

Fundamentos e métodos de medidas de energia dinâmica no SPT

Antonio Belincanta* e Roberto Lopes Ferraz

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020, Maringá Paraná, Brazil.

*Author for correspondence. e-mail abelincanta@uem.br

RESUMO. Discutem-se neste trabalho os métodos disponíveis no Brasil e no exterior para a medida da energia transferida às hastes no SPT, apresentando-se inclusive registros típicos dos eventos dinâmicos correspondentes.

Palavras-chave: SPT, energia no SPT.

ABSTRACT. Fundamentals and methods of dynamic energy measurements in SPT.

Methods available in Brazil and abroad to measure the energy transferred to rods in Standard Penetration Test (SPT) are discussed. Prototypical records of the corresponding dynamic events are also given and analyzed.

Key words: SPT, energy in SPT.

O SPT (standard penetration test) é um ensaio que é realizado quando da execução de sondagem de simples reconhecimento do subsolo. Ele, além de se prestar para o recolhimento de amostra do solo na respectiva posição em que é executado, presta-se também para o fornecimento de índice de resistência à penetração dinâmica N , que é extremamente útil na previsão de comportamento de solo, quando da solicitação por obras de engenharia civil. Estima-se que, no Ocidente, este tipo de ensaio, associado à sondagem de simples reconhecimento, é utilizado em mais de 90% das obras de engenharia civil, sendo no Brasil propriamente em 100% (Belincanta, 1985).

O ensaio em si, segundo a norma NBR6484 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), se constitui na cravação, a partir da extremidade de um furo de sondagem, de um amostrador tubular padronizado, de diâmetros externo de 51mm e interno de 35mm, através de impacto de um martelo (peso) de 650N (65kgf), com queda “livre” de 750mm. O índice de resistência à penetração N , corresponde ao número de golpes necessário à cravação do amostrador em 300mm, após a cravação inicial de 150mm. Neste sentido o índice de resistência à penetração N está associado diretamente à energia contida em cada golpe do martelo, que é transmitida à composição de hastes e que estará disponível à cravação do amostrador. Pode-se entender que, de um modo mais geral, quanto menor for o montante da energia contida em cada golpe do martelo, maior será o número de

golpes necessário à cravação dos 300mm finais. De tudo isto, em primeira aproximação e tomando como base a linearidade de comportamento, que é válida dentro de determinados limites, pode-se admitir que N é inversamente proporcional à energia que efetivamente alcança o amostrador em cada golpe do martelo.

Apesar da existência de normas e especificações deste ensaio (NBR6484, ASTM D1586 e IRTF – International Reference Test Procedure da ISSMFE), a padronização do mesmo é altamente dependente da avaliação da energia transferida às hastes em cada golpe do martelo. Portanto, o objetivo deste artigo é o de discutir, em seus detalhes, os métodos utilizados no Brasil e no exterior nas medições de energia dinâmica transferida em cada golpe do martelo para as hastes e destas efetivamente para o amostrador.

Mecanismo de transferência de energia no ensaio do tipo SPT

O mecanismo de transferência da energia cinética contida no martelo no instante do impacto, para energia dinâmica nas hastes é, em primeira aproximação, aquela correspondente ao impacto de um peso sobre o topo de uma composição de hastes de comprimento finito, sendo ambos constituídos de mesmo material. A energia é transmitida às hastes em impulsos de tensão cuja magnitude e duração dependem, além da configuração do martelo, das

hastes e da cabeça de bater, também dos materiais com os quais os mesmos são feitos.

Desta maneira, quando do impacto do martelo na cabeça de bater, uma onda de tensão se propaga no sentido descendente da composição de 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 a cabeça de bater permanecem em contato até o tempo $2\ell/c$, quando começa a ocorrer a chegada dos impulsos de tensão, refletidos junto do amostrador. Neste tempo, segundo Schmertmann e Palacios (1979), há uma perda momentânea de contato do martelo com a cabeça de bater, interrompendo a transferência de energia, mas ainda com referência ao mesmo golpe do martelo, há um novo contato através do qual se dará a transferência da remanescente energia existente no martelo. Esta energia remanescente, transferida a partir do segundo contato do martelo, em casos específicos, pode ainda ter um valor significativo em termos de cravação do amostrador, como é o caso principalmente quando de composições curtas.

Na Figura 1, é apresentado esquematicamente o mecanismo de transferência de energia, com as respectivas propagação, reflexão e absorção de impulsos de tensão, notando-se o que se segue:

- a) Na Figura 1a, o martelo se encontra na posição de soltura, com toda a energia na forma de energia potencial ($E_p = P_m H$, onde P_m é o peso do martelo e H é a altura de queda);
- b) Na Figura 1b, nota-se a transferência da energia cinética do martelo ($E_c = P_m V_0^2 / 2g$, onde V_0 é a velocidade do martelo no instante do impacto e g é a aceleração da gravidade) para a energia dinâmica, contida nos impulsos de tensão que se propagam no sentido descendente da composição das hastes. Os impulsos de tensão em magnitude são decrescentes no tempo, pelo menos até o tempo $2\ell/c$;
- c) Na Figura 1c, no tempo ℓ/c , os impulsos de tensão gerados começam a alcançar o amostrador, sendo que parte da energia contida nestes impulsos de tensão (Figuras 1c, 1d e 1e) é despendida no trabalho necessário à cravação do amostrador, enquanto outra parte fica retida nos impulsos refletidos e ascendentes, que começam a alcançar a extremidade superior da

composição de hastes no tempo $2\ell/c$, (Figura 1e); e

- d) A partir do tempo $2\ell/c$ (Figura 1f), as reflexões oriundas do amostrador se refletem na extremidade superior da composição, transformando-se em impulsos de tensão de novo descendentes, voltando a alcançar novamente o amostrador a partir do tempo $3\ell/c$. Estes novos impulsos, refletidos na extremidade superior da composição, podem ou não dar continuidade à cravação do amostrador, pois isto está associado à magnitude dos impulsos e à resistência oferecida pelo solo sobre o amostrador.

Quando o martelo, após sua separação momentânea, que ocorre no tempo $2\ell/c$, entrar novamente em contato com a cabeça de bater, acrescenta aos impulsos refletidos na extremidade superior da composição de hastes aqueles oriundos da continuidade da transferência de energia remanescente no martelo.

Observa-se ainda na Figura 1, que o tempo ($2\ell/c$) corresponde ao término da geração de impulsos de tensão da chamada “primeira onda de compressão incidente”. A partir deste tempo as ondas de tensão não são mais simples, sendo compostas por uma série de impulsos ascendentes e descendentes, entre os quais se encontram aqueles refletidos na região do amostrador e na extremidade superior da composição.

Os impulsos de tensão refletidos, ascendentes e descendentes, continuam a se propagar na composição de hastes até serem despendidos nos trabalhos de penetração do amostrador, ou até sua total dissipação em perdas, quando não forem mais de magnitude suficiente para vencer a resistência imposta pelo solo à penetração do amostrador. É importante observar que, ao contrário da teoria newtoniana de impacto de corpos rígidos, o amostrador só toma conhecimento do impacto do martelo quando da chegada dos impulsos de tensão, iniciando portanto sua penetração somente a partir do tempo (ℓ/c).

Na Figura 2, apresenta-se um registro típico de força seccional em função do tempo, obtido através de célula elétrica de carga, instalada na extremidade superior da composição de hastes, podendo-se observar que:

- a) os impulsos de tensão (força seccional de compressão) começam a sensibilizar e a serem registrados na 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 da força de compressão incidente, 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 de força, a partir do ponto **C**, torna-se complexa pois corresponde aos efeitos finais da superposição dos impulsos de tensão, constituintes de ondas de tensão na composição, descendente e ascendente;
- d) os pontos **D** e **F** correspondem à superposição de impulsos de tensão de três ondas, a saber: onda de tensão incidente (compressão), de reflexão na cabeça do amostrador e finalmente aquela de reflexão junto do amostrador/solo; e
- e) há a perda de contato do martelo com a cabeça de bater num tempo correspondente entre aqueles representados pelos pontos **D** e **F**, segundo Schmertmann e Palacios(1979).

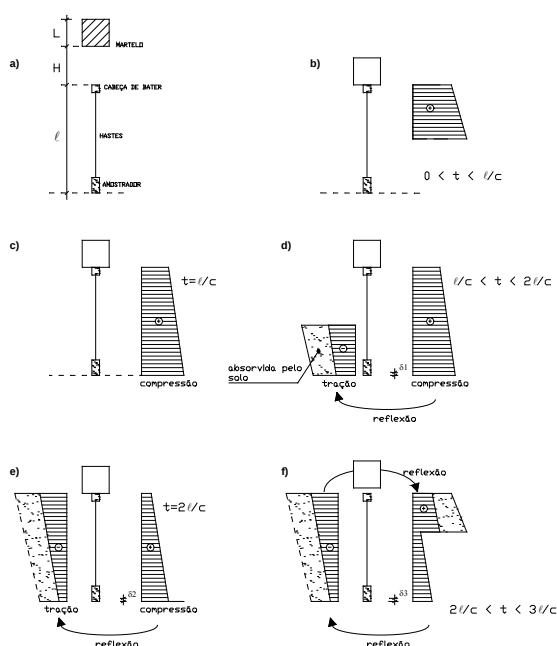


Figura 1. Esquema simplificado de propagação de ondas de tensão no SPT. Palacios(1977), apud Belincanta *et al.* (1994)

Neste registro, Figura 2, oriundo de SPT realizado com equipamento e metodologia propostos pela norma brasileira NBR6484 e obtido com célula elétrica de carga, instalada em aproximadamente 30cm abaixo da cabeça de bater, nota-se que há a presença de reflexões, de baixa intensidade e provavelmente provenientes das

conexões das hastes. Há também reflexões muito pronunciadas, como aquela na região do ponto **D**, sendo estas últimas devidas à mudança de rigidez (impedância) do amostrador.

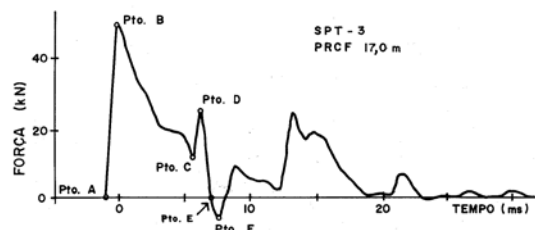


Figura 2. Registro típico de força seccional em função do tempo, obtido através de célula de carga elétrica. Belincanta (1998)

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

O impacto do martelo, como já notificado anteriormente, é simulado pelo impacto de um peso cilíndrico em uma barra de comprimento finito, ambos constituídos de mesmo material elástico linear, sendo esquematicamente representados na Figura 3, inclusive com simbologia e dados pertinentes. Nesta simulação desconsidera-se a existência tanto do coxim de madeira na extremidade inferior do martelo quanto da cabeça de bater na extremidade superior da composição de hastes, mas se considera nas seções de contato do martelo com as hastes o que 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.

Antes de se partir para a determinação da equação matemática que expressa a força seccional em função do tempo, é importante que se faça a distinção entre velocidade (**c**) de propagação de impulsos de tensão e a velocidade de partícula (**v**), sendo esta última correspondente à velocidade com que determinada partícula das hastes está animada, quando sujeita às tensões provenientes da passagem de um determinado impulso de tensão. A velocidade de partícula corresponde também à velocidade de deformação daquele ponto, sujeito aos esforços provenientes do impulso de tensão.

A velocidade de partícula (**v**) é compatível com o nível de tensão do impulso (σ) e depende das características do meio elástico-linear, isto é, do módulo de elasticidade (**E**) e da velocidade de propagação (**c**), sendo expressa como se segue, em conformidade ao esquema da Figura 4.

$$v = du/dt = \sigma \cdot c/E = F \cdot c / E \cdot a = F/Z_h \quad (1)$$

Onde, (σ) e (F) são tensão e força seccional respectivamente, provenientes de impulso de tensão, enquanto (a) e (Z_h) são respectivamente seção transversal e impedância das hastes ($Z_h = E \cdot a / c$).

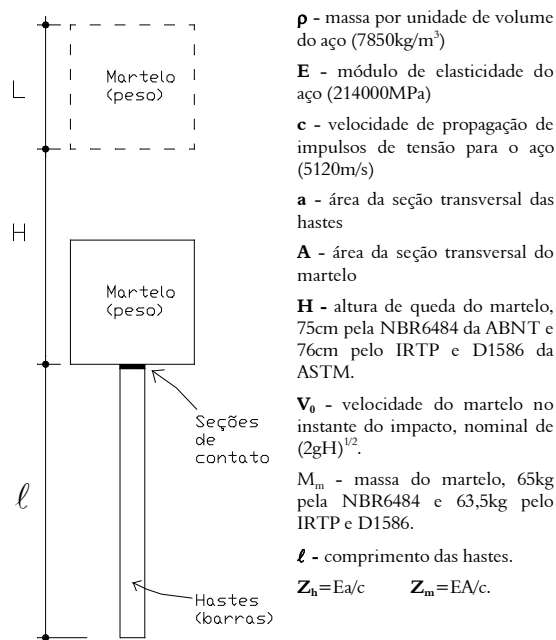


Figura 3. Representação esquemática do impacto do martelo

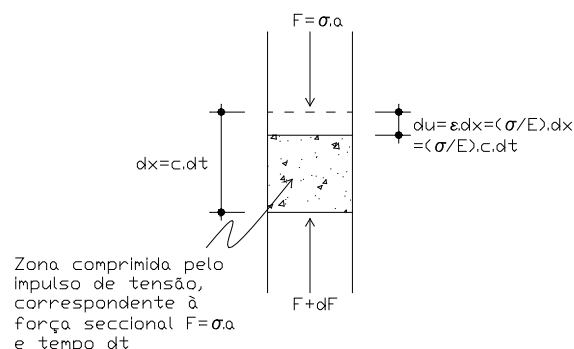


Figura 4. Representação esquemática da passagem de um impulso de tensão nas hastes

A velocidade (c) de propagação dos impulsos de tensão depende tão somente do meio, isto é, do material com que é feito, neste caso, do material das hastes, sendo expressa por:

$$c = \sqrt{E / \rho} \quad (2)$$

Onde, (E) é módulo de elasticidade, relativo às solicitações dinâmica; e (ρ) é a massa específica das

hastes. (ρ) (corresponde à relação entre o peso específico do material das hastes (g) e a aceleração da gravidade (g) , isto é: $(\rho = g/g)$).

Desta maneira fica estabelecida, pela equação 1, a relação biunívoca entre velocidade de partícula e a tensão ou força seccional, sendo que a velocidade de partícula (v) é de mesmo sentido da propagação dos impulsos de tensão, quando estes forem de compressão, e de sentido contrário, quando os mesmos forem de tração.

Quando o martelo, que se encontra com a velocidade de queda (V_0) , choca-se com o topo das hastes, uma vez que foi desconsiderada a existência da cabeça de bater na extremidade superior da composição, 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 força e compatibilidade de deslocamentos e de velocidades, aplicados às seções de contato, tem-se nesta condição inicial para força seccional incidente nas hastes (F_{h0}) , no intervalo de tempo de zero a $(2L/c)$, onde (L) é o comprimento ou altura do martelo, o que se segue.

$$F_{h0} = V_0 \cdot Z_m \cdot Z_h / (Z_m + Z_h) \quad (3)$$

Sendo (Z_m) e (Z_h) iguais respectivamente a (EA/c) e a (Ea/c) , onde (E) é o módulo de elasticidade, (c) é a velocidade de propagação dos impulsos de tensão, enquanto (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:

$$F_{h1} = [V_0 \cdot Z_m \cdot Z_h / (Z_m + Z_h)] [(Z_m - Z_h) / (Z_m + Z_h)] \quad (4)$$

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

$$F_{h2} = [V_0 \cdot Z_m \cdot Z_h / (Z_m + Z_h)] [(Z_m - Z_h) / (Z_m + Z_h)]^2 \quad (5)$$

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

$$F_{hn} = [V_0 \cdot Z_m \cdot Z_h / (Z_m + Z_h)] [(Z_m - Z_h) / (Z_m + Z_h)]^n \quad (6),$$

sendo (**n**) um número inteiro e uma função do tempo (**t**) decorrido após o impacto do martelo, determinado pela expressão abaixo.

$$2nL/c \leq t \leq 2(n+1)L/c \quad (7)$$

As funções matemáticas anteriores 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, com durações iguais a ($2L/c$), sendo os mesmos decrescentes na intensidade com o tempo.

Na expressão (6) anterior, 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 sessões transversais, respectivamente das hastes e do martelo; 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 o que se segue.

$$F_{ht} = \frac{V_0 \cdot \rho \cdot c \cdot a}{1+r} \left(\frac{1-r}{1+r} \right)^{t \cdot c / 2L} \quad (8)$$

Para a condição em que a área da sessão transversal do martelo é muito maior que a área da sessão transversal das hastes, isto é, (**r**) tendendo a zero, a expressão matemática acima, segundo Fairhurst (apud Schmertmann e Palacios, 1979) torna-se:

$$F_{ht} = V_0 \cdot \rho \cdot c \cdot a \cdot \exp(-a \cdot \rho \cdot c \cdot t / M_m) \quad (9)$$

Onde (**F_{ht}**) é a força seccional nas hastes no tempo (**t**); (**V₀**), 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.

Determinação da energia transferida às hastes

A energia dinâmica contida numa onda de tensão, segundo a teoria, é composta de duas partes iguais: uma correspondente à energia armazenada na deformação elástica e a outra cinética, proveniente da velocidade (**v**) com que as partículas estão animadas.

A teoria ainda indica que a energia dinâmica incidente, até o tempo (**t**), pode ser calculada pelo uso da força seccional incidente nas hastes em função do tempo ou também pelo uso da força seccional e velocidade de partícula, de acordo com as expressões:

$$E_{it} = \frac{c}{E \cdot a} \int_0^t F^2 dt \quad (10)$$

$$E_{it} = \int_0^t F \cdot v \cdot dt \quad (11)$$

Cálculo teórico da energia incidente nas hastes, tomando como base Schmertmann/Palacios. Associando-se as expressões 6 e 10, 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 que se segue, conhecida como expressão de Schmertmann/Palacios.

$$E_{it} = \frac{2V_0^2 \cdot E \cdot a \cdot L}{c^2} \left[\frac{(1-K^n)}{4r} + \left(\frac{tc}{2L} - n \right) \frac{K^n}{(1+r)^2} \right] \quad (12)$$

onde, (**L**) é comprimento do martelo; (**c**), velocidade de propagação dos impulsos de tensão; (**a**), área de seção transversal das hastes; (**E**), módulo de elasticidade; (**V₀**), 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 e obtido segundo a expressão 7.

Cálculo teórico da energia incidente nas hastes, tomando como base Fairhurst. Associando-se as expressões 9 e 10, tem-se a expressão a seguir de Fairhurst para o cálculo da energia dinâmica incidente nas hastes no intervalo de tempo de zero a (**t**).

$$E_{it} = \frac{M_m V_0^2}{2} [1 - \exp(-2apct/M_m)] \quad (13)$$

Eficiência teórica da energia incidente nas hastes

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, com referência à $E_{\text{nominal}} = M_m g H = 1/2 M_m V_0^2$, pode ser determinada pela expressão de Schmertmann/Palacios ou por aquela de Fairhurst, que são oriundas das expressões 12 e 13, respectivamente.

$$\eta_{\text{Schmertmann / palacios}} = \left[(1 - K^n) + 4r \left(\frac{ct}{2L} - n \right) \frac{K^n}{(1+r)^2} \right] \quad (14)$$

$$\eta_{\text{fairhurst}} = \left[1 - \exp \left(-2apct / M_m \right) \right] \quad (15)$$

A transferência de energia referente à primeira onda de compressão incidente é interrompida, segundo Schmertmann e Palacios (1979), 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 ($2L/c$), quando o martelo perde momentaneamente o contato com as hastes.

Considerando-se este tempo ($t=2L/c$) nas expressões 14 e 15, 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 motivos abaixo.

- existência de coxim de madeira e cabeça de bater;
- imperfeições no impacto;
- decorrência de tempo entre o instante do impacto e a força seccional máxima alcançada; e
- existência de impulsos de tensão refletidos antes da chegada das reflexões provenientes da região do amostrador.

Desta maneira, toda a 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 teóricos de eficiências.

Instrumentação de uso corrente

Existem basicamente três metodologias, de uso corrente, para a determinação da energia dinâmica contida na onda de tensão incidente nas hastes, em conformidade com a instrumentação utilizada, a saber:

- a) uma célula de carga elétrica (transdutor de força), instalada junto da extremidade superior da composição de hastes, registrando a força seccional (F_{reg}) em função do tempo;
- b) uma célula de carga elétrica (ou transdutores de força) e acelerômetros, instalados junto à extremidade superior da composição, obtendo-se a força seccional (F_{reg}) e velocidade de partícula (v_{reg}) em função do tempo; e
- c) duas células de carga elétricas (transdutores de força ou de deformação) instaladas em duas seções situadas junto à extremidade superior da composição, obtendo-se duas curvas de deformação em função do tempo, $\epsilon_1(x_1, t)$ e $\epsilon_2(x_2, t)$

Através da primeira metodologia é possível se calcular tão somente a energia com referência à primeira onda de compressão incidente, isto é, a energia contida até o tempo máximo de $t = 2L/c$, utilizando-se para isto a expressão matemática contida na equação 10. A energia assim calculada corresponde à realidade somente quando da inexistência de reflexões, a não ser aquelas existentes a partir do tempo ($2L/c$), quando começam a parecer na extremidade superior das hastes as reflexões oriundas da região do amostrador. Caso existam reflexões, a força seccional referente à onda de tensão incidente, registrada pela célula elétrica, estará majorada de igual intensidade da reflexão, quando as reflexões forem constituídas de impulsos de compressão ou minoradas, quando as reflexões forem de impulsos de tração, sendo tudo isto simplesmente resultado da superposição dos efeitos. Desta maneira a energia calculada referente à onda de tensão incidente estará majorada ou reduzida conforme as reflexões forem da forma de impulsos de compressão ou de tração.

A segunda metodologia, que se constitui dos registros de força seccional (F_{reg}) e velocidade de partícula (v_{reg}) em função do tempo, apresenta muito mais recurso ao cálculo da energia dinâmica incidente, porém os acelerômetros devem ser projetados com a devida sensibilidade para o registro das acelerações que tomam lugar na seção instrumentada, que se encontra junto à extremidade superior da composição. É importante salientar que no cálculo da energia através da equação 11, considera-se tão somente a energia líquida

transferida à composição das hastes, isto é, a energia contida nas reflexões ascendentes que alcançam a seção instrumentada é descontada daquela que se encontra em incidência, permitindo com isto que se calcule realmente a energia transferida à composição de hastes, e que estará disponível à cravação do amostrador.

O instrumental de registro dos eventos dinâmicos, constituído inclusive dos “softwares”, são programados para registrar como valor positivo a força seccional (F_{reg}) de compressão ou como negativo se for de tração, enquanto a velocidade de partícula (v_{reg}) será positiva quando do sentido descendente e negativa quando do sentido ascendente. Em função desta convenção de sinais, pode-se calcular a força seccional em função do tempo descendente (incidente) (F_d) assim como ascendente (refletida) (F_a), separadamente, desde que se possuam os registros de força seccional (F_{reg}) e velocidade de partículas (v_{reg}), pelas expressões que se seguem:

Para força descendente:

$$F_d = (F_{reg} + v_{reg} \cdot E \cdot a / c) / 2$$

Para força ascendente:

$$F_a = (F_{reg} - v_{reg} \cdot E \cdot a / c) / 2$$

Com o conhecimento dos registros da força seccional em função do tempo, referentes aos impulsos de tensão descendentes e ascendentes, isto é, (F_d) e (F_a), pode-se calcular, entre outras grandezas, a energia absorvida pelo amostrador em cada ciclo de onda de tensão incidente, correspondente portanto a cada período de tempo de ($2\ell/c$).

Na Figura 5, são apresentados os registros de força seccional (F_{reg}) e ($v_{reg} \cdot E \cdot a / c$), em função do tempo, observando-se que, até o ponto C, há propriamente uma plena proporcionalidade entre (F_{reg}) e ($v_{reg} \cdot E \cdot a / c$) em função do tempo, portanto não sendo estes registros afetados por impulsos refletidos e ascendentes.

A partir do ponto C, perde-se a proporcionalidade entre a força e a velocidade de partículas, devido à surgência, na seção de medida, das reflexões oriundas da cabeça do amostrador e posteriormente também aquelas da interface amostrador/solo. Desta maneira pode-se dizer, ainda mais, que os registros de força e velocidade de partícula, a partir do ponto C, se constituem da superposição de impulsos de tensão ascendentes e

descendentes, oriundos de reflexões da região do amostrador, da extremidade superior da composição e, conforme o caso, também da transferência da energia remanescente do martelo. Todavia é importante salientar que, com os registros de força seccional e velocidade de partícula em uma seção instrumentada, pode-se determinar a força seccional ascendente ou descendente em função do tempo, inclusive referente a qualquer outra seção da composição das hastes, de interesse.

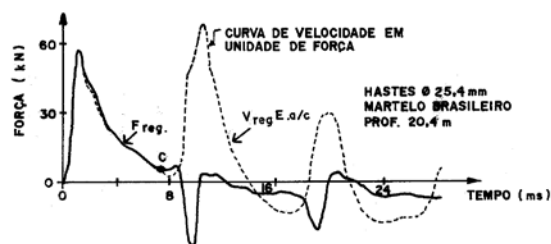


Figura 5. Registros típicos de força e velocidade de partícula em função do tempo, em ensaio SPT. Belincanta (1985)

A terceira metodologia, constituída de duas células elétricas de carga instaladas em duas seções próximas da extremidade superior da composição, é conhecida por “Two Point Strain Measurements-TPSM”, Matsumoto *et al.* (1992).

As curvas de deformação da seção instrumentada 1, referente à onda de tensão descendente $\varepsilon_d(x_1, t)$ bem como aquela referente à onda de tensão ascendente $\varepsilon_a(x_1, t)$, são determinadas pelas expressões que se seguem, considerando-se a inexistência de impulsos de tensão ascendentes nos instantes iniciais:

$$\varepsilon_d(x_1, t) = \varepsilon_1(x_1, t) - \varepsilon_2(x_2, t-T) + \varepsilon_d(x_1, t-2T)$$

$$\varepsilon_a(x_1, t) = \varepsilon_1(x_1, t) - \varepsilon_d(x_1, t)$$

Onde, $\varepsilon_1(x_1, t)$ é a deformação em função do tempo, registrada na seção instrumentada 1; $\varepsilon_2(x_2, t-T)$ é a deformação em função do tempo ($t-T$), registrada na seção instrumentada 2; $\varepsilon_d(x_1, t-2T)$ é a deformação em função do tempo ($t-2T$), na seção instrumentada 1, referente à onda de tensão descendente e, por fim, (T) é o tempo necessário ao percurso dos impulsos de tensão entre as duas seções instrumentadas, isto é, ($T = \Delta/c$), onde (Δ) é a distância entre as duas seções.

Tendo-se $\varepsilon_1(x_1, t)$, $\varepsilon_d(x_1, t)$ e $\varepsilon_a(x_1, t)$, facilmente se calculam a força e a velocidade de partícula em função do tempo, referentes à seção instrumentada 1, isto é,

$F_{reg} = a.E.(\epsilon_1(x_1,t))$ e $v_{reg} = c(\epsilon_d(x_1,t) - \epsilon_a(x_1,t))$ e, portanto, também a energia pela expressão matemática 11, anteriormente apresentada.

Matsumoto *et al.* (1992), visando à convergência dos valores, propõem um procedimento de correção nos registros de deformação em função do tempo, tomando como base, ao final do registro, a velocidade e o deslocamento da seção instrumentada. Este procedimento de correção não será abordado.

Sistema de registro de eventos dinâmicos no SPT e de cálculo da respectiva energia transferida à composição de hastes

Serão aqui apresentados dois sistemas portáteis, de uso corrente, utilizados no registro de eventos dinâmicos no SPT, inclusive com a metodologia de cálculo da energia dinâmica incidente na composição de hastes.

Sistema portátil de aquisição de dados no campo e de análise posterior em escritório, com uso somente de uma célula elétrica de carga. O IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) tem em passado recente, desenvolvido um sistema para registro de eventos dinâmicos no SPT, constituído de:

- Transdutor de força, o qual se compõe de célula de carga elétrica confeccionada em aço especial, na configuração e no porte das hastes da composição preconizadas pela norma brasileira NBR6484, isto é, hastes de diâmetro externo de 33mm e interna de 24mm, com massa de 3,23kg/m. A célula elétrica é montada com quatro extensômetros elétricos (strain gages), ligados em ponte de “Wheatstone” completa;
- Módulo de tratamento e condicionamento de sinais, constituído de fonte de alimentação dos sensores da célula elétrica, amplificadores de sinais de saída e unidade de filtro;
- Placa conversora A/D, constituindo-se de uma seção de processamento analógico, um conversor analógico/digital e um sistema de controle e interface para o microcomputador;
- microcomputador;
- “Softwares” aplicativos que permitem, além da aquisição de dados de campo, sinais amostrados e relativos a golpes do martelo, também o armazenamento em arquivos e posterior análise destes sinais, permitindo inclusive o cálculo da energia dinâmica incidente através da equação 10, anteriormente apresentada e discutida.

A célula de carga, após a sua confecção é aferida através de cargas estáticas, aplicadas por prensa hidráulica. Apresenta-se a seguir na Figura 6, na forma esquemática, o sistema de aquisição de dados portátil do tipo IPT, constituído de uma célula de carga elétrica a ser instalada junto à extremidade superior da composição, como também se apresenta a célula de carga elétrica na foto 1, quando de sua montagem em prensa hidráulica para aferição.

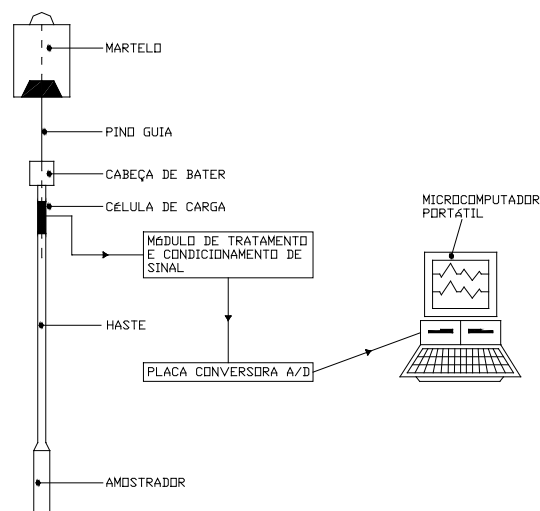


Figura 6. Sistema de aquisição de dados do tipo IPT

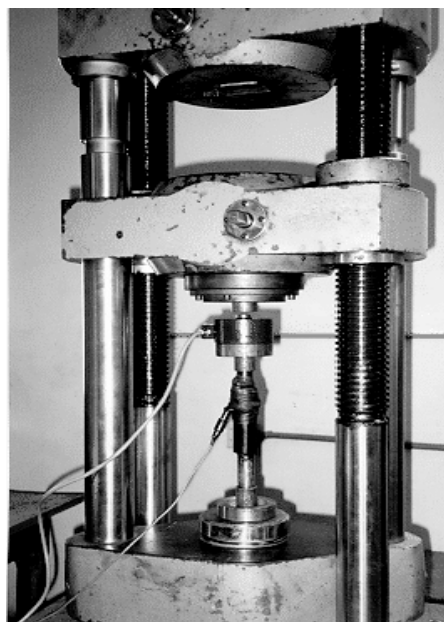


Foto 1. Aferição de célula elétrica na prensa universal da UEM

Sistema portátil de aquisição de dados no campo e de análise posterior em escritório, com uso de célula de carga elétrica (transdutor de força) e de acelerômetros. Com as novas gerações de acelerômetros, desenvolvidos com

sensibilidade necessária e suficiente ao registro de eventos dinâmicos no SPT, há disponível no mercado internacional equipamento portátil (como os fornecidos pela PDI, Pile Dynamics Inc.), constituído de transdutor de força e de acelerômetros, que permite o registro da força seccional (F_{reg}) e a velocidade de partículas (v_{reg}) em função do tempo, sendo que (v_{reg}) resulta da integração do registro da aceleração no tempo. Este sistema permite a determinação da energia incidente líquida, realmente transferida às hastes durante o evento dinâmico que toma lugar em cada golpe do SPT, como um todo. Portanto, na determinação da energia dinâmica incidente, se utiliza a equação 11, anteriormente apresentada e discutida.

Considerações gerais

A magnitude da energia que é transferida à composição das hastes e que alcança o amostrador é somente um dos fatores que interferem na cravabilidade do amostrador do SPT, entre uma série de outros fatores, como por exemplo, a própria forma pela qual esta energia é transmitida no tempo que, por sua vez, depende do tipo do martelo, da massa da cabeça de bater e tipo das hastes da composição.

No meio técnico internacional, a energia incidente transferida às hastes é relacionada com a energia-padrão de cada golpe, isto é, a energia-padrão de um peso de 140lb (63,5kg) caindo de 30" (76,2cm), correspondente portanto a 475J. Em função disto a energia incidente nas hastes é tratada como eficiência, resultante da expressão que se segue: $\eta = 100E_i/E_*$, onde (η) é a eficiência de energia no SPT, em porcentagem; (E_i), é a energia incidente, transferida às hastes e (E_*), é a energia nominal padrão de 475J. Por muito tempo, entendeu-se como energia incidente E_i aquela correspondente à primeira onda de compressão incidente, isto é, a energia transferida às hastes até o tempo ($2l/c$), sendo que esta energia é dependente do comprimento (l) da composição. Em função disto, sempre se procurou calcular a energia (E_i) com referência à composição de comprimento infinito, demandando fatores teóricos de correção, como aqueles normatizados pela norma da ASTM, D4633/86. Estes fatores teóricos, utilizados na estimativa da energia para composição de comprimento infinito, têm sido internacionalmente muito criticados. Desta maneira, toda a estimativa de energia dinâmica transferida às hastes na primeira onda de compressão incidente, referente a uma composição de comprimento (l), partindo da

energia calculada em uma composição de menor comprimento, quando da utilização tão e somente de célula elétrica carga, está fadada a ser grosseira, se for feita com base em fatores provenientes de eficiências teóricas. Neste caso pode-se adotar como alternativa o procedimento 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 7, calculando-se também as eficiências correspondentes às energias assim extrapoladas;
- faz-se o melhor ajuste da curva do tipo exponencial, $\eta = A + B \exp(Cl')$, aos dados de eficiências de energias dinâmicas incidentes extrapoladas, Figura 8; 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.

É bom ainda lembrar que, com somente célula elétrica de carga, o cálculo de energia dinâmica transferida às hastes só faz sentido quando da não existência de reflexões antes do tempo ($2l/c$). Caso as mesmas existam as energias calculadas ficam plenamente comprometidas, apesar de existirem alguns indicadores de que esta diferença dentro da normalidade é da ordem de 10% (Belincanta, 1985 e Buttler *et al.*, 1998).

Com o desenvolvimento dos acelerômetros, um instrumental mais completo (transdutores de força e acelerômetros), importado e adaptado às condições do SPT brasileiro, vem tomando lugar no registro dos eventos dinâmicos do SPT, permitindo, através do emprego da curva de força seccional e de velocidade de partículas em função do tempo, o entendimento mais amplo do evento dinâmico do SPT. Isso também permite o cálculo da energia dinâmica incidente nas hastes, correspondente à composição de comprimento longo, sem a necessidade de qualquer outro artifício ou mesmo de coeficientes teóricos de correção. Esta energia assim calculada vem, cada vez mais, sendo utilizada como parâmetro básico de comparações e aferições de equipamentos de SPT. Cumpre por fim deixar claro que a magnitude da energia contida em um golpe do martelo, que é realmente transferida às hastes da composição, é um dos fatores tidos como de muita importância, que interferem na

cravabilidade do amostrador, portanto com influência no índice de resistência à penetração N .

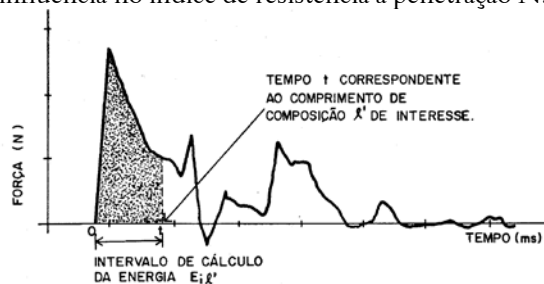


Figura 7. Registro típico de força em função do tempo e representação esquemática do intervalo de cálculo de energia incidente, para comprimento l' de interesse

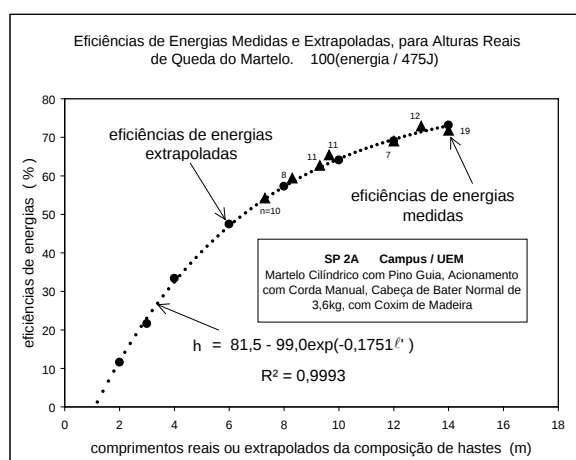


Figura 8. Exemplo de eficiências de energias medidas e extrapolada na UEM. Belincanta, 1998

Referências bibliográficas

- American Society for Testing and Materials - ASTM. Stress wave energy measurement for dynamic penetrometer testing systems. 1986. D4633.
- Belincanta, A. *Energia dinâmica no SPT, resultados de uma investigação teórico experimental*. São Paulo, 1985. (Master's Thesis) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Belincanta, A. *Avaliação de fatores intervenientes no índice de resistência à penetração do SPT*. São Carlos, 1998. (Doctoral Thesis) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Belincanta, A.; Alvim, F.M.; Navajas, S.; Ramires Sobrinho, R. Métodos para medida de energia dinâmica no SPT. *Solos e Rochas*, 17(2):93-110, 1994.
- Belincanta, A.; Dionisi, A.; Machado, J.R.A.; Alvim, F.M.; Ramires Sobrinho, R.; Navajas, S.; Tachibana, L.S. Medidas de energia dinâmica no SPT, sistema IPT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 10., 1994, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu: ABMS, 1994. v.2, p.507-514.
- Butler, J.J.; Caliendo, J. A.; Goble, G.G. Comparison of SPT energy measurement methods. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SITE CHARACTERIZATION, ISC'98, 1998, Atlanta. *Proceeding...* Atlanta: Robertson & Mayne, 1998. v.2, p.901-906.
- Farrar, J.A. Summary of Standard Penetration Test (SPT) energy measurement experience. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SITE CHACACTERIZATION, ISC'98, 1998, Atlanta. *Proceeding...* Atlanta: Robertson & Mayne, 1998. v.2, p.919-926.
- Goble, G. SPT improvements. Cleveland: GLR, 1996. GRL, n. 27.
- Graff, H.J.; Heuvel, M.H.J.P. Determination of the penetration energy in the Standard Penetration Test. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF STRESS-WAVE THEORY TO PILES, 4., 1992, Netherlands. *Proceedings...* Netherlands, 1992. p.99-103.
- Isopt. Technical committee on penetration testing of soils. Report on Reference Test Procedure. In: ISOPT, 1., 1988, Orlando. *Proceedings...* Orlando: De Rulter, 1988. v.1, p.3-25.
- Issmfe. Technical Committee on Penetration Testing of Soils, TC 16. Report on Reference Test Procedure CPT-SPT-DP-WST. In: ICSMFE, 12., 1989, Rio de Janeiro. *Proceedings...* Rio de Janeiro, 1989.
- Kovacs, W.D.; Evans, S.C.; Griffith, A.L. Towards a more standardized SPT. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1977, Tokyo. *Proceedings...* Tokyo, 1977. v.2, p.269-276.
- Kovacs, W.D.; Salomone, L.A. SPT hammer energy measurements. *J. Geotechn. Engin. Divis., ASCE*, 108(4):599-620, 1982.
- Matsumoto, T.; Sekiguchi, H.; Yoshida, H.; Kita, K. Significance of two point strain measurement in SPT. *Soil and Foundation*, JSSMFE, 32(2):67-82, 1992.
- Morgano, C.M.; Liang, R. Energy transfer in SPT-rod length effect. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF STRESS - WAVE THEORY TO PILES, 4., 1992, Netherlands. *Proceedings....* Netherlands, v. 1, p.121-127.
- Palacios, A. *The theory and measurement of energy transfer during standard penetration test sampling*. Florida, 1977. (Doctoral Thesis in Philosophy) - University of Florida.
- Schmertmann, J.H.; Palacios, A. Energy dynamics of SPT. *J. Soil Mech. Foundat. Divis., ASCE*, 105(8):909-926, 1979.
- Yokel, F.Y. Energy transfer mechanism in SPT. *J. Geotechn. Engin., ASCE*, 115(9):1331-1336, 1989.

Received on August 07, 2000.

Accepted on November 23, 2000.