostrador, isto é, sendo ℓ o comprimento da composição de hastes, a partir do instante de tempo $2\ell/c$, quando o martelo perde momentaneamente o contato com as hastes. Considerando-se $2\ell/c$ como tempo t nas expressões 9 e 10, observa-se que a eficiência de energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente é uma função crescente com o comprimento da composição e passa pela origem. No entanto dados experimentais indicam que esta função não passa pela origem, o que se justifica pelos seguintes motivos:

- Existência de coxim de madeira e cabeça de bater;
- Imperfeições no impacto;
- Sempre há uma decorrência de tempo entre o instante do impacto e a força seccional máxima alcançada; e
- Existência de impulsos de tensões refletidos antes da chegada das reflexões provenientes da região do amostrador.

Desta maneira, toda estimativa de energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, para um comprimento de composição ℓ , partindo-se de uma eficiência de energia medida e calculada num comprimento de composição menor, está fadada a ser grosseira se for feita com base em valores de eficiências teóricas. Como alternativa, pode-se adotar o que se segue:

- Das curvas de força seccional em função do tempo, medidas em composições de comprimento ℓ , extrapolam-se energias dinâmicas transferidas na primeira onda de compressão incidente para comprimentos de composição ℓ' de interesse e menores do que ℓ , tomando-se como base o esquema da Figura 4.2, calculando-se inclusive as eficiências correspondentes às energias assim extrapoladas;
- Faz-se o melhor ajuste da curva do tipo exponencial, $\eta = A + B \exp(-C\ell')$, aos dados de eficiências de energias dinâmicas incidentes e extrapoladas; e
- Com base na expressão do tipo exponencial ajustada, estima-se o valor da eficiência a qualquer comprimento ℓ de composição de hastes, de interesse.

Na Figura 4.3, apresentam-se curvas típicas do tipo exponencial, ajustadas a valores extrapolados de eficiência de energia dinâmica incidente.

Maiores detalhes na dedução das expressões contidas neste capítulo, podem ser encontrados em Belincanta (1985), Schmertmann e Palacios (1979) e Yokel (1989).

ρ massa por unidade de volume do aço (7850 kg/m^3)

E módulo de elasticidade do aço (21400 MPa)

c velocidade de propagação de impulsos de tensões para o aço (5120 m/s)

a área da seção transversal das hastes

A área da seção transversal do martelo

H altura de queda do martelo. (75cm pela NBR 6484/80 e 76,2cm pela D1586-92 da ASTM).

V_0 velocidade do martelo no instante do impacto, nominal de $(2gH)^{1/2}$.

M_m massa do martelo, 65kg pela NBR6484/80 e 65,3kg pela D1586-92.

ℓ comprimento das hastes

$Z_h = Ea/c$ $Z_m = EA/c$.

Figura 4.1- Representação esquemática do impacto do martelo de SPT

Figura 4.2 - Registro típico de força em função do tempo e representação esquemática do intervalo de cálculo de energia incidente, para comprimento ℓ' de interesse.

Figura 4.3 - Curvas típicas, do tipo exponencial, ajustadas a valores de eficiências de energias extrapoladas

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Introdução

O objetivo deste trabalho consiste na avaliação dos sistemas de execução do ensaio SPT, existentes no Brasil e variantes daquele da norma vigente NBR6484/80 e, também, da avaliação de alguns fatores considerados de relevância.

Para se alcançar este objetivo foram feitos registros em ensaios SPT executados por empresas escolhidas em função dos interesses da pesquisa. Também foram realizadas algumas sondagens específicas, medindo-se N e torque máximo, para possível confronto de resultados.

A análise será feita tomando-se como base principal a energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, calculada na forma de eficiência relativa à energia nominal de 474J, extrapolada para composição de 14m de comprimento e, em alguns casos, estimada também para composição de comprimento infinito.

Os dados, assim obtidos em oito locais, de quatro cidades de três estados brasileiros, em sondagens executadas por seis empresas distintas, são apresentados em tabelas, em anexos e ilustrados em fotos, na forma conveniente e necessária a cada passo da análise.

5.2 Empresas Escolhidas para a Realização dos Ensaios

As seis empresas, escolhidas em conformidade com o objetivo do trabalho, executam rotineiramente as sondagens/ensaio SPT com procedimentos interessantes à pesquisa. A seguir, são apresentadas as características de cada empresa escolhida.

- Empresas 1 e 3: executam ensaios rotineiramente com o procedimento proposto pela norma brasileira NBR6484/80, isto é, avanço da perfuração com trado helicoidal até o lençol freático e abaixo com circulação d'água, uso de martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira e acionamento com corda manual.
- Empresa 2: procedimento da NBR6484/80, usando martelo cilíndrico vazado (este tipo de martelo também é contemplado por esta norma), com coxim de madeira, acionamento com corda manual.
- Empresas 4 e 5: procedimento da NBR6484, excetuando-se o acionamento do martelo cilíndrico com pino-guia, que é feito com cabo de aço manual, não previsto pela norma NBR6484/80.

- Empresa 6: usa na rotina de suas sondagens/ensaios SPT o avanço da perfuração com a cravação sucessiva do próprio amostrador, através de golpes do martelo cilíndrico com pino-guia, acionado com corda manual.

5.3 Forma de análise dos dados

Os dados obtidos e coletados serão analisados em conformidade com o objetivo deste trabalho, que consiste em avaliar a influência de sistemas variantes e de fatores relevantes aos valores de N. Para tanto, estes dados serão separados em blocos, com as seguintes referências:

- Sistema brasileiro da NBR6484/80, constituído por avanço da perfuração com trado e circulação d'água, martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, acionamento com corda manual e com cabeça de bater normal de 3,6kg.
- Estado de desgaste da composição de hastes.
- Sistema de dispositivo manual para soltura do martelo (gatilho manual).
- Sistema brasileiro da NBR6484/80, constituído por avanço da perfuração com trado e circulação d'água, martelo cilíndrico vazado, com coxim de madeira, acionamento com corda manual e com cabeça de bater normal de 3,6kg.
- Acionamento com cabo de aço manual.
- Uso ou não de coxim de madeira.
- Cabeça de bater de tamanho variado (1,2kg e 14kg).
- Acionamento com roldana móvel e corda.
- Sistema de avanço da perfuração com cravação sucessiva do próprio amostrador.
- Nas medições da energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, sempre que possível, foram feitos registros em golpes do martelo acionado com dispositivos de soltura (gatilho manual), para obter valores mais independentes do sistema de acionamento do martelo, conduzindo ao sistema chamado de queda livre.

5.4 Apresentação de resultados

Os resultados obtidos são apresentados nas seguintes tabelas e anexos, sendo alguns procedimentos ilustrados por fotos.

- Tabelas 5.1 e 5.10 - médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição de

14m de comprimento, para cabeça de bater normal de 3,6kg, respectivamente para alturas reais de queda (Tabela 5.1) e para altura convencional de 75cm (Tabela 5.10), em função do tipo do martelo cilíndrico: com-pino guia ou vazado, acionado com corda ou com cabo de aço, da empresa e do local de execução, do estado de desgaste da composição: nova ou velha, da sondagem executada, do acionamento ser ainda manual ou com gatilho e, por fim, do uso ou não de coxim de madeira.

- Tabela 5.2 - resumo geral de médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição de 14m de comprimento, para cabeça de bater normal de 3,6kg e para alturas reais de queda, em função do tipo do martelo cilíndrico com coxim de madeira: com pino-guia ou vazado, acionado com corda ou cabo de aço, da empresa e do estado de desgaste da composição: nova ou velha, das sondagens executadas e, por fim, do tipo de acionamento: manual ou com gatilho. Esta tabela ainda contém valores de relação entre a eficiência do martelo acionado com gatilho e aquele acionado manualmente.
- Tabela 5.3 - médias de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada à composição de 14m e também estimada para composição de comprimento infinito, para cabeça de bater normal de 3,6kg e alturas reais de queda, em função do tipo do martelo cilíndrico com coxim de madeira: com pino-guia ou vazado, acionado com corda ou com cabo de aço, da empresa e do local de execução, do estado de desgaste da composição: nova ou velha, da sondagem executada e, por fim, do acionamento ser ainda manual ou com gatilho. Esta tabela também contém valores de relação de eficiência do martelo acionado com gatilho e aquele acionado manualmente.
- Tabela 5.4 - resumo geral de médias de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada à composição de 14m e também estimada para composição de comprimento infinito, para cabeça de bater normal de 3,6kg, para alturas reais de queda, em função do tipo do martelo cilíndrico com coxim de madeira: com pino-guia ou vazado, acionado com corda ou com cabo de aço, da empresa e do local de execução, do estado de desgaste da composição: nova ou velha, das sondagens executadas e, por fim, do acionamento ser ainda manual ou com gatilho. Esta tabela também contém valores de relação de eficiência do martelo acionado com gatilho e aquele acionado manualmente.
- Tabelas 5.5 e 5.11 - médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada à composição velha

de 14m de comprimento, para martelo cilíndrico com pino-guia, para acionamento com corda e gatilho, com uso ou não de coxim de madeira, para cabeça de bater de tamanho variado: 1,2kg, 3,6kg e 14kg, respectivamente para alturas reais de queda (Tabela 5.5) e para altura convencional de 75cm (Tabela 5.11), obtidos pela empresa 1 nas sondagens SP11, 12 e 13, executadas no Campus da UEM.

- Tabelas 5.6 e 5.12 - médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição velha de 14m de comprimento, para martelo cilíndrico com pino-guia e com coxim de madeira, para acionamento com roldana móvel e corda fina ou grossa, para cabeça de bater normal de 3,6kg, respectivamente para alturas reais de queda (Tabela 5.6) e para altura convencional de 75cm (Tabela 5.12), obtidos pela empresa 1 nas sondagens SP11 e 12, executadas no Campus da UEM.
- Tabela 5.7 - resumo geral de médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada à composição velha de 14m, para martelo cilíndrico com pino-guia, com e sem coxim de madeira, para cabeça de bater normal de 3,6kg e alturas reais de queda, em função das sondagens SP1, 2, 11 e 12, executadas pela empresa 1 no campus da UEM, e também do tipo de acionamento com corda: manual ou com gatilho.
- Tabela 5.8 - resumo geral e médias de desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada à composição velha de 14m, para martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, em função do tipo de acionamento: manual ou com gatilho, para cabeça de bater de tamanho variado: 1,2kg, 3,6kg e 14kg, e alturas reais de queda. Estes dados foram obtidos nas sondagens SP11, 12 e 13, executadas pela empresa 1 no Campus da UEM.
- Tabela 5.9 - resumo geral de médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada à composição velha de 14m, para martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, acionado com roldana móvel e corda fina ou grossa, para cabeça de bater normal de 3,6kg e alturas reais de queda. Estes dados foram obtidos nas sondagens SP11 e 12, executadas pela empresa 1 no Campus da UEM.
- Tabela 5.13 - resumo dos resultados do confronto do acionamento do martelo com corda manual com aquele com corda e gatilho, quando da execução das sondagens SP12, 13 e 19, no Campus da UEM, pela empresa 1.

- Tabela 5.14 - resumo dos resultados do confronto do acionamento do martelo com cabo de aço manual com aquele com corda manual, quando da execução das sondagens SP4 e 17, no Campus da UEM, pela empresa 1.
- Tabela 5.15 - resumo dos resultados do confronto do acionamento do martelo sem coxim de madeira com aquele com coxim de madeira, quando da execução da sondagem SP1, no Campus da UEM, pela empresa 1.
- Tabela 5.16 - resumo dos resultados do confronto do uso de cabeça de bater grande de 14kg com aquele de cabeça de bater normal de 3,6kg, quando da execução das sondagens SP7, 9 e 16, no Campus da UEM, pela empresa 1.
- Tabela 5.17 - resumo dos resultados do confronto do uso de cabeça de bater pequena de 1,2kg com aquele de cabeça de bater normal de 3,6kg, quando da execução da sondagem SP18, no Campus da UEM, pela empresa 1.
- Foto 5.1 - Acionamento com corda manual, do martelo cilíndrico com pino guia, com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg. Empresa 1, Campus da UEM.
- Foto 5.2 - Posicionamento da célula de carga na composição de hastes, martelo cilíndrico com pino-guia com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg, acionamento com corda manual. Empresa 3, Moema, São Paulo-SP.
- Foto 5.3 - Acionamento com cabo de aço manual do martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg. Empresa 1, Campus da UEM.
- Foto 5.4 - Acionamento com dispositivo de soltura (gatilho) do martelo com pino-guia, com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg. Empresa 1, Campus da UEM.
- Foto 5.5 - Posicionamento da célula de carga e do gatilho, em relação à composição de hastes, à cabeça de bater e ao martelo. Empresa 1, Campus da UEM.
- Foto 5.6 - Sistema de registro de campo de eventos dinâmicos, do tipo IPT, constituído por fontes, multímetro, condicionadores de sinais, microcomputador, placa A/D e célula de carga.
- Foto 5.7 - Cabeça de bater de tamanho variado: normal de 3,6kg, grande de 14kg e pequena de 1,2kg.
- Foto 5.8 - Medida de torque máximo e mínimo conjuntamente com o ensaio SPT. empresa 1, Campus da UEM.
- Foto 5.9 - Trado helicoidal utilizado no avanço da perfuração até o lençol freático d'água. Empresa 1, Campus da UEM.

- Foto 5.10, Avanço da perfuração com circulação d'água. Empresa 3, Moema, São Paulo/SP.

Os dados, condensados nas tabelas anteriormente numeradas, são apresentados com maiores detalhes nos seguintes anexos, constantes do volume 2:

- Anexo 1 - eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente, determinadas em ensaios SPT das sondagens SP1, 2, 3, 11, 12 e 13, executados pela empresa 1 no Campus da UEM, com martelo cilíndrico com pino-guia e com coxim de madeira, acionado com corda manual e com gatilho, com composição desgastada pelo uso (velha) e cabeça de bater normal de 3,6kg.
- Anexo 2 - eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente, determinadas em ensaios SPT das sondagens SP1A, 2A, 14, 15, 16, 17 e 19, executados pela empresa 1 no Campus da UEM, com martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, acionado com corda manual e com gatilho, com cabeça de bater normal de 3,6kg, e com composição de hastes novas.
- Anexo 3 - eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente, determinadas em ensaios SPT realizados em sondagens executadas por três equipes da empresa 3, em três locais da cidade de São Paulo, usando martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, com cabeça de bater normal de 3,6kg, com composição de hastes novas e velhas, acionamento com corda manual e com gatilho.
- Anexo 4 - eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente, determinadas em ensaios SPT realizados numa sondagem executada pela empresa 2 na sede do IPT em São Paulo, usando martelo cilíndrico vazado, com coxim de madeira, com cabeça de bater normal de 3,6kg, com composição de hastes novas, acionamento com corda manual e com gatilho.
- Anexo 5 - eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente, determinadas em ensaios SPT de duas sondagens (SP14 e SP17), executados pela empresa 1 no Campus da UEM, com martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, acionamento com cabo de aço manual e com gatilho, com cabeça de bater normal de 3,6kg, com composição de hastes novas.
- Anexo 6 - eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente, determinadas em ensaios SPT de uma sondagem, executados pela empresa 4 no campo experimental da Agrícola da Unicamp, com martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, acionamento com cabo de aço manual e com gatilho, com cabeça de bater normal de 3,6kg.

- Anexo 7 - eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente, determinadas em ensaios SPT de duas sondagens (SP1 e 2), executados pela empresa 5 em Goiânia-GO, com martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, com cabeça de bater normal de 3,6kg, com composição de hastes velhas, acionamento com cabo de aço manual e com gatilho.
- Anexo 8 - eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente, determinadas em ensaios SPT de quatro sondagens (SP1, 2, 11 e 12), executados pela empresa 1 no Campus da UEM, com martelo cilíndrico com pino-guia, com e sem coxim de madeira, acionamento com corda e gatilho, com cabeça de bater normal de 3,6kg e com composição de hastes velhas.
- Anexo 9 - eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente, determinadas em ensaios SPT de quatro sondagens (SP11, 12, 13 e 16), executados pela empresa 1 no Campus da UEM, com martelo cilíndrico com pino-guia, com e sem coxim de madeira, acionamento com corda e gatilho, com cabeça de bater de tamanho variado (pequena de 1,2kg, normal de 3,6kg e grande de 14kg) com composição de hastes velhas e novas.
- Anexo 10 - eficiência de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente, determinados em ensaios SPT de duas sondagens (SP11 e 12), executadas pela empresa 1 no Campus da UEM, com martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, acionamento com corda e roldana móvel, com cabeça de bater normal de 3,6kg e com composição de hastes velhas.
- Anexo 11 - avanço da perfuração feita pela cravação do próprio amostrador, em confronto com o sistema proposto pela NBR 6484/80 da Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Anexo 12 – acionamento de martelo com corda e gatilho disparador em confronto com o acionamento com corda manual.
- Anexo 13 - uso de cabo de aço manual em confronto com o uso de corda manual.
- Anexo 14 - cabeça de bater grande de 14kg e pequena de 1,2kg, em confronto com cabeça de bater normal de 3,6kg. Uso e não uso de coxim de madeira.
- Anexo 15 - altura de queda de 50cm do martelo em confronto com a altura convencional de 75cm.

5.5 Sistema NBR 6484/80, com martelo cilíndrico com pino-guia, acionado com corda manual ou com gatilho

Para análise deste sistema foram feitos registros de eventos dinâmicos em sondagens realizadas por quatro empresas distintas, em sete locais de quatro cidades, de três Estados. Duas destas empresas (empresas 1 e 3) usam na rotina de seus ensaios o martelo cilíndrico com pino-guia acionado com corda manual, enquanto a empresa 2 usa o martelo cilíndrico vazado e a empresa 5 usa o martelo com pino-guia, mas com acionamento feito com cabo de aço manual.

Sem descaracterizar os ensaios SPT, foram feitos, na medida do possível, registros de eventos dinâmicos em alguns golpes do martelo, cuja soltura se fez através de dispositivo do tipo gatilho manual.

Em três sondagens (SP 12, 13 e 19) foram sistematicamente intercalados ensaios realizados com corda e gatilho àqueles realizados com corda manual, procurando-se obter com isto subsídios ao confronto direto de resultados entre N e torque máximo.

Na fase de registros de campo, quando da troca da composição desgastada com o uso, notou-se uma mudança sensível no nível de energia transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente. Este fato levou a se apresentar os dados de eficiência de energia dinâmica agrupados também em função do estado da composição de hastes, isto é, para composição desgastada pelo uso (velha) e para composição nova.

Pelos dados constantes nas Tabelas 5.1 e 5.2, obtidos pela empresa 1 nas treze sondagens executadas (SP1, 2, 3, 11, 12, 13 e SP1A, 2A, 14, 15, 16, 17, 19), aplicando-se a análise estatística das médias, nota-se que o martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, com cabeça de bater normal de 3,6kg, acionado com corda e com composição nova, apresentou-se 4,8% e 7,7% mais eficiente do que com a utilização de composição de hastes desgastadas pelo uso (velha), respectivamente, para acionamento com corda manual e com gatilho (331 dados, nível de confiança de 100% e 285 dados, nível de confiança de 100%, respectivamente, para acionamento com corda manual e com gatilho).

A mesma tendência tem se observado no caso da empresa 3, apesar de não se apresentar o confronto na forma percentual e com análise estatística das médias, pois além das composições de hastes serem diferentes quanto ao estado, as equipes de sondagem também eram distintas.

Tomando como base os dados de valores de eficiência de energia dinâmica, referentes à primeira onda de compressão incidente, contidos nas Tabelas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 e 5.10 e em maiores detalhes nos anexos 1, 2, 3, 4 e 7 do Volume 2, observa-se para o martelo com pino-guia, com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg e acionamento com corda, o que se segue.

- O valor de eficiência de energia transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição de 14m de comprimento, na forma de média obtida em cada sondagem executada, desconsiderando aquelas da empresa 5, tem variado para o acionamento com corda manual de 66,3% (Tabelas 5.1 e 5.3, empresa 1, sondagem SP12, composição de hastes velhas) a 77,5% (Tabelas 5.1 e 5.3, empresa 2, sondagem SP1, composição de hastes novas). Estes valores de eficiências passaram a ser, quando do acionamento do martelo com corda e gatilho, respectivamente 74,7% (Tabelas 5.1 e 5.3, empresa 1, sondagem SP11, composição de hastes velhas) e 85,4% (Tabelas 5.1 e 5.3, empresa 3, sondagem SP3, composição de hastes novas).
- O valor de eficiência de energia transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente e estimada para composição de comprimento infinito, na forma de média obtida em cada sondagem executada, tem variado para o acionamento com corda manual de 72,5% (Tabelas 5.3, empresa 1, sondagem SP13, composição de hastes velhas) a 86,5% (Tabela 5.3, empresa 2, sondagem SP1, composição de hastes novas). Estes valores de eficiências passaram a ser, quando do acionamento do martelo com corda e gatilho, respectivamente 82,5% (Tabelas 5.3, empresa 1, sondagem SP13, composição de hastes velhas) e 95,0% (Tabelas 5.3, empresa 1, sondagem SP14, composição de hastes novas).
- O valor de eficiência de energia transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição de 14m de comprimento, na forma de média obtida em cada empresa executante, desconsiderando aquela da empresa 5, tem variado para o acionamento com corda manual de 69,4% (Tabelas 5.2 e 5.4, empresa 1, composição de hastes velhas) a 77,5% (Tabelas 5.2 e 5.4, empresa 2, composição de hastes novas). Estes valores de eficiências passaram a ser, quando do acionamento do martelo com corda e gatilho, respectivamente 75,5% (Tabelas 5.2 e 5.4, empresa 1, composição de hastes velhas) e 85,0% (Tabelas 5.2 e 5.4, empresa 3, composição de hastes novas).
- O valor de eficiência de energia transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente e estimada para composição de comprimento infinito, na forma de média obtida em cada empresa executante, tem variado para o acionamento com corda manual de 77,6% (Tabela 5.4, empresa 1, composição de hastes velhas) a 86,5% (Tabela 5.4, empresa 2, composição de hastes novas). Estes valores de eficiências passaram a ser, quando do acionamento do martelo com corda e gatilho, respectivamente 83,5% (Tabela 5.4, empresa 1, composição de hastes velhas) e 93,0% (Tabela 5.4, empresa 2, composição de hastes novas).

- As eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente às hastes e extrapolada para composição de 14m de comprimento, corrigidas para altura convencional de queda de 75cm, constantes da Tabela 5.10, não serão discutidas ou analisadas por se considerar as alturas reais de queda, que tem sido constantemente superiores àquela convencional de 75cm, intrínsecas ao sistema manual de levantamento e soltura do martelo, ou seja, esta sobre elevação faz parte do sistema.
- O martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, com cabeça de bater normal de 3,6kg, acionado com corda e gatilho tem se apresentado mais eficiente do que quando acionado com corda manual, como salientado pelos resultados constantes nas Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4, sendo mais eficiente de 6,5% (Tabela 5.2, empresa 2, sondagem SP1, composição nova) a 15,9% (Tabela 5.2, empresa 3, sondagem SP1, composição velha), quando considerados valores extrapolados para composição de 14m de comprimento ou de 7,5% (Tabela 5.3, empresa 2, sondagem 1, composição nova) a 14,2% (Tabela 5.3, empresa 3, sondagem 1, composição velha), quando considerados valores estimados para composição de comprimento infinito.

Nas três sondagens (SP12, 13 e 19) em que foram intercalados ensaios SPT executados com corda e gatilho àqueles realizados com corda manual, cujos resultados inclusive com medidas de torque máximo são apresentados em detalhe no Anexo 12 do Volume 2 e na forma de resumo na Tabela 5.13, observa-se o que se segue:

- Dificuldades de análise dos resultados, principalmente das sondagens SP12 e 13 onde foram executados ensaios a cada metro de avanço da perfuração, oriundas da heterogeneidade do subsolo, constituído por camadas de solos distintos, pouco espessas. A execução de ensaios a cada meio metro de avanço da perfuração, aumentando o número de dados coletados em cada sondagem, tem amenizado esta dificuldade de análise, como pode-se observar na sondagem SP19.
- Considerando que o torque máximo medido, necessário à rotação do amostrador no ensaio SPT, seja pouco sensível à variação moderada da intensidade de energia dinâmica de cravação contida em cada golpe do martelo ou seja, considerando o torque máximo como indicador da heterogeneidade do subsolo e também como base de referência, tem-se pela Tabela 5.13 que, na forma de média geral, o martelo cilíndrico com pino-guia, acionado com corda manual, nestas três sondagens, foi 11% menos eficiente do que aquele com corda e gatilho (confronto de 47 pares de valores de N e de torque máximo medidos e interpolados).

Para maiores detalhes da análise feita com valores de eficiência de energia dinâmica, transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, ver também os anexos 1, 2, 3, 4 e 7, onde se apresentam inclusive análises estatísticas das médias.

5.6 Sistema NBR 6484/80, com martelo cilíndrico vazado, acionado com corda manual ou com gatilho

Para análise deste sistema foram feitas medições de energia dinâmica numa sondagem realizada pela empresa 2, que utiliza na rotina de seus ensaios o martelo cilíndrico vazado. Sem descaracterizar os ensaios SPT, foram feitas também medições em alguns golpes obtidos através da soltura com gatilho e outros golpes com o martelo cilíndrico com pino-guia.

Os dados obtidos de eficiência de energia dinâmica, transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, são apresentados conjuntamente com outros nas Tabelas 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 e 5.10 e com maiores detalhes no Anexo 4.

Há evidências, desde as primeiras medidas feitas no Brasil, de que o martelo cilíndrico vazado é menos eficiente do que o seu consorte de pino-guia. Os valores obtidos na sondagem SP1, executada pela empresa 2 na sede do IPT, confirmam esta tendência quando o valor da eficiência em média para o martelo cilíndrico vazado foi de 66,5% (Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, média de 50 dados) e 74,2% (Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, média de 39 dados), obtidos com composição de hastes novas e respectivamente com acionamento com corda manual e com gatilho. Valores obtidos na mesma sondagem, com a mesma empresa 2, têm indicado para o martelo cilíndrico com pino-guia a eficiência de 77,5% (Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, média de 52 dados) e 82,5% (Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, média de 25 dados), respectivamente para acionamento com corda manual e com gatilho.

A análise dessas eficiências mostram que, nesta sondagem SP1, o martelo cilíndrico vazado se apresentou 14,2% e 10,1% menos eficiente do que seu consorte de pino-guia, respectivamente quando acionado com corda manual (Anexo 4 do Volume 2, comparação de 102 dados e nível de confiança de 100%) e quando acionado com corda e gatilho (Anexo 4 do Volume 2, comparação de 64 dados e nível de confiança de 100%)

As tendências acima se mantiveram quando a análise se fez com valores de eficiência de energia dinâmica, transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, estimada para composição de comprimento infinito.

5.7 Uso de cabo de aço no acionamento manual do martelo

O levantamento e soltura do martelo através de cabo de aço tem se constituído em preocupação constante no meio técnico, já que esta operação está em desacordo com a norma brasileira vigente.

Para a análise da influência do uso do cabo de aço na operação do martelo, foram feitas medições de energia dinâmica em sondagens realizadas por três empresas em três locais de três cidades, de três estados brasileiros. Duas destas empresas (empresas 4 e 5) usam na rotina de seus ensaios o cabo de aço manual, enquanto a empresa 1 usa a corda manual.

Sem descaracterizar os ensaios SPT, executados por estas empresas, foram feitas também medições em golpes de martelo cuja soltura se fez com dispositivo do tipo gatilho manual.

Em duas sondagens (SP4 e SP17), realizadas pela empresa 1, no Campus da UEM, foram intercalados ensaios SPT executados com cabo de aço àqueles com corda manual, sendo feitos também medições de torque máximo. Este procedimento teve como objetivo criar subsídios ao confronto direto de N e torque máximo, obtidos com cabo de aço, com aqueles obtidos com corda.

Dos dados coletados e necessários à análise, com referência a valores de eficiência de energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, obtidos em martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, apresentados em detalhes no anexo 5 do Volume 2 e na forma condensada nas Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, pode-se observar o que se segue.

- A eficiência média de energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, extrapolada para composição nova de 14m de comprimento, obtida em sondagens executadas pela empresa 1 no Campus da UEM, foi de 72,7% (Tabelas 5.2 e 5.4, média de 153 dados, provenientes das sondagens SP 1A, 2A, 14, 15, 16, 17 e 19) e 73,9% (Tabelas 5.2 e 5.4, média de 54 dados, provenientes das sondagens SP 14 e 17), respectivamente para acionamento com corda manual e com cabo de aço manual. Estes valores de eficiência, quando estimados para composição de comprimento infinito, passaram a ser de 81,1% (Tabela 5.4, média de 153 dados) e 83,5% (Tabela 5.4, média de 54 dados), respectivamente para acionamento com corda manual e com cabo de aço.
- Esses valores médios, provenientes das Tabelas 5.2 e 5.4, apontam no sentido de que o acionamento do martelo com cabo de aço manual tem sido 1,7% e 3% mais eficiente

do que quando do uso de corda manual, respectivamente para composição de 14m de comprimento (comparação de 207 dados, nível mínimo de significância de 3,2%) e para composição de comprimento infinito (comparação de 207 dados).

Esta tendência foi mantida quando foram considerados os dados obtidos na sondagem SP2 executada pela empresa 5 (Tabelas 5.2 e 5.4), isto é, o uso de cabo de aço manual mostrou-se 3,5% mais eficiente do que o uso de corda manual, sendo este resultado proveniente de 58 registros de eficiências de energias dinâmicas transferidas às hastes na primeira onda de compressão incidente e a um nível de confiança de 98,4%

Nas duas sondagens (SP4 e SP17), em que foram intercalados ensaios SPT executados com cabo de aço manual àqueles realizados com corda manual, cujos resultados inclusive com medidas de torque máximo são apresentados em detalhes no Anexo 13 do Volume 2 e na forma de resumo na Tabela 5.14, observa-se o que se segue.

- A execução do ensaio a cada meio metro de avanço da perfuração, aumentando o número de dados coletados, tem amenizado a dificuldade de análise oriunda da heterogeneidade do subsolo.
- Considerando que o torque máximo medido é necessário à rotação do amostrador, cravado no ensaio SPT, seja pouco sensível à variação moderada da intensidade de energia dinâmica de cravação contida em cada golpe do martelo, ou seja, considerando o torque máximo como indicador da heterogeneidade do subsolo e também como base de referência, tem-se pela Tabela 5.14 que, na forma de média geral, o martelo cilíndrico com pino guia, acionado com corda manual foi 1,2% menos eficiente do que aquele acionado com cabo de aço manual (confronto de 36 pares de valores de N e de torque máximo medidos e interpolados).

Tomando como base os dados acima analisados e discutidos, pode-se observar que, em termos práticos de engenharia e no caso de acionamento manual adequado, os valores de N obtidos com o uso de cabo de aço fino (8mm), auxiliado com uma roldana fixa em bom estado de conservação, apresentam a tendência de paridade com aqueles obtidos quando do uso de corda manual.

5.8 Martelo sem coxim de madeira

Tem sido de uso corrente o martelo sem coxim de madeira, apesar de estar em desacordo com a norma vigente da ABNT.

Nas medições de energia dinâmica efetuadas em quatro sondagens (SP 1, 2, 11 e 12), executadas pela empresa 1 no Campus da UEM, com cabeça de bater normal de 3,6kg, cujos

resultados são apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.7 e em maiores detalhes no Anexo 8, o martelo cilíndrico com pino-guia sem coxim de madeira, com referência à eficiência de energia dinâmica da primeira onda de compressão incidente, extrapolada para composição velha de 14m, no caso de acionamento manual e para as sondagens SP1 e SP2, tem se apresentado com eficiência de 71,0% e 72,8%, respectivamente para o uso de coxim de madeira (Tabela 5.7, média de 104 valores) e para o não uso de coxim de madeira (Tabela 5.7, média de 111 valores). Estes valores de eficiência passaram a ser, no caso das sondagens SP11 e SP12 e quando do acionamento com corda e gatilho, de 75,5% e 76,1%, respectivamente para o uso de coxim de madeira (Tabela 5.7, média de 108 valores) e para o não uso de coxim de madeira (Tabela 5.7, média de 9 valores).

Desta maneira, nestas quatro sondagens, o martelo cilíndrico com pino-guia e sem coxim de madeira tem se apresentado 2,5% e 0,8% mais eficiente do que o martelo com coxim de madeira, respectivamente quando do acionamento com corda manual (215 dados e nível de confiança de 100%) e quando do acionamento com corda e gatilho (117 dados e nível de confiança de 29%).

A sondagem SP1 foi executada intercalando-se ensaios realizados com martelo cilíndrico com pino-guia sem coxim de madeira àqueles com coxim de madeira. Os valores de N e de torque máximo, obtidos nesta sondagem e apresentados em detalhes no Anexo 14 do Volume 2 e na forma de resumo na Tabela 5.15, apontam para a eficiência no sentido contrário àquele indicado pelas medidas de energia dinâmica, isto é, o martelo cilíndrico com pino-guia com coxim de madeira e acionado com corda manual, tem se apresentado 3,5% mais eficiente do que aquele sem coxim (confronto de 11 pares de valores medidos e interpolados). Naturalmente esta análise é prejudicada pela heterogeneidade do subsolo e pelo pequeno número de dados obtidos, e por isso, dever-se-ia fazer mais sondagens e com ensaios a cada meio metro de avanço da perfuração.

Dando-se prioridade à energia dinâmica medida e em termos práticos de engenharia, os resultados acima apontam no sentido da pequena influência do uso ou não do coxim de madeira nos valores do índice de resistência à penetração do SPT.

5.9 Tamanho da cabeça de bater

Os dados contidos nas Tabelas 5.5 e 5.8 e em maiores detalhes no Anexo 9, oriundos de energia dinâmica medida em três sondagens (SP11,12 e 13), realizadas pela empresa 1 no Campus da UEM, apontam no sentido de que a eficiência de energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente é uma função decrescente com o tamanho da cabeça de bater.

A energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, com referência à composição de 14m de comprimento e ao martelo cilíndrico com pino guia, com coxim de madeira, para acionamento com corda e gatilho, tem sido na forma de eficiência, nestas três sondagens, 78,5%, 75,5% e 66,4%, respectivamente para cabeça de bater pequena de 1,2kg (média de 13 registros, Tabela 5.8), normal de 3,6kg (média de 195 registros, Tabela 5.8) e grande de 14kg (média de 23 registros, Tabela 5.8). Estas percentagens revelam que, nas três sondagens executadas, em termos de energia dinâmica e tomando como base de referência a cabeça de bater normal de 3,6kg, a cabeça de bater grande de 14kg tem sido 12,1% menos eficiente (confronto de 208 dados e nível de confiança de 100%) enquanto a cabeça pequena tem sido 4% mais eficiente (confronto de 218 dados e nível de confiança de 100%).

Estas tendências, embora variando na intensidade, confirmaram-se quando se fez a comparação direta de valores de N e de torque máximo registrados em quatro sondagens (SP7, 9, 16 e 18), executadas pela empresa 1 no Campus da UEM, cujos resultados são apresentados nas Tabelas 5.16 e 5.17 e em maiores detalhes no Anexo 14, observando-se o que se segue.

- Dificuldades de análise dos resultados principalmente nas sondagens SP7 e 9, em que foi executado o ensaio SPT a cada metro de avanço da perfuração, sendo estas dificuldades provavelmente oriundas da heterogeneidade do subsolo.
- Considerando que o torque máximo medido é necessário à rotação do amostrador cravado no ensaio SPT, seja pouco sensível à variação moderada de intensidade de energia dinâmica de cravação contida em cada golpe do martelo, ou seja, considerando o torque máximo como indicador da heterogeneidade do subsolo e também como base de referência, tem-se pela Tabela 5.16 que, na forma de média geral e para as sondagens executadas, a cabeça de bater normal de 3,6kg foi 7,6% mais eficiente do que quando do uso de cabeça de bater grande de 14kg (comparações de 47 pares de valores de N e torque máximo medidos e interpolados, Tabela 5.16), enquanto que a mesma cabeça de bater normal se apresentou 15,8% menos eficiente do que quando do uso da cabeça pequena de 1,2kg (comparação de 25 pares de valores de N e de torque máximo medidos e interpolados, Tabela 5.17).

Apesar das discrepâncias nos resultados, pode-se notar nestas sondagens a influência marcante do tamanho da cabeça de bater nos valores do índice de resistência à penetração N.

5.10 Acionamento de martelo com corda e roldana móvel

A instalação de uma roldana móvel, além daquela fixa, no levantamento do martelo, permite que a operação do mesmo seja efetuada por somente um sondador. Para se ter uma grandeza da influência da utilização deste dispositivo na transferência de energia dinâmica, foram feitas medidas de energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, em duas sondagens (SP 1 e 2) realizadas pela empresa 1 no Campus da UEM, utilizando-se corda grossa de 18mm e fina de 12mm.

Com os dados e registros obtidos nas sondagens SP11 e SP12, constantes nas Tabelas 5.5, 5.6, 5.7 e 5.9 e em maiores detalhes no Anexo 10, referentes à energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, extrapolada à composição velha de 14m de comprimento, observa-se para o martelo com pino-guia, com coxim de madeira e cabeça de bater normal, para estas duas sondagens, o que se segue.

- Nível de eficiência de energia dinâmica de 66,3% (média de 24 valores, desvio padrão de 2,61%, sondagens SP11 e 12, Tabela 5.7) e 75,5% (média de 108 valores, desvio padrão de 3,05%, sondagens SP11 e 12, Tabela 5.7), respectivamente para acionamento com corda manual e com corda e gatilho.
- Nível de eficiência de energia dinâmica de 60,7% (média de 18 valores, desvio padrão de 4,14%, sondagens SP11 e 12, Tabela 5.9) e 53,6% (média de 23 valores, desvio padrão de 2,69%, sondagens SP11 e 12, Tabela 5.9), respectivamente para acionamento com corda fina de 12mm com roldana móvel e com corda grossa de 18mm com roldana móvel.
- Acionamento com roldana móvel com corda fina de 12mm apresentou-se 8,4% menos eficiente do que o acionamento com corda manual (confronto de 42 dados e nível de confiança de 100%).
- Acionamento com roldana móvel com corda grossa apresentou-se 19,2% menos eficiente do que o acionamento com corda manual (confronto de 47 valores e nível de confiança de 100%).
- Acionamento com corda grossa e roldana móvel apresentou-se 11,7% menos eficiente do que o acionamento com corda fina e roldana móvel (confronto de 41 valores e nível de confiança de 100%).

Pelos dados acima, o uso de qualquer sistema constituído por roldana móvel influi significativamente nos valores de energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente.

5.11 Avanço da perfuração feita pela cravação do próprio amostrador

Apesar do procedimento de execução de sondagem com uso de avanço de perfuração feita com a cravação do próprio amostrador ser restrita a determinadas regiões e estar em desacordo com a norma vigente da ABNT, não devendo portanto ser considerado como fator interveniente no SPT, é de interesse ter-se uma avaliação, mesmo que seja de forma preliminar, da influência deste procedimento nos resultados dos índices de resistência à penetração N.

Na cidade de Maringá, onde o subsolo é constituído por argila siltosa, sendo até os nove metros de profundidade solo poroso e pedologicamente evoluído e abaixo, até a profundidade de 25m, solo residual de basalto, foram realizadas 30 sondagens pela empresa 6 que usa em sua rotina o avanço da perfuração através da cravação do próprio amostrador. Posteriormente, neste mesmo local, foram realizadas 5 sondagens pela empresa 1, utilizando-se a metodologia proposta pela norma NBR 6484/80. No confronto direto dos valores obtidos nestas 35 sondagens, foi possível constatar que os valores do índice de resistência à penetração N medidos quando do uso do avanço da perfuração com o próprio amostrador se mostravam sistematicamente muito maiores, sendo em média 131,5% superiores àqueles obtidos quando da perfuração com trado até o lençol freático e circulação d'água abaixo do mesmo, sendo este resultado proveniente do confronto de 20 pares de valores médios.

Esta mesma tendência apresenta-se porém, em menor intensidade, quando se comparam os valores de N registrados em sete sondagens executadas cuidadosamente pela empresa 1, no Campus da UEM, sendo o avanço da perfuração numa destas sondagens realizado pela cravação do próprio amostrador. Procurou-se desta maneira minimizar a influência de outras variáveis a não ser aquela do processo de perfuração. A análise destes novos dados mostraram que os valores de N e de torque máximo, obtidos pelo avanço da perfuração com a cravação do próprio amostrador foram respectivamente 54,0% e 101,7% superiores àqueles obtidos com a utilização da metodologia proposta pela NBR6484/80.

Os dados acima expostos, naturalmente evidenciam a influência marcante do avanço da perfuração feita pela cravação do próprio amostrador nos valores de índices de resistência à penetração N, quando em comparação com o método proposto pela norma brasileira NBR6484/80. Para maiores detalhes, ver o anexo 11 do volume 2.

Tabela 5.1-Médias e desvios padrão de eficiência de energia dinâmica, referentes à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição de 14m de comprimento, para cabeça de bater normal de 3,6kg e alturas reais de queda

emp. n°	local	estado da comp.	sond. n°	médias de eficiências de energia 100(energia/474J)											
				acionamento manual						acionamento com gatilho					
				c/coxim			s/coxim			c/coxim			s/coxim		
				méd	n°	d.p.	méd	n°	d.p.	méd	n°	d.p.	méd	n°	d.p.

Martelo Cilíndrico com Pino-Guia, Acionamento com Corda.

1	campus/UEM	velha	SP1	70,7	51	4,22	72,9	58	3,79						
			SP2	71,1	53	2,81	72,6	53	3,46						
			SP3	68,5	23	2,03									
			SP11							74,7	63	2,95	76,5	4	5,80
			SP12	66,3	24	2,61				76,7	45	2,82	75,8	5	3,96
			SP13	67,1	27	2,82				75,5	87	2,83			
1	campus/UEM	nova	SP1A	72,3	20	4,68									
			SP2A	73,2	38	2,09									
			SP14	74,3	22	2,26				84,4	17	2,55			
			SP15							81,4	24	2,61			
			SP16							78,4	22	4,98			
			SP17	71,3	41	3,96									
			SP19	73,2	32	4,00				81,7	27	3,26			
2	IPT/sede	nova	SP1	77,5	52	3,84				82,5	25	4,45			
3	pinheiros/SP	nova	SP3	77,4	106	5,26				85,4	45	3,70			
	V.Carrão/SP	nova	SP3	75,3	110	3,85				84,5	32	3,37			
	Moema/SP	velha	SP1	69,0	82	2,85				80,0	15	2,28			
5	goiânia/GO	velha	SP2	61,0	13	1,89									

Martelo Cilíndrico Vazado, Acionamento com Corda.

2	IPT/sede	nova	SP2	66,5	50	3,74				74,2	39	5,30			
---	----------	------	-----	------	----	------	--	--	--	------	----	------	--	--	--

Martelo Cilíndrico com Pino-Guia, Acionamento com Cabo de Aço.

1	Campus/UEM	nova	SP14	74,5	27	2,83				83,2	26	2,52			
			SP17	73,2	27	3,88									
4	Unicamp	nova	SPDT1	71,9	34	3,89				78,1	37	2,25			
5	goiânia/GO	velha	SP1	70,1	103	6,31				74,4	10	2,05			
			SP2	63,2	45	4,78				74,4	23	2,23			

obs d.p. desvio padrão

Tabela 5.2 - Resumo geral de médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição de 14m de comprimento, para martelo com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg e alturas reais de queda.

empresa	estado	sondagem	eficiências de energia 100(energia/474J)						relação
			acionamento manual			acionamento c/gatilho			
			média	n°	desvio	média	n°	desvio	
			%	dados	padrão	%	dados	padrão	
n°	da comp.	n°	100(gat/man-1)						

martelo cilíndrico com pino-guia , acionamento c/corda

1	velha	1,2,3,11,12,13	69,4	178	3,67	75,5	195	2,95	8,8
1	nova	1A,2A,14,15,16,17,19	72,7	153	3,59	81,3	90	3,98	11,8
2	nova	1	77,5	52	3,84	82,5	25	4,45	6,5
3	nova	3, 3	76,3	216	4,70	85,0	77	3,57	11,4
3	velha	1	69,0	82	2,85	80,0	15	2,28	15,9
5	velha	2	61,0	13	1,89				

martelo cilíndrico vazado, acionamento com corda

2	nova	1	66,5	50	3,74	74,2	39	5,30	11,6
---	------	---	-------------	----	------	-------------	----	------	-------------

martelo cilíndrico com pino-guia, acionamento com cabo de aço

1	nova	14, 17	73,9	54	3,43	83,2	26	2,52	12,6
4	nova	1	71,9	34	3,89	78,1	37	2,25	8,6
5	velha	2	63,2	45	4,78	74,4	23	2,23	17,7

Tabela 5.3 - Médias de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada, respectivamente para composição de 14m e também de comprimento infinito, para martelo com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg e alturas reais de queda

emp. n°	local	tipo de comp.	sond. n°	eficiências de energia 100(energia/474J)						relação	
				acionamento manual			acionamento com gatilho			100(gat/man-1)	
				n°	média		n°	média			
				dados	p/14m	ℓ=00	dados	p/14m	ℓ=00	p/14m	ℓ=00

Martelo Cilíndrico com Pino-Guia, Acionamento com Corda.

1	campus/UEM	velha	SP1	51	70,7	78,0					
			SP2	53	71,1	80,5					
			SP3	23	68,5	78,0					
			SP11				63	74,7	83,0		
			SP12	24	66,3	76,0	45	76,7	86,0	15,7	13,2
			SP13	27	67,1	72,5	87	75,5	82,5	12,5	13,8
1	campus/UEM	nova	SP1A	20	72,3	80,5					
			SP2A	38	73,2	81,5					
			SP14	22	74,3	84,5	17	84,4	95,0	13,6	12,4
			SP15				24	81,4	89,0		
			SP16				22	78,4	86,0		
			SP17	41	71,3	79,0					
			SP19	32	73,2	81,5	27	81,7	90,0	11,6	10,4
2	IPT/sede	nova	SP1	52	77,5	86,5	25	82,5	93,0	6,5	7,5
3	pinheiros/SP	nova	SP3	106	77,4	83,5	45	85,4	92,0	10,3	10,2
	V.Carrão/SP	nova	SP3	110	75,3	83,0	32	84,5	92,5	12,2	11,4
	Moema/SP	velha	SP1	82	69,0	81,0	15	80,0	92,5	15,9	14,2
5	goiânia/GO	velha	SP2	13	61,0						

Martelo Cilíndrico Vazado, Acionamento com Corda.

2	IPT/sede	nova	SP2	50,0	66,5	74,0	39	74,2	83,0	11,6	12,2
---	----------	------	-----	------	------	------	----	------	------	------	------

Martelo Cilíndrico com Pino-Guia, Acionamento com Cabo de Aço.

1	Campus/UEM	nova	SP14	27	74,5	84,5	26	83,2	93,5	11,7	10,7
			SP17	27	73,2	82,5					
4	Unicamp	nova	SPDT1	34	71,9	80,0	37	78,1	87,5	8,6	9,4
5	goiânia/GO	velha	SP1	103	70,1	75,0	10	74,4	78,0	6,1	4,0
			SP2	45	63,2	67,5	23	74,4	79,0	18,2	17,0

obs d.p. desvio padrão

Tabela 5.4 - Resumo geral de médias de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada, respectivamente para composição de 14m e para comprimento infinito, para martelo com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg e alturas reais de queda.

emp. no	local	tipo de comp.	sond. no	eficiências de energia 100(energia/474J)						relação	
				acionamento manual			acionamento c/gatilho			100(gat/man-1)	
				n°	média		n°	média			
				dados	p/14m	ℓ=00	dados	p/14m	ℓ=00		

Martelo Cilíndrico com Pino-Gula, Acionamento com Corda.

1	campus/UEM	velha	SP1,2,3,11,12,13	178	69,4	77,6	195	75,5	83,5	8,8	7,6
1	campus/UEM	nova	SP1A,2A,14,15,16,17,19	153	72,7	81,1	90	81,3	89,7	11,8	10,6
2	IPT/sede	nova	SP1	52	77,5	86,5	25	82,5	93,0	6,5	7,5
3	pinheiros/Carrão	nova	SP3,3	216	76,3	83,3	77	85,0	92,2	11,4	10,7
	Moema/SP	velha	SP1	82	69,0	81,0	15	80,0	92,5	15,9	14,2
5	goiânia/GO	velha	SP2	13	61,0						

Martelo Cilíndrico Vazado, Acionamento com Corda.

2	IPT/sede	nova	SP2	50	66,5	74,0	39	74,2	83,0	11,6	12,2
---	----------	------	-----	----	------	------	----	------	------	------	------

Martelo Cilíndrico com Pino-Gula, Acionamento com Cabo de Aço.

1	Campus/UEM	nova	SP14,17	54	73,9	83,5	26	83,2	93,5	12,6	12,0
4	Unicamp	nova	SPDT1	34	71,9	80,0	37	78,1	87,5	8,6	9,4
5	goiânia/GO	velha	SP1	103	70,1	75,0	10	74,4	78,0	6,1	4,0
			SP2	45	63,2	67,5	23	74,4	79,0	18,2	17,0

obs d.p. desvio padrão

Tabela 5.5 - Médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição velha de 14m de comprimento, para martelo cilíndrico com pino-guia, acionado com corda e gatilho, para cabeça de bater de tamanho variado e alturas reais de queda

empresa n°	local	estado da composição	sond. n°	eficiências de energia 100(energia/474J) acionamento com gatilho					
				c/coxim			s/coxim		
				média	n°dados	d.p.	média	n°dados	d.p.

Cabeça de Bater Pequena de 1,2kg

1	campus/UEM	velha	SPT11	79,8	4	1,26	79,5	4	4,04
			SPT12	78,0	4	1,83	79,8	4	1,71
			SPT13	77,8	5	2,49			

Cabeça de Bater Normal de 3,6kg

1	campus/UEM	velha	SPT11	74,7	63	2,95	76,5	4	5,80
			SPT12	76,7	45	2,82	75,8	5	3,96
			SPT13	75,5	87	2,83			

Cabeça de Bater Grande de 14,0kg

1	campus/UEM	velha	SPT11	66,2	13	2,05	67,5	10	2,53
			SPT12	66,0	5	1,22	68,6	5	2,41
			SPT13	67,2	5	0,84	71,2	6	2,48

Tabela 5.6 - Médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição velha de 14m de comprimento, para martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, acionado com corda e roldana móvel, para cabeça de bater normal de 3,6kg e alturas reais de queda.

empresa n°	local	tipo de composição	sond. n°	eficiências de energia 100(energia/474J) acionamento c/corda e roldana móvel					
				corda fina			corda grossa		
				média	n°dados	d.p.	média	n°dados	d.p.
1	Campu/UEM	velha	SPT11	60,7	18	4,14	53,8	17	2,99
			SPT12				53,2	6	1,72

obs d.p. desvio padrão

Tabela 5.7 - Resumo geral de médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição velha de 14m de comprimento, para martelo cilíndrico com pino-guia, com e sem coxim de madeira, acionado com corda, para cabeça de bater normal de 3,6kg e alturas reais de queda. Sondagens SP1, 2, 11 e 12, realizadas pela empresa 1, no Campus da UEM.

sondagem n°	uso de coxim	cabeça bater kg	eficiências de energia 100(energia/474J)					
			acionamento manual			acionamento c/gatilho		
			média	n°	desvio	média	n°	desvio
			%	dados	padrão	%	dados	padrão
1 e 2	não	3,6	72,8	111	3,62			
	sim	3,6	71,0	104	3,56			
11 e 12	não	3,6				76,1	9	4,54
	sim	3,6	66,3	24	2,61	75,5	108	3,05

Tabela 5.8 - Resumo geral de médias e desvios padrão de eficiência de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição velha de 14m de comprimento, para martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, para cabeça de bater de tamanho variado e alturas reais de queda. Sondagens SP11, 12 e 13, realizadas pela empresa 1, no Campus da UEM.

sondagem n°	uso de coxim	cabeça de bater kg	eficiências de energia 100(energia/474J)					
			acionamento manual			acionamento c/gatilho		
			média	n°	desvio	média	n°	desvio
			%	dados	padrão	%	dados	padrão
11, 12 e 13	sim	1,2				78,5	13	2,04
	sim	3,6	66,7	51	2,73	75,5	195	2,95
	sim	14,0				66,4	23	1,70

Tabela 5.9 - Resumo geral de médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada à composição velha de 14m de comprimento, para martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, acionado com corda e roldana móvel, para cabeça de bater normal de 3,6kg e alturas reais de queda. Sondagens SP11 e 12, realizadas pela empresa 1, no Campus da UEM.

sondagem n°	uso de coxim	cabeça bater kg	eficiências de energia 100(energia/474J)					
			acionamento c/corda e roldana móvel					
			corda fina			corda grossa		
			média	n° dados	d.p.	média	n° dados	d.p.
11 e 12	sim	3,6	60,7	18	4,14	53,6	23	2,69

obs d.p. desvio padrão

Tabela 5.10 - Médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição de 14m de comprimento, para cabeça de bater normal de 3,6kg e altura convencional de 75cm .

emp. n°	local	tipo de comp.	sond. n°	eficiências de energia 100(energia/474J)											
				acionamento manual						acionamento com gatilho					
				c/coxim			s/coxim			c/coxim			s/coxim		
				média	n°	d.p.	média	n°	d.p.	média	n°	d.p.	média	n°	d.p.

Martelo Cilíndrico com Pino-Guia, Acionamento com Corda.

1	campus/UEM	velha	SP1	67,0	51	4,00	68,3	58	3,55						
			SP2	67,3	53	2,69	68,9	53	3,28						
			SP3	65,0	23	1,93									
			SP11							73,7	63	2,91	75,5	4	5,72
			SP12	64,2	24	2,52				75,7	45	2,78	74,8	5	3,91
			SP13	64,9	27	2,73				74,5	87	2,79			
1	campus/UEM	nova	SP1A	68,6	20	4,44									
			SP2A	69,6	38	1,99									
			SP14	72,8	22	2,22				83,3	17	2,52			
			SP15							80,3	24	2,58			
			SP16							77,4	22	4,91			
			SP17	70,4	41	3,91									
			SP19	72,2	32	3,94				80,6	27	3,22			
2	IPT/sede	nova	SP1	71,3	52	3,53				81,4	25	4,39			
3	pinheiros/SP	nova	SP3	73,8	106	5,01				83,2	45	3,60			
	V.Carrão/SP	nova	SP3	72,9	110	3,73				83,7	32	3,33			
	Moema/SP	velha	SP1	67,2	82	2,78				78,9	15	2,25			
5	goiânia/GO	velha	SP2	58,7	13	1,82									

Martelo Cilíndrico Vazado, Acionamento com Corda.

2	IPT/sede	nova	SP2	63,1	50	3,55				73,2	39	5,23			
---	----------	------	-----	------	----	------	--	--	--	------	----	------	--	--	--

Martelo Cilíndrico com Pino-Guia, Acionamento com Cabo de Aço.

1	Campus/UEM	nova	SP14	73,0	27	2,77				82,1	26	2,49			
			SP17	72,2	27	3,83									
4	Unicamp	nova	SPDT1	69,2	34	3,75				77,1	37	2,22			
5	goiânia/GO	velha	SP1	65,1	103	5,86				73,4	10	2,02			
			SP2	59,3	45	4,48				73,4	23	2,20			

obs d.p. desvio padrão

Tabela 5.11 - Médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição de 14m de comprimento, para martelo cilíndrico com pino-guia, acionado com corda e gatilho, para cabeça de bater de tamanho variado e altura convencional de queda de 75cm.

empresa n°	local	tipo de composição	sond. n°	médias de eficiências de energia 100(energia/474J) acionamento com gatilho					
				c/coxim			s/coxim		
				média	n°dados	d.p.	média	n°dados	d.p.

Cabeça de Bater Pequena de 1,2kg

1	campus/UEM	velha	SPT11	78,8	4	1,24	78,5	4	3,99
			SPT12	77,0	4	1,81	78,8	4	1,69
			SPT13	76,8	5	2,46			

Cabeça de Bater Normal de 3,6kg

1	campus/UEM	velha	SPT11	73,7	63	2,91	75,5	4	5,72
			SPT12	75,7	45	2,78	74,8	5	3,91
			SPT13	74,5	87	2,79			

Cabeça de Bater Grande de 14,0kg

1	campus/UEM	velha	SPT11	65,3	13	2,02	66,6	10	2,50
			SPT12	65,1	5	1,20	67,7	5	2,38
			SPT13	66,3	5	0,83	70,3	6	2,45

Tabela 5.12 - Médias e desvios padrão de eficiências de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição velha de 14m de comprimento, para martelo cilíndrico com pino-guia, acionado com corda e roldana móvel, para cabeça de bater normal de 3,6kg e altura convencional de queda de 75cm.

empresa n°	local	tipo de composição	sond. n°	eficiências de energia 100(energia/474J) acionamento c/corda e roldana móvel					
				corda fina			corda grossa		
				média	n°dados	d.p.	média	n°dados	d.p.
1	Campu/UEM	velha	SPT11	60,7	18	4,09	53,8	17	2,95
			SPT12				53,2	6	1,70

obs d.p. desvio padrão

Tabela 5.13 - Acionamento com corda e gatilho disparador em confronto com aquele com corda manual
(Martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira e cabeça de bater normal de 3,6kg)

confronto direto com os valores medidos e interpolados

sondagem , nº dados medidos e interpolados, tipo de acionamento	parâmetros de comparação	média % $100(\text{corda gatilho} / \text{corda manual}) - 1)$
SP 12 gatilho e manual (11 pares de dados)	N	15,4 (A)
	Torque Máximo	26,0 (B)
	N e Torque Máx.	$100((100+A)/(100+B)-1) = -8,4$
SP 13 gatilho e manual (11 pares de dados)	N	-7,2 (C)
	Torque Máximo	13,7 (D)
	N e Torque Máx.	$100((100+C)/(100+D)-1) = -18,4$
SP 19 gatilho e manual (25 pares de dados)	N	-10,1 (E)
	Torque Máximo	-4,1 (F)
	N e Torque Máx.	$100((100+E)/(100+F)-1) = -6,2$
SP 12, 13 e 19 gatilho e manual (47 pares de valores)	N e Torque Máximo	$(-8,4-18,4-6,2)/3 = -11,0\%$

Confronto de eficiências de energia extrapolada para 14m de composição, para alturas reais de queda do martelo

sondagem	tipo de acionamento	$100 (\text{corda manual} / \text{corda gatilho}) - 1)$
SPT 12	manual/gatilho	-13,6
SPT 13	manual/gatilho	-11,1
SPT 14	manual/gatilho	-12,0
SPT 19	manual/gatilho	-10,4
SP1,2,3,11,12 e 13	manual/gatilho	-8,8
SP1A,2A,14,15,16,17,e 19	manual/gatilho	-11,8

obs. estes dados são provenientes dos anexos 1, 2 e 12 do volume 2

Tabela 5.14 - Confronto de acionamento manual com cabo de aço com aquele com corda manual

(Martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira e cabeça de bater normal de 3,6kg)

confronto direto com os valores medidos e interpolados

sondagem , nº de dados medidos e interpolados, tipo de acionamento	parâmetros de comparação	média % $100(\text{cabo de aço manual} / \text{corda manual}) - 1$
SP 4 manual (11 pares de dados)	N	-7,2 (A)
	Torque Máximo	-2,3 (B)
	N e Torque Máx.	$100((100+A)/(100+B)-1) = \mathbf{-5,0}$
SP 17 manual (25 pares de dados)	N	0,5 (C)
	Torque Máximo	-2,0 (D)
	N e Torque Máx.	$100((100+C)/(100+D)-1) = \mathbf{2,6}$
SP 4 e 17 manual 36 pares de dados	N e Torque Máximo	$(-5,0 + 2,6)/2 = \mathbf{-1,2}$

Confronto de eficiências de energia extrapolada para 14m de composição, para alturas reais de queda do martelo

sondagem	tipo de acionamento	$100 (\text{corda manual} / \text{cabo de aço manual}) - 1$
SPT 14	manual	-0,3
SPT 17	manual	-2,6
SP1A, 2A, 14, 15, 16, 17 e 19	manual	-1,6

obs. estes dados são provenientes dos anexos 5 e 13 do volume 2

Tabela 5.15 - Martelo cilíndrico com pino-guia e sem coxim de madeira em confronto com aquele com coxim de madeira
(Martelo cilíndrico com pino-guia, acionamento c/corda, cabeça de bater normal de 3,6kg)

confronto direto com os valores medidos e interpolados

sondagem , n° de dados medidos e interpolados, tipo de acionamento	parâmetros de comparação	média % $100((\text{sem coxim} / \text{com coxim}) - 1)$
SP 1 corda manual (11 pares de dados)	N	7,8 (A)
	Torque Máximo	4,2 (B)
	N e Torque Máx.	$100((100+A)/(100+B)-1) = 3,5$

Confronto de eficiências de energia extrapolada para 14m de composição, para alturas reais de queda do martelo

sondagem	tipo de acionamento	$100((\text{com coxim} / \text{sem coxim}) - 1)$
SP 1	corda manual	-3,0
SP 2	corda manual	-2,1
SP 11	corda e gatilho	-2,4
SP 12	corda e gatilho	1,2
SP 1 e 2	corda e gatilho	-2,5
SP 11 e 12	corda e gatilho	-0,7

obs. estes dados são provenientes dos anexos 8 e 14 do volume 2

Tabela 5.16 - Cabeça de bater grande de 14kg em confronto com a cabeça normal de 3,6kg

(Martelo cilíndrico com pino-guia, acionado com corda manual e com gatilho)

confronto direto com os valores medidos e interpolados

sondagem , nº de dados medidos e interpolados, tipo de acionamento	parâmetros de comparação	média % $100(\text{cabeça grande} / \text{cabeça normal}) - 1$
SP7 manual, c/coxim de madeira. (11 pares de dados)	N	-2,9 (A)
	Torque Máximo	-9,7 (B)
	N e Torque Máx.	$100((100+A)/(100+B)-1) = 7,5$
SP 9 manual, s/coxim de madeira (11 pares de dados)	N	36,8 (C)
	Torque Máximo	28,0 (D)
	N e Torque Máx.	$100((100+C)/(100+D)-1) = 6,9$
SP 16 gatilho, c/coxim de madeira (25 pares de dados)	N	11,2 (E)
	Torque Máximo	2,7 (F)
	N e Torque Máx.	$100((100+E)/(100+F)-1) = 8,3$
SP 7, 9 e 16 (47 pares de dados)	N e Torque Máx.	$(7,5 + 6,9 + 8,3)/3 = 7,6$

confronto de eficiência de energia extrapolada para 14m de composição, para alturas reais de queda do martelo

sondagem	tipo de acionamento	$100 (\text{cabeça normal} / \text{cabeça grande}) - 1$
SP 11	gatilho, c/coxim	12,8
SP 12	gatilho, c/coxim	16,2
SP13	gatilho, c/coxim	12,4
SP 16	gatilho, c/coxim	5,4
SP 11	gatilho, s/coxim	10,7
SP 12	gatilho, s/coxim	11,8
SP 13	gatilho, s/coxim	6,0

obs. estes dados são provenientes dos anexos 9 e 14 do volume 2

Tabela 5.17 - Cabeça de bater pequena de 1,2kg em confronto com a cabeça de bater normal de 3,6kg

(Martelo cilíndrico com pino-guia, acionamento com corda e gatilho, com coxim de madeira)

confronto direto com os valores medidos e interpolados

sondagem , n° de dados medidos e interpolados, tipo de acionamento	parâmetros de comparação	média % $100(\text{cabeça pequena} / \text{cabeça normal}) - 1)$
SPT 18 gatilho (11 pares de dados)	N	-8,2 (A)
	Torque Máximo	9,0 (B)
	N e Torque Máx.	$100((100+A)/(100+B)-1) = \mathbf{-15,8}$

Confronto de eficiências de energia extrapolada para 14m de composição, para alturas reais de queda do martelo

sondagem	tipo de acionamento	$100 (\text{cabeça normal} / \text{cabeça pequena}) - 1)$
SPT 11	corda e gatilho	-6,4
SPT 12	corda e gatilho	-1,7
SPT 13	corda e gatilho	-3,0

obs. estes dados são provenientes dos anexos 9 e 14 do volume 2

FOTO 5.1

Acionamento com corda manual do martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg.

EMPRESA 1 – Campus/UEM

FOTO 5.2

Posicionamento da célula de carga na composição de hastes, martelo cilíndrico com pino-guia, com cabeça de bater normal de 3,6kg, acionamento com corda manual.

EMPRESA 3 – Moema/SP

FOTO 5.3

Acionamento com cabo de aço manual do martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg.

EMPRESA 1 – Campus/UEM

FOTO 5.4

Acionamento com dispositivo de soltura (gatilho) do martelo com pino-guia, com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg.

EMPRESA 1 – Campus/UEM

FOTO 5.5

Posicionamento da célula de carga e do gatilho, em relação à composição de hastes, à cabeça de bater e ao martelo.

EMPRESA 1 – Campus/UEM

FOTO 5.6

Sistema de registro de campo de eventos dinâmicos, do tipo IPT, constituído por fontes, multímetro, condicionadores de sinais, microcomputador, placa A/D e célula de carga

FOTO 5.7

Cabeça de bater de tamanho variado: normal de 3,6kg, grande de 14kg e pequena de 1,2kg.

FOTO 5.8

Medidas de torque máximo e mínimo conjuntamente com o ensaio SPT.

EMPRESA 1 – Campus/UEM

FOTO 5.9

Trado helicoidal utilizado no avanço da perfuração até o lençol freático d'água.

EMPRESA 1 – Campus/UEM

FOTO 5.10

Avanço da perfuração com circulação d'água.

EMPRESA 3 – Moema/SP

6 CONCLUSÕES

As células de carga, montadas em segmentos da própria haste da composição, haste com 25,4mm de diâmetro nominal interno, apresentaram mudanças na constante de aferição, indicando o elevado nível de tensão a que são submetidas quando do ensaio SPT. Isto conduziu à adoção do procedimento de se refazer constantemente as aferições da célula, no período de utilização, assim como apontou a necessidade de se confeccionar células mais robustas e com aço de resistência mais elevada.

A expressão teórica de Schmertmann/Palacios e também a de Fairhurst, para determinação da eficiência de energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, são funções dependentes e crescentes com o comprimento da composição de hastes e passam pela origem. Todavia dados experimentais, aqui obtidos através de célula de carga, indicam que estas funções não passam pela origem, pelos motivos de imperfeições no impacto e inércia de material constituinte das hastes, assim como pela existência, além da cabeça de bater e coxim de madeira, também de impulsos de tensões refletidas antes da chegada das reflexões provenientes da região do amostrador. Por isso, qualquer valor de eficiência de energia dinâmica, referente à primeira onda de compressão incidente nas hastes no ensaio SPT, deve vir sempre acompanhado do registro do comprimento da composição de referência, enquanto este comprimento não for definido em norma específica.

Em vez de se usar coeficientes teóricos, como aqueles propostos por Schmertmann/Palacios ou pela norma D4633-86 da ASTM, para correções da velocidade de propagação de impulsos de tensão, da posição da célula de carga na composição e para extrapolação de eficiência para comprimento de composição maior do que o de medida, o melhor a se fazer é se ajustar uma curva do tipo exponencial ($y = A + B \exp(-Cx)$) aos valores de energia medidos, incidentes e extrapolados, e então, com base nesta curva ajustada, estimar a eficiência de energia para o comprimento de composição de interesse.

Naturalmente estes ajustes não são necessários quando a instrumentação utilizada é constituída, além da célula de carga, por acelerômetros, o que atualmente começa a ser viável, sendo possível então calcular-se inclusive a energia incidente total máxima,

independentemente do comprimento da composição sobre o qual se fez o registro do evento dinâmico.

Apesar das dificuldades normalmente tidas quando das medidas e dos cálculos da energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente e, também, da heterogeneidade sempre existente no subsolo, o que dificulta o confronto direto dos valores de N , pode-se observar a influência marcante nos resultados de resistência à penetração N do SPT de fatores tais como: tamanho da cabeça de bater, uso de dispositivo de queda livre do martelo, uso de roldana móvel, tipo de martelo, estado de conservação da composição de hastes e avanço da perfuração feita pela cravação do próprio amostrador.

Os dados obtidos nesta pesquisa, com referência à eficiência de energia transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, ainda que na forma preliminar e válidas somente para as condições desta pesquisa, permitem concluir que:

- A composição nova apresentou-se 4,8% e 7,7% mais eficiente do que a composição desgastada pelo uso, respectivamente para martelo cilíndrico com pino-guia acionado com corda manual e com gatilho (comparação proveniente de treze sondagens realizadas pela empresa 1, no Campus da UEM).
- O valor de eficiência de energia, transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição nova ou velha de 14m de comprimento, para martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, com cabeça de bater de 3,6kg, variou, na forma de média por empresa, de 69,4% a 77,5%, com média geral de 73%, quando do acionamento manual (resultado de 3 empresas, excluindo-se resultados da empresa 5). Estes mesmos valores de eficiência de energia, passam a ser de 75,5%, 85,0% e 80,9%, quando do acionamento com corda e gatilho.
- O valor de eficiência de energia transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente e extrapolada para composição nova ou velha de comprimento infinito, para martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, com cabeça de bater normal de 3,6kg, na forma de média por empresa executante, variou de 77,6% a 86,5%, tendo como média geral 81,9%, quando do acionamento com corda manual (resultado de três empresas). Estes mesmos valores de eficiência passam a ser de 83,5%, 93,0% e 90,2%, quando do acionamento com corda e gatilho (resultado de 3 empresas).
- O martelo cilíndrico com pino-guia, com coxim de madeira, com cabeça de bater normal de 3,6kg e acionamento com gatilho, apresentou-se de 6,5% a 15,9%, com média geral de 10,9%, mais eficiente do que quando com acionamento com corda

manual (resultado de comparação de médias de eficiências por empresa, para composição nova ou velha de 14m de comprimento, para três empresas executantes). Estes mesmos valores passam a ser de 7,5%, 14,2% e 10,1%, quando extrapolados para composição nova ou velha de comprimento infinito.

- Há evidências, desde os primeiros registros de eventos dinâmicos do SPT feitos no Brasil, de que o martelo cilíndrico vazado é menos eficiente do que aquele com pino-guia. Os registros feitos nesta pesquisa, em sondagem executada pela empresa 2, apontaram neste sentido pois o valor médio da eficiência obtida foi de 66,5% e 77,5%, respectivamente para martelo cilíndrico vazado e martelo cilíndrico com pino-guia, ambos com coxim de madeira, cabeça de bater normal de 3,6kg, comprimento de composição nova de 14m e acionamento com corda manual. Estes mesmos valores passam a ser de 74,2% e 82,5%, quando do acionamento com gatilho. Estas eficiências apontam no sentido de que o martelo vazado é 14,2% e 10,1% menos eficiente do que o martelo cilíndrico com pino-guia, respectivamente para o acionamento manual e com gatilho.
- A eficiência média de energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, para martelo cilíndrico com pino-guia com coxim de madeira, acionamento manual com cabo de aço, nas sondagens executadas pela empresa 1 no Campus da UEM, foi de 73,9% e 83,5% respectivamente, para composição nova de 14m e de comprimento infinito. Estes valores de eficiências apontam no sentido de que o acionamento com cabo de aço é 1,7% e 3% mais eficiente do que o acionamento com corda manual, respectivamente para composição nova de 14m e de comprimento infinito, o que revela a pouca influência nos valores de N do SPT.
- O martelo cilíndrico com pino-guia sem coxim de madeira, com cabeça de bater normal de 3,6kg, apresentou-se 2,5% e 0,8% mais eficiente do que o martelo com coxim de madeira, respectivamente quando do acionamento com corda manual e quando do acionamento com corda e gatilho. Estes dados, obtidos pela empresa 1, no Campus da UEM, apontam no sentido da pequena influência do uso ou não de coxim de madeira nos resultados de N do SPT.
- Os valores de eficiência de energia transferida às hastes na primeira onda de compressão obtidos na empresa 1 no Campus da UEM, com o martelo com pino-guia e com coxim de madeira, apontaram no sentido da influência marcante do tamanho da cabeça de bater nos valores de energia transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente. Estes valores de energia apontam no sentido de que a cabeça de bater grande de 14kg é 12,1% menos eficiente do que a cabeça normal de

3,6kg, enquanto a cabeça de bater pequena de 1,2kg é 4% mais eficiente do que a cabeça normal de 3,6kg.

- O uso de sistemas constituídos por roldana móvel, apesar de facilitar o manejo do martelo, influi significativamente no nível de energia transferido às hastes na primeira onda de compressão incidente, como evidenciado por medições de eventos dinâmicos, em duas sondagens realizadas pela empresa 1 no Campus da UEM, em que o uso de roldana móvel apresentou-se 8,4% e 19,2% menos eficiente do que o acionamento com corda manual auxiliada com uma roldana fixa, para corda fina de 12mm e corda grossa de 18mm, respectivamente.
- Dados obtidos em dois locais da cidade de Maringá-PR, evidenciam a influência marcante do avanço da perfuração feita com a cravação do próprio amostrador nos valores de N do SPT, resultando em valores tão majorados quanto 131,5% mais elevados do aqueles obtidos com a metodologia proposta pela norma NBR6484/80.

Os valores de N e de torque máximo, obtidos em sondagens executadas pela empresa 1 no Campus da UEM, especificamente para confronto direto de resultados, apesar das dificuldades na análise, devido a dispersões de valores provenientes da heterogeneidade do subsolo, que sempre se faz presente neste tipo de trabalho, apresentaram-se com uma certa coerência em relação àqueles da energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, apesar de exceções que apontam no sentido da necessidade de:

- obtenção de um número maior de dados; e
- reavaliação da hipótese de que o valor de torque máximo medido no SPT é pouco sensível a variações pequenas ou mesmo moderadas na intensidade de energia dinâmica contida em cada golpe do martelo, disponível à cravação do amostrador.

Para finalizar, é importante salientar que os valores e conclusões aqui expressos são restritos aos dados de ensaios obtidos nestes experimentos e, como acontece na maioria dos casos, novos dados devem ser acrescentados a estes, para que as tendências aqui observadas possam ser generalizadas e quantificadas.

7 SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DOS TRABALHOS

O SPT tem-se mostrado razoavelmente eficiente nas investigações geotécnicas, tornando-se, inclusive no Brasil, um ensaio de campo de uso corrente para obtenção de parâmetros necessários aos projetos de fundações e também aos geotécnicos em geral. Este ensaio, associado à sua própria sondagem de simples reconhecimento, está bem estabelecido na prática, proporcionando a obtenção não só de amostras das camadas de solo mas também do índice de resistência à penetração, englobando uma vasta experiência não apenas regional mas em geral, calcada em correlações, muitas das quais empíricas mas de simples uso e entendimento.

A despeito de questões sempre levantadas quanto à confiabilidade e repetibilidade do SPT, o mesmo continuará a ser usado extensivamente em função de sua robustez, simplicidade, fornecimento de amostras de camadas de solo e, também, por ser um ensaio dinâmico.

Pelo exposto, é técnica e economicamente viável investir recursos para o melhor entendimento deste ensaio, buscando sempre a avaliação quantitativa de suas variáveis relevantes e intervenientes, com vista tanto à padronização de resultados quanto à normatização, a qual se tem mostrado com falhas. Além disto, por ser um ensaio corrente e de uso generalizado, deve-se procurar, sem descaracterizá-lo e como alternativa, incorporar medições ou mesmo outros ensaios, buscando com isto a oportunidade, quando de interesse, da obtenção de um rol maior de informações úteis aos projetos de fundações e geotécnicos em geral.

Neste sentido, no Brasil, introduziram-se as medidas de torque máximo necessário à rotação do amostrador cravado, quando da realização do ensaio SPT. No exterior, tem-se despendido esforços no desenvolvimento de uma instrumentação e procedimento de registro de eventos dinâmicos do SPT, para posterior análise e determinação de resistência e parâmetros do solo envolvente ao amostrador, a serem utilizados em problemas geotécnicos como, por exemplo, a previsão de cravabilidade e capacidade de carga de elementos de fundações.

Naturalmente esta instrumentação no exterior, que é do tipo de uso corrente na monitoração de cravação de estacas, é composta por transdutores de deformação (células de carga) e acelerômetros, instalados junto a uma seção da composição de hastes, acrescida também de uma outra instrumentação para o registro de deslocamento desta seção ao final de cada golpe do martelo, como evidenciado a seguir.

No passado, dificuldades foram encontradas com as medidas de aceleração no ensaio SPT, o que vem sendo progressivamente superado com as novas gerações de acelerômetros e com o procedimento de análise dos sinais avaliados e corrigidos pela observação do zero eletrônico e compatibilidade de deslocamento da seção instrumentada, ao final de cada golpe do martelo.

Em termos de SPT brasileiro, isto é, para o caso de uso de composição de hastes de pequena seção transversal em comparação com a do amostrador, haverá dificuldades que deverão ser superadas na fase de análise dos registros dos eventos dinâmicos, com vistas à determinação de parâmetros do solo a serem utilizados em projetos de engenharia.

A utilização de células de carga, acelerômetros e medida de deslocamento da seção instrumentada permite também a determinação de energia dinâmica máxima total incidente e transferida às hastes numa forma independente do comprimento da composição e das reflexões dos impulsos de tensão. O cálculo da energia dinâmica incidente transferida às hastes, somente através do registro de força seccional em função do tempo, proveniente de célula de carga, é dependente do comprimento da composição e se torna real somente quando da inexistência de reflexões de tensões, a não ser aquelas oriundas do amostrador.

Em função do exposto, esforços devem ser despendidos em dois sentidos: o de se avaliar em forma quantitativa fatores relevantes e intervenientes no SPT e o de aumentar o rol possível de parâmetros do solo obtidos com vista à utilização em projetos. Para isto, propõe-se o estudo que se segue:

1. Avaliação de avanço da perfuração com respeito ao uso ou não de lama de estabilização e, também, à mudança do teor de umidade do solo na cota de ensaio.
2. Avaliação de equipamentos automatizados, que começam a ser importados, cujo processo de execução do SPT se diferencia do tradicional brasileiro no tocante ao sistema de avanço da perfuração, tipo de cabeça de bater e de composição de hastes e, por fim, configuração e forma de acionamento automático do martelo (martelo do tipo queda livre).

3. Introdução de um instrumental mais completo (transdutores de força, acelerômetros e medidores de deslocamento) acompanhado de “softwares” para registro e análise de eventos dinâmicos no SPT. Estes instrumentos e “softwares”, importados ou desenvolvidos no Brasil, devem ser adaptados às condições do SPT brasileiro visando, com isto, a plena consonância com o estudo e entendimento de variáveis intervenientes no SPT e também com a determinação de parâmetros do solo, necessários aos projetos de fundações e de geotecnia em geral.
4. Para finalizar, medidas de N e de torque máximo em ensaios SPT, executados com níveis diferentes de energias, devem ser feitos para se avaliar o grau de confiabilidade da hipótese comumente feita de que o torque máximo medido no SPT é pouco sensível ao nível de energia dinâmica, contida em cada golpe do martelo e disponível à cravação do amostrador. Alguns poucos ensaios de SPT associados a medições de torque máximo, obtidos em uma única sondagem, apontam no sentido da existência de uma certa sensibilidade do valor do torque máximo com o nível de energia, contida em cada golpe do martelo e utilizada na cravação do amostrador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- ABGE (1991) Diretrizes para execução de sondagens. São Paulo, **ABGE**.
- ABNT (1980) Execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos. NBR6484/80.
- ABOU-MATAR, H.; RAUCHE, F.; THENDEAN, G.; LINKINS, G.; GOBLE, G. (1996) Wave equation soil constants from dynamic measurements on SPT. In: **International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles**, 5.
- ALBIERO, J.H. (1990) Análise do emprego de fórmulas empíricas na previsão de carga última de estacas. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações-Cobramsef**, 9, Salvador. Anais, v.2, p.501-512.
- ALBIERO, J.H. (1990) Correlação entre resistência de cone (Q_c) e resistência à penetração (SPT), para solos lateríticos. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações-Cobramsef**, 9, Salvador. Anais, v2, p.187-194.
- ALONSO, U.R. (1980) Correlações entre resultados de ensaios de penetração estática e dinâmica para a cidade de São Paulo. **Solos e Rochas**, ABMS, v.3, n.3, p.19-25, dez.
- ALONSO, U.R. (1994) Correlações entre o atrito lateral medido com o torque e o SPT. **Solos e Rochas**, ABMS, v.17, n.3, p.191-194, dez.
- AOKI, N., VELLOSO, D.A. (1975) An approximated method to estimate the bearing capacity of pile. In: **Panamerican Conference on Soil and Foundation Engineering**, 5, Buenos Aires. Anais, p. 367-377.
- ASTM (1958) Penetration test and split barrel sampling of soils. D1586-58 T.
- ASTM (1963) Penetration test and split barrel sampling of soils. D1586-63 T.
- ASTM (1967) Penetration test and split barrel sampling of soils. D1586-67.
- ASTM (1974) Penetration test and split barrel sampling of soils. D1586-67, reapproved 1974.
- ASTM (1984) Penetration test and split barrel sampling of soils. D1586-84.

- ASTM (1986) Stress wave energy measurement for dynamic penetrometer testing systems. D4633-86.
- ASTM (1992) Penetration test and split barrel sampling of soils. D1586-84, reapproved 1992.
- BELINCANTA, A. (1985) **Energia dinâmica no SPT, resultados de uma investigação teórico experimental**. São Paulo. Dissertação de mestrado - Escola Politécnica da USP.
- BELINCANTA, A.; ALVIM, F.M.; NAVAJA, S.S.; RAMIRES SOBRINHO, R. (1984) Métodos para medida de energia dinâmica no SPT. **Solos e Rochas**, ABMS, v.17, n.2, p.93-110, ago.
- BELINCANTA, A.; DIONISI, A.; MACHADO, J.R.A.; ALVIM, F.M.; RAMIRES SOBRINHO, R.; NAVAJA S.S.; TACHIBANA, L.S. (1994) Medidas de energia dinâmica no SPT, sistema IPT. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**, 10, Foz do Iguaçu. Anais, ABMS, v.2, p.507-514.
- BOGOSSIAN, F.; RODRIGUES, L.B. (1974) Sondagens à percussão, o equipamento motorizado. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, 5, São Paulo. Anais, ABMS, v.1, p.53-60.
- BOWLES, J.E. (1988) **Foundation Analysis and Design**. 4th Ed. Singapore, McGraw Hill. p.131-145.
- BROMS, B.B.; FLODIM, N. (1988) History of penetration testing. In: **International Symposium on Penetration Testing**, 1, ISOPT I, Orlando. Proceedings. v.1, p.157-220.
- BROWN, R.E. (1977) Drill rod influence on standard penetration test. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, v.103, n.GT 11, p.1332-1336.
- BUTLER, J.J.; CALIENDO, J.A.; GOBLE, G.G. (1998) Comparison of SPT energy measurement methods. In: **International Conference on Site Characterization**, ISC'98, Atlanta. Proceeding, v.2. p.901-906.
- CAMPANELLA, R.I.G.; SY, A. (1994) Recent development in energy calibration of penetration tests at UBC. In: **International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 13, New Delhi. Proceedings, v.4, p.151-157.
- COSTA NUNES, A.J. (1956) **Curso de Mecânica dos Solos**. Editora Globo S.A.
- D'ARAUJO COSTA, R.J. (1993) Entrevista. **Boletim Nacional da ABMS**, n.40, out.

- DÉCOURT, L. (1974) Sondagens-Discussão. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, 5., São Paulo. Anais, ABMS, v.4, p.86-87.
- DÉCOURT, L. (1989) The Standard Penetration Test, state of the art. In: **International Conference on Soil Mechanic and Foundation Engineering**, 12, Rio de Janeiro. Proceedings, v.4, p.2405-2416.
- DÉCOURT, L. (1991a) Bearing capacity of displacement piles in residual soils on basis of SPT. In: **Seminário de Engenharia de Fundações Especiais**, 2, São Paulo. Anais, v.1, p.111-119.
- DÉCOURT, L. (1991b) Com que precisão se pode prever, com base no SPT, a capacidade de carga de estacas de deslocamento em solos residuais? In: **Seminário de Engenharia de Fundações Especiais**, 2, São Paulo. Anais, v.1, p.120-122.
- DÉCOURT, L. (1991c) Special problems on foundation: Shallow foundation and displacement piles. In: **Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Fundações**. Viña del Mar, Uruguai. Anais, v.1.
- DÉCOURT, L. (1991d) Previsões dos deslocamentos horizontais de estacas carregadas transversalmente com base em ensaios penetrométricos. In: **Seminário de Engenharia de Fundações Especiais**, 2, São Paulo. Anais, v.2, p.340-362.
- DÉCOURT, L. (1994) Fundações e interação solo estrutura-relatório geral. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações-Cobramsef**, 10, Foz do Iguaçu, ABMS, (v.pós congresso), p.179-224.
- DÉCOURT, L. (1995a) Discussão sobre: Correlações entre atrito lateral medido com torque e o SPT. **Solos e Rochas**, v.18, n.1, p.65-67, abr.
- DÉCOURT, L. (1995b) Discussão sobre: SPTF: Parte II. **Solos e Rochas**, v.18, n.1. p.67-69, abr.
- DÉCOURT, L.; QUARESMA, A.R. (1978) Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**, 6, Rio de Janeiro. Anais.
- DÉCOURT, L.; BELINCANTA, A.; QUARESMA FILHO, A.R. (1989) Brazilian Experience on SPT. **Supplementary Contributions by the Brazilian Society for Soil Mechanics, ICSMFE**, 12, Rio de Janeiro, p.49-54.
- DÉCOURT, L.; QUARESMA FILHO, A.R. (1991) The SPT-CF an improved SPT. In: **Seminário de Engenharia de Fundações Especiais**, 2. São Paulo. Anais, v.1, p.106-110.

- DÉCOURT, L.; QUARESMA FILHO, A. R. (1994) Practical applications of the standard penetration test complemented by torque measurement SPT-T, present stage and future trends. In: **International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 13, New Delhi. Proceedings, v.4, p.143-146.
- ERIKSSON, H. (1992) **Behavior of driven pile evaluated from stress wave measurement performed during dynamic probing**. Stockholm Royal institute of technology.
- FARRAR, J.A. (1998) Summary of Standard Penetration Test (SPT) energy measurement experience. In: **International Conference on Site Characterization, ISC'98**, Atlanta. Proceeding, v.2, p.919-926.
- FLETCHER, G.F.A. (1965) Standard penetration test: its uses and abuses **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, v.91, n.SM4, p.67-77, July.
- GAIOTO, N. (1974) Sondagens-Relato. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, 5, São Paulo. ABMS, v.4, p.70-75.
- GEISSER, R.F. (1966) Discussion of "standard penetration test: its uses and abuses". **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, v.92, n.SM2, p.184-185, mar.
- GERBER, I. (1974) Sondagens-Relato. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, São Paulo. Anais, ABMS, v.4, p.76-82.
- GIBBS, H.J.; HOLTZ, W.G. (1957) Research on determining the density of sands by spoon penetration testing. In: **International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 4, London. Proceedings, v.1, p.35-39.
- GOBLE, G.; ABOU-MATAR, H. (1992) Determination of wave equation soil constants from the Standard Penetration Test. In: **International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles**, 4, Netherlands. Proceedings, v.único, p.99-103.
- GOBLE, G. (1996) SPT improvements. **GRL**, n. 27, Cleveland, Ohio, USA.
- GOLOMBEK, S.; ALONSO, U.R. (1992), Capítulo 10, Fundações Profundas, In **Solos da Cidade de São Paulo**. São Paulo, ABMS. Cap. 10, p.229-247
- GONTIJO DE PAULA, C. (1974) Sondagens-Relato. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, 5, São Paulo. Anais, ABMS, v.4, p.103.

- GRAAF, H.J.; HEUVEL, M.H.J.P. (1992) Determination of the penetration energy in the Standard Penetration Test. In: **International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles**, 4, Netherlands. Proceedings, v.1, p.253-257.
- GRILLO, O. (1993) Entrevista. **Boletim Nacional da ABMS**, n.43, fev.
- HACHICH, W.; NADER, J.J. (1992), Capítulo 6, Correlações entre parâmetros: Análise crítica. In: **Solos da Cidade de São Paulo**. São Paulo, ABMS. Cap. 6, p.182-192.
- HALL, J.R. (1982) Drill rod energy as a basis for correlation of SPT data. In: **European Symposium on Penetration Testing**, 2, ESOPT II, Amsterdam. Proceedings. v.1, p.57-60.
- HURTADO, G.J.; NÉ, P.R. (1982) **Iniciação à extensometria**. São Paulo, SODMEX.
- HVORSLEV, M.J. (1966) Subsurface exploration and sampling of soils for civil engineering purpose. ASCE.
- IRELAND, H.O. (1966) Discussion of "standard penetration test: its uses and abuses". **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, v.92, n.SM2, p.189-190, mar.
- IRELAND, H.O.; MORETO, O.; VARGAS, M.(1970) The dynamic penetration test: A standard that is not standardized. **Géotechnique**, 20, n.2. p.185-192.
- ISOPT, (1988) Technical Committee on Penetration Testing of Soils. **Report on Reference Test Procedure**. ISOPT, 1, Orlando. Proceedings, v.1, p.3-26.
- ISSMFE, (1989) Technical Committee on Penetration Testing of Soils, TC 16. **Report on Reference Test Procedure CPT-SPT-DP-WST**. Rio de Janeiro.
- JAMIOLKOWSKI, M.; GHIONNA, V. N.; LANCELOTTO, R.; PASQUALINI, E. (1988) New correlation of penetration test for design practice. In: **International Symposium on Penetration Testing**, 1, ISOPT I, Orlando. Proceedings, v.1, p.263-396.
- KOVACS, W.D.; EVANS, S.C.; GRIFFITH, A.L. (1977) Towards a more standardized SPT. In: **International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 9, Tokyo. Proceedings, v.2, p.269-276.
- KOVACS, W.D. (1979) Velocity measurement of free-fall SPT hammer. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, v.105, n.GT1, p.1-10, Jan.
- KOVACS, W.D. (1980) What constitutes a turn? **Geotechnical Testing Journal**.
- KOVACS, W.D.; SALOMONE, L.A; YOKEL, F.Y. (1981) Energy Measurement in the Standard Penetration Test. **NBS Buildings Science**, Serie 135, aug.

- KOVACS, W.D.; SALOMONE, L.A. (1982) SPT hammer energy measurements. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, v.108, n.GT4, p. 599-620, apr.
- KOVACS, W.D. (1994) Effects of SPT equipment and procedures on the design of shallow foundations on sands. In: **Settlement 94**, Texas. ASCE, GPS 40, v.1, p.121-131.
- LIANG, R.Y.; SHENG, Y. (1993) Wave equation parameters from driven rod test. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, v.119, n.6, p.1037-1057, Jun.
- LO PINTO, V. (1966) Discussion of "standard penetration test: its uses and abuses". **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, v.92, n.SM1, p.195-196.
- MACHADO, O.; MAGALHÃES, C.S. (1955) A resistência à penetração na fixação de taxas admissíveis dos terrenos de fundação. Separata da **Engenharia**, v.13, n.148, mar.
- MARCUSON, W.F.; BIEGANOUSKY, W.A. (1977a) Laboratory standard penetration test on fine sands. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, v.103, n.GT6, p.565-588.
- MARCUSON, W.F.; BIEGANOUSKY, W.A. (1977b) SPT and relative density in coarse sand. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, v.103, n.GT11, p.1295-1309.
- MASSAD, F. (1977) Ensaio de Campo-Medições de deformação, poropressão, parâmetros de resistência, instrumentação. In: **Prospecção do Subsolo**, Recife. Anais, ABMS-NE, v.único, p.235-292.
- MATSUMOTO, T.; SERIGUSHI, H.; YOSHIDA, H.; KITA, K. (1992) Significance of two point strain measurement in SPT. **Soil and Foundation, JSSMFE**, v.32, n.2, p.67-82, jun.
- MELLO, V.F.B. (1967) **Considerações sobre os ensaios de penetração e sua aplicação a problemas de fundações rasas**. São Paulo, 114 p. Tese apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP.
- MELLO, V.F.B. (1971) The standard penetration test. In: **Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 4, Porto Rico. Proceedings, v.1, p.1-87.
- MENEZES, S.M.; DALL'AGLIO SOBRINHO, M. (1994) Avaliação do Ensaio SPT - Energias, torques, impactos, velocidades e suas limitações. In: **Congresso Brasileiro**

- de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações - cobramsef**, 10, Foz do Iguaçu. Anais, ABMS, v.2, p.359-366.
- MOHR, H.A. (1966) Discussion of "standard penetration test: its uses and abuses". **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, v.92, n.SM1, p196-199, Jan.
- MOJABI, M.S.; THOMAS, G.G. (1988) The effect of water on SPT results in sand. In: **Penetration Testing in the UK**, London, 1989. Proceedings. v. único, p.93-94.
- MORETO, O. (1965) General report on division 2. In: **International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 6, Canada. Proceedings, v.3, p.220-241.
- MORGANO, C.M.; LIANG, R. (1992) Energy transfer in SPT-rod length effect. In: **International Conference on the Application of Stress - Wave Theory to Piles**, 4, Netherlands. Proceedings, v. 1, p.121-127.
- NAKAO, R. (1981) **Aplicação da equação da onda na análise do comportamento de estacas cravadas**. Rio de Janeiro. Dissertação de mestrado - COPPE.
- NAPOLIS 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.
- NEUBERT, H.N.P. (1975) **Instrument and transducer: An introduction to their performance and design**. Oxford Clarendon press, p.117-137.
- NIXON, I.K. (1982) Standard penetration test: State of art report. In: **European Symposium on Penetration Testing**, 2, ESOPT II, Amsterdam. Proceedings, v.1, p.3-24.
- NIYAMA, S. (1983) **Medições dinâmicas na cravação de estacas: fundamentos, instrumentação e aplicações práticas**. São Paulo, 256 p. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da USP.
- OLIVEIRA, H.G. (1974) Sondagens - Relato. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, 5, São Paulo. Anais, ABMS, v.4, p.65-70.
- PALACIOS, A. (1977) **The theory and measurement of energy transfer during standard penetration test sampling**. Florida. Dissertation for the degree of doctor in philosophy - University of Florida.
- PARSON, J.D. (1966) Discussion of "Standard penetration test: its uses and abuses". **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, n.SM3, p. 103-105, may.

- PDI. (1996) SPT analyser TM. **Pile dynamics, inc.**, Cleveland, Ohio, USA.
- PEREIRA, M.B. Sondagens-Discussão. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, 5, São Paulo. Anais, ABMS, v.4, p.85.
- PINTO, C.S. (1966) **Influência da granulometria das areias na capacidade de carga investigada por meio de modelos**. São Paulo. 117p. Tese de doutorado, Escola Politécnica da USP.
- QUARESMA, A. (1974) Sondagens-Discussão. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, 5, São Paulo. Anais, ABMS, v.4, p.82-84.
- RANZINI, S.M.T. (1988) SPTF. **Solos e Rochas**, ABMS, v.11, n.único, p.29-30.
- RANZINI, S.M.T. (1994) SPTF: Parte II. **Solos e Rochas**, ABMS, v.17, n.3, p.189-190, dez.
- RAUSCHE, F.; THEADEAN, G.; ABOU-MATAR, H.; LIKENS, G.; GOBLE, G. (1994) Investigation of dynamic and static pile behavior from modified standard penetration test. In **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações - Cobramsef**, 10, Foz do Iguaçu. Anais, ABMS, v.pós-congresso, p.3-32.
- RENAU, F.F. (1966) Discussion of "standard penetration test: its uses and abuses". **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, v.92, n.SM2, p.187-189, mar.
- ROBERTSON, P.K.; WOELLER, D.J.; ADDO, K.O. (1991) Standard penetration test energy, measurements, using a system based on the personal computer. **Universidade of Alberta**.
- SCHMERTMANN, J.H. (1966) Discussion of "standard penetration test: its uses and abuses". **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, n.SM5, p.130-133.
- SCHMERTMANN, J.H. (1978) Use the SPT to measure dynamic soil properties ? - Yes, but. **ASTM**, STP 654, p.341-355.
- SCHMERTMANN, J.H. (1979) Statics of SPT. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, v.105, n.GT5, p.655-670, may.
- SCHMERTMANN, J.H.; PALACIOS, A. (1979) Energy dynamics of SPT. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, v.105, n.GT8, p.909-926, aug.

- SCHMERTMANN, J.H. (1991) The mechanical aging of soils (the twenty-fifth Karl Terzaghi Lecture). **Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE** v.117, n.9, p.1288-1330, sept.
- SCHNABEL, J.J. (1966) Discussion of "standard penetration test: its uses and abuses". **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, v.92, n.SM2, p. 184, mar.
- SEED, H.B.; TOKIMATSU, K.; HARDER, L.F.; CHUNG, R.M. (1985) Influence of the SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. **Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE**, v.111, n.12, p.1425-1445, dec.
- SEED, R.B.; HARDER, L.F. Jr.; YOUNG, T.L. (1988) Effects of Borehole Fluid on Standard Penetration Test Results. **Geotechnical Testing Journal, ASTM**, v.11, n.4, p.248-256, dec.
- SILVEIRA, P. (1977) Sondagens - Discussão. In: **Prospecção do Subsolo**, Recife. Anais, ABMS-NE, v.único, p.70-77.
- SKEMPTON, A.W. (1986) Standard penetration test procedures and effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging and over consolidation. **Géotechnique**, v.36, n.3, p.425-447.
- SOARES, M.M. (1986) Uso de ensaios de campo para obtenção de parâmetros geotécnicos. Rio de Janeiro, **Coppe-UFRJ**.
- STUBBINGS, J. (1966) Discussion of "standard penetration test: its uses and abuses". **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, v.92, n.SM2, p.185-189, mar.
- SY, A., CAMPANELLA, R.G. (1991) An alternative method of measuring SPT energy. In: **International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics**, St Louis, Missouri. Proceedings, v.1, p.499-505.
- TEIXEIRA, A.H. (1966) Correlações entre a capacidade de carga das argilas e resistência à penetração. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações-Cobramsef**, 3, Belo Horizonte. Anais, v.1, p.55-63.
- TEIXEIRA, A.H. (1974a) A padronização da sondagem de simples reconhecimento. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, 5, São Paulo. Anais, ABMS, v.3, p.1-22.
- TEIXEIRA, A.H. (1974b) Sondagens-Relato. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, 5, São Paulo. Anais, ABMS, v.4, p.32-42.

- TEIXEIRA, A.H. (1977) Sondagens. In: **Prospecção do Subsolo**, Recife. Anais, ABMS-NE, v.único, p.39-61.
- TEIXEIRA, A.H. (1993) In: **Solos do Interior de São Paulo**. Um aperfeiçoamento das sondagens de simples reconhecimento à percussão. São Carlos, ABMS, cap. 4, p.77-93.
- TERZAGHI, K., PECK, R. (1948) **Soil mechanics in engineering practice**. New York, John Wiley and sons inc.
- VARGAS, M. (1989) Heritage lecture: Soil mechanics in Brazil. In: **International Conference on Soil Mechanic and Foundation Engineering**, 12, Rio de Janeiro. Proceedings, v.4, p.2289-2299.
- VARGAS, M. (1993) Entrevista. **Boletim nacional da ABMS**, n.35.
- VARGAS, M. (1994) **Contribuição para a História da Engenharia no Brasil**. EPUSP.
- VELLOSO, D.A. (1991) Capacidade de carga por meio do SPT. In: **Seminário de Engenharia de Fundações Especiais**, 2, São Paulo. Anais.
- WROTH, C.P. (1988) Penetration testing: A more approach to interpretation. In: **International Symposium on Penetration Testing**, 1, ISOPT I, Orlando. Proceedings, v.1, p.303-311.
- YOKEL, F.Y. (1989) Energy transfer mechanism in SPT. **Journal of the Geotechnical Engineering**, ASCE, v.115, n.9, p.1331-1336, sept.