

Estudo teórico-experimental da propagação de ondas na haste de sondagem do ensaio SPT

Marcelo Maia Rocha,¹ Edgar Odebrecht², Fernando Schnaid³

Trabalho recebido em 01/09/2004 e aprovado para publicação em 01/11/2004.

Resumo

O ensaio de sondagem SPT (*Standard Penetration Test*) é sem dúvida o sistema de sondagem mais utilizado no Brasil e no mundo pela engenharia geotécnica e de fundações. A sua simplicidade e robustez, aliadas ao baixo custo do equipamento e à experiência empírica acumulada na sua execução e interpretação, fazem deste teste uma ferramenta indispensável à prática de engenharia. Contudo, o ensaio tem sido objeto freqüente de críticas, que abrangem aspectos relacionados à dispersão de resultados, dependência do operador e diversidade de equipamentos e procedimentos. Esta falta de uniformidade tem como principal consequência uma variabilidade significativa da energia que de fato chega ao solo na extremidade do amostrador, responsável pela sua ruptura e consequentemente correlacionada aos resultados do ensaio. O presente trabalho é parte de uma investigação experimental mais ampla, na qual foi realizada a monitoração de energia durante a cravação do amostrador no ensaio SPT, bem como da identificação dos fatores que influenciam sua medição. Além desse trabalho experimental, um modelo numérico do SPT também foi desenvolvido, que por sua vez é o tema central deste trabalho. O modelo consiste em um esquema de discretização para o sistema completo (martelo, hastes, amostrador e solo), no qual as equações de equilíbrio dinâmico são resolvidas por meio de diferenças finitas. No ponto de contato entre martelo e haste são impostas condições de contorno especiais, de forma a assegurar a compatibilidade de deslocamentos durante o impacto do martelo. O solo imediatamente abaixo do amostrador é representado pelo modelo de Smith. Os resultados das simulações indicam que a energia medida no tempo, em diversos pontos da haste e no solo, depende de fatores usualmente não considerados, tais como o repique do martelo e o comprimento da haste, bem como da própria penetração do amostrador, que pode representar um acréscimo significativo no valor padrão da energia potencial inicial do sistema. Estes resultados numéricos são finalmente comparados com observações experimentais.

¹ Prof. Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, LDEC/PPGEC, Av. Osvaldo Aranha, 99/307, 90035-190, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: mmrocha@ppgec.ufrgs.br.

² Prof. Dr. Universidade do Estado de Santa Catarina, Geoforma Engenharia Ltda, Joinville, SC, Brasil. E-mail: geoforma@terra.com.br.

³ Prof. Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, LEGG/PPGEC, Av. Osvaldo Aranha, 99/307, 90035-190, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: schnaid@quattrum.com.br.

1. Introdução

O SPT (*Standard Penetration Test*) é sem dúvida o sistema de sondagem mais utilizado no Brasil e no mundo pela engenharia geotécnica e de fundações. A sua simplicidade e robustez, aliadas ao baixo custo do equipamento e à experiência empírica acumulada na sua execução e interpretação, fazem deste teste uma ferramenta indispensável à prática de engenharia. Contudo, o ensaio tem sido objeto freqüente de críticas, que abrangem aspectos relacionados à dispersão de resultados, dependência do operador e diversidade de equipamentos e procedimentos. Esta falta de uniformidade tem como principal consequência uma variabilidade significativa da energia que de fato chega ao solo na extremidade do amostrador, responsável pela sua ruptura e conseqüentemente correlacionada aos resultados do ensaio.

O presente trabalho é parte de uma investigação mais ampla (Odebrecht 2003), incluindo um programa experimental, na qual foi monitorada a energia durante a cravação do amostrador no ensaio SPT, com o objetivo de identificar os fatores que mais afetam as medições do N_{SPT} . No programa experimental foi estudada a influência do comprimento da haste de sondagem, bem como da própria resistência do solo, na energia que de fato chega ao amostrador e é utilizada no processo de cravação.

Além desse trabalho experimental, um modelo numérico do SPT também foi desenvolvido, que por sua vez é o tema central deste trabalho. Através de simulações numéricas com o programa é possível avaliar a evolução das distintas energias (cinética, potencial, potencial elástica, de ruptura, etc.) ao longo do tempo e compreender melhor a cravação do amostrador no solo. Os resultados destas simulações são confrontados com medições reais da deformação e da aceleração em pontos criteriosamente escolhidos da haste de sondagem. Assim, ao mesmo tempo em que se verifica a validade dos resultados numéricos, é possível obter-se uma corroboração teórica para fatos relevantes que foram observados experimentalmente.

2. Breve descrição do estudo experimental

Para a determinação da energia que passa por um ponto da haste de sondagem recomenda-se uma instrumentação composta por uma célula de carga e um par de acelerômetros (Farrar 1988; Butler et al. 1998). Esta instrumentação registra a passagem da onda longitudinal (também denominada onda P) gerada pela ação de um golpe do martelo. Através da integração do produto da força (sinal da célula de carga) pela velocidade (integração do sinal do acelerômetro) ao longo do tempo, determina-se a energia contida nessa onda. A ener-

gia é utilizada na correção do valor do N_{SPT} para o valor de energia de referência internacional (N_{60}). Em Odebrecht (2003) apresenta-se um estudo detalhado da monitoração da energia produzida durante a cravação do amostrador no ensaio SPT, bem como da identificação dos fatores que influenciam estas medidas. Para tanto foi desenvolvido um equipamento para a aquisição dos sinais de força e de aceleração com o objetivo de se determinar a energia efetivamente transferida às hastes.

Este equipamento consta de uma célula de carga, um par de acelerômetros, amplificadores e condicionadores de sinais de força e aceleração, sistema de aquisição de sinal e tratamento numérico dos registros. Detalhes dos transdutores são mostrados na Figura 1. Utilizando-se esse sistema de instrumentação efetuou-se uma extensa campanha de ensaios controlados em câmara de calibração, para a qual foram utilizados dois poços de elevador de edifícios em construção, conforme o esquema apresentado na Figura 2. Os resultados da campanha experimental, associados aos fundamentos e princípios da física e dinâmica, permitiram uma análise racional do ensaio e a proposta de novos critérios de interpretação. Estes novos critérios visam não somente a determinação da energia contida na onda que percorre a haste, gerada pela ação do golpe, mas também a determinação da energia efetivamente transferida ao solo pela cravação do amostrador.

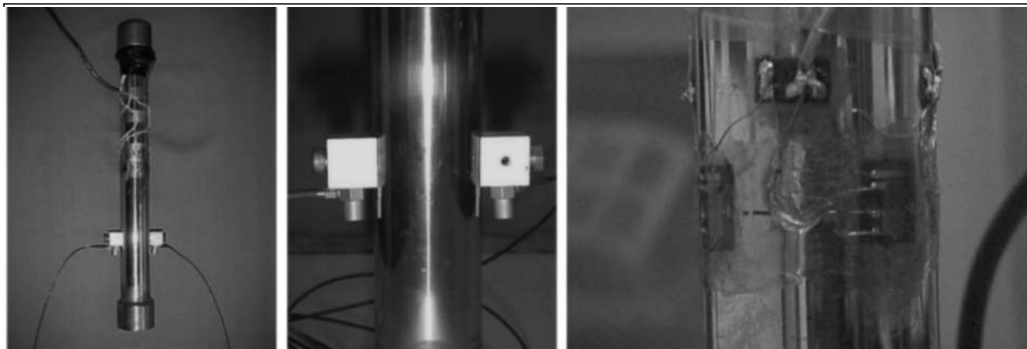


Foto 1A: Célula de Carga Foto 1B: Detalhe de fixação dos acelerômetros Foto 1C: Detalhe dos extensômetros

Figura 1: Célula de carga com detalhes dos extensômetros e dos acelerômetros.

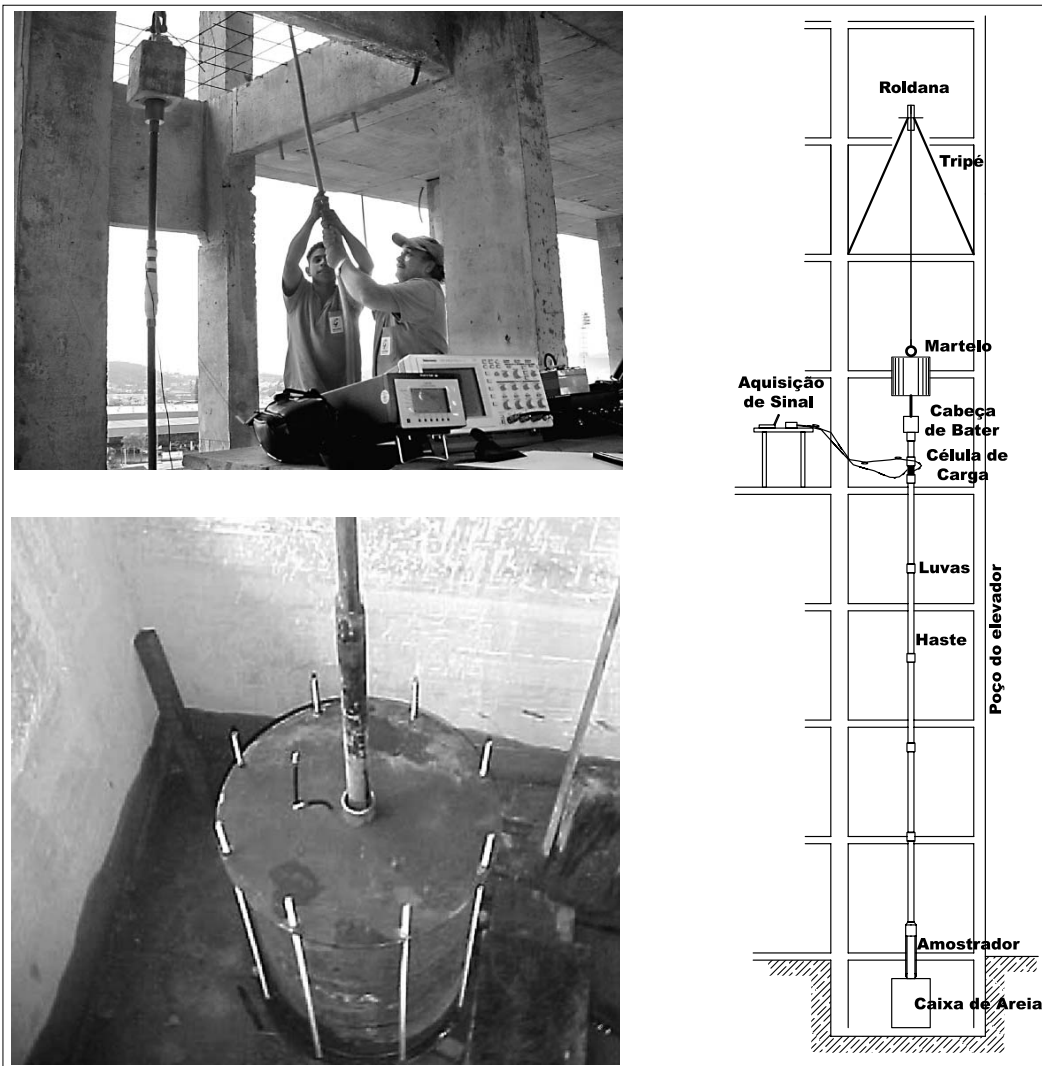


Figura 2 – Detalhes de montagem e realização dos ensaios.

3. Modelo numérico do ensaio SPT

O modelo numérico que se descreve a seguir, tema central do presente trabalho, foi utilizado ao longo dos estudos experimentais como um guia para uma melhor interpretação dos resultados. Através de simulações numéricas para diversos comprimentos de hastes e diferentes resistências do solo na ponta do amostrador, é possível corroborar e melhor compreender os efeitos observados nos ensaios realizados.

O modelo consiste em um esquema de discretização para o sistema completo (martelo, hastes, amostrador e solo) como ilustrado na Figura 3a, no qual as equações de equilíbrio dinâmico são resolvidas por meio de diferenças finitas e um esquema explícito de integração no tempo. O modelo numérico é unidimensional, com um grau de liberdade por nó. O martelo é representado como uma barra separada que se desloca ao longo do tempo, pela ação da gravidade, até atingir a haste de sondagem, dando início ao processo de cravação do amostrador. No ponto de contato entre martelo e haste são impostas condições de contorno especiais, de forma a assegurar a compatibilidade de deslocamentos durante o impacto do martelo. O material do martelo, das hastes e do amostrador é considerado elástico linear. A relação constitutiva do solo abaixo do amostrador é representada pelo modelo de Smith (1960).

O programa foi escrito em FORTRAN 90, uma vez que esta linguagem permite um processamento numérico mais eficiente. Observa-se que certos cuidados com o desempenho devem ser tomados, em face da alta demanda imposta pelo esquema de integração explícita.

No início da simulação atribui-se à barra que representa o martelo uma velocidade inicial. Essa condição faz com que, após alguns passos de integração, o ponto que define a extremidade inferior do martelo ultrapasse o ponto que define a extremidade superior da haste. Cada vez que essa condição ocorre, o programa calcula a posição média desses dois pontos e efetua uma correção. Também é determinada a quantidade de movimento dos pontos em choque para que as suas velocidades sejam consistentemente corrigidas. As deformações impostas no choque geram, tanto na extremidade inferior do martelo como na extremidade superior da haste, as forças que dão origem as ondas de pressão (*P-waves*) que percorrem a haste e o martelo, em sentidos opostos. Observa-se que o choque entre o martelo e a haste é, a princípio, considerado elástico perfeito, não sendo introduzido nenhum tipo de perda. Esta simplificação, embora sem influência expressiva nos resultados finais, poderá ser eventualmente removida uma vez que resultados experimentais forneçam subsídios para um critério adequado.

A extremidade inferior da haste, onde se encontra o amostrador, recebe uma força de reação do solo, R , conforme ilustrado na Figura 3b. Esta força pode ser determinada com base no modelo original de Smith (1960), onde as propriedades do solo são representadas pela sua resistência última, R_u , pela deformação elástica (ou *quake*), Q , e por um parâmetro de amortecimento, J . O modelo de Smith utilizado na presente metodologia tem sido ocasionalmente criticado. Modelos mais sofisticados estão disponíveis na literatura, sendo que alguns levam em consideração a dissipação da energia que é transmitida ao solo. Contudo, a sofisticação do modelo para o solo mostrou-se pouco relevante para os objetivos deste trabalho.

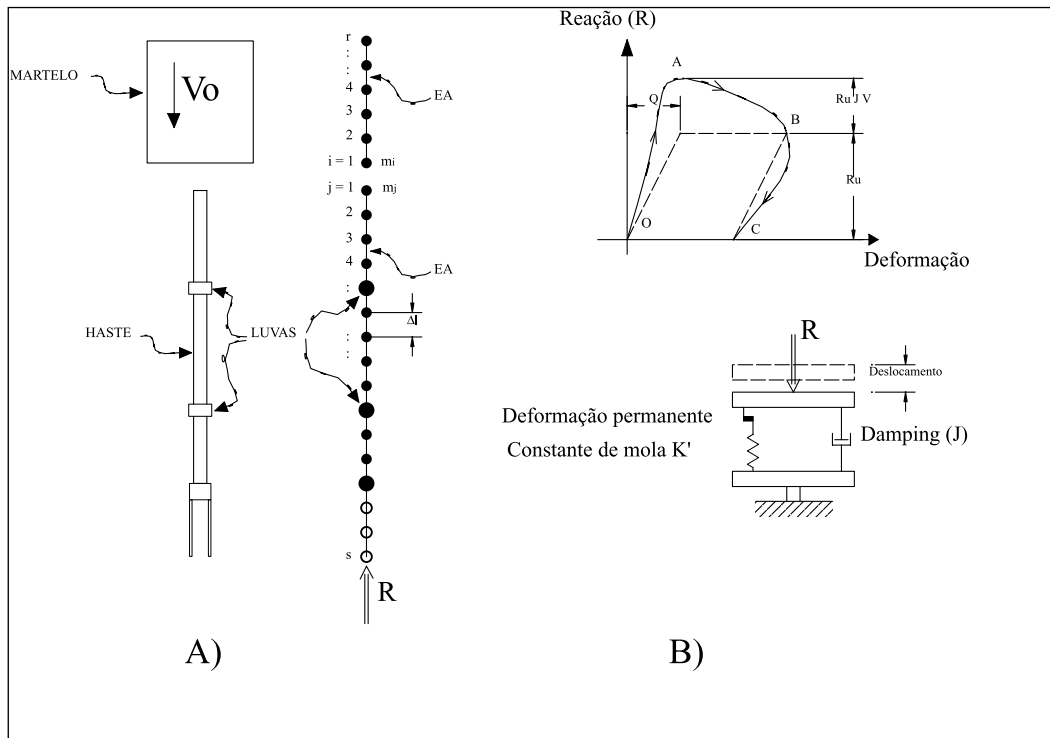


Figura 3: a) Discretização da haste e do martelo; b) modelo de Smith para o solo.

4. Aplicação do método de diferenças finitas

Nesta seção é apresentada a formulação do método de integração explícita por diferenças finitas utilizado. Seja um ponto de massa m sujeito a uma solicitação dinâmica, em um instante t qualquer. Aplicando-se o princípio de D'Alembert obtém-se a equação de equilíbrio dinâmico deste ponto:

$$f_i(t) + f_n(t) + f_s(t) = f(t) \quad (1)$$

onde $f_i(t)$ é a força inercial da massa, $f_n(t)$ é uma força dissipativa, $f_s(t)$ é uma força restitutiva, e $f(t)$ é uma força externa qualquer. Cada uma das forças representadas na parte esquerda da Equação 1, é função do deslocamento do ponto, $u(t)$, ou de suas derivada no tempo, $v(t) = du(t)/dt$ e $a(t) = d^2u(t)/dt^2$. Conforme a segunda lei de Newton, a força inercial, $f_i(t)$, é o produto da massa e da aceleração:

$$f_i(t) = ma(t) \quad (2)$$

A força dissipativa, $f_D(t)$, pode ser representada pelo produto de um coeficiente de amortecimento viscoso e da velocidade do ponto:

$$f_D(t) = cv(t) \quad (3)$$

A força restitutiva, $f_S(t)$, é determinada a partir da deformação de cada segmento de barra:

$$f_S(t) = EA\varepsilon = EA \frac{\Delta \ell}{\ell} = EA \left[\frac{L(t) - L_0}{L_0} \right] \quad (4)$$

onde E é o módulo de Young do material, A é a área da seção transversal, e $L(t)$ é o comprimento instantâneo do segmento, cujo comportamento é portanto considerado como sendo elástico linear.

Substituindo as Equações (2), (3) e (4) na Equação (1) chega-se a:

$$ma(t) + cv(t) = f(t) - EA \left(\frac{L - L_0}{L_0} \right) \quad (5)$$

A Equação (5) pode ser resolvida numericamente através de integração explícita por diferenças finitas. Para tanto, faz-se necessário discretizar a haste e o martelo em segmentos cujas massas, m_i , estão idealmente concentradas em pontos sucessivos, conforme indicado na Figura 3a.

Por conveniência de programação, a força elástica é determinada internamente a cada passo de integração. A velocidade da partícula pode ser obtida de uma expressão de diferenças centrais, cujo cálculo requer o controle da posição em três instantes de tempo sucessivos:

$$v_i = \frac{u_{3i} - u_{1i}}{2 \Delta t} \quad (6)$$

onde o sub-índice i refere-se ao número do ponto de discretização da haste (ver Figura 3a) e:

$$\begin{aligned} u_{3i} &= u_i(t + t), \\ u_{2i} &= u_i(t), \\ u_{1i} &= u_i(t - t). \end{aligned}$$

Da mesma forma a aceleração de cada ponto pode ser obtida através de:

$$a_i = \frac{u_{3i} - 2u_{2i} + u_{1i}}{\Delta t^2} \quad (7)$$

Substituindo-se as Equações (6) e (7) na Equação (1) resulta em:

$$m_i \left[\frac{u_{3i} - 2u_{2i} + u_{1i}}{\Delta t^2} \right] + c \left[\frac{u_{3i} - u_{1i}}{2 \Delta t} \right] = f(t) - f_S(t) \quad (8)$$

Resolvendo a Equação (8) em termos de u_{3i} tem-se:

$$u_{3i} = \frac{\frac{[f(t) - f_S(t)]\Delta t^2}{m_i} + 2u_{2i} - \left(1 - \frac{c\Delta t}{2m_i}\right)u_{1i}}{1 + \frac{c\Delta t}{2m_i}} \quad (9)$$

Definindo-se as constantes:

$$C_1 = \left(1 - \frac{c\Delta t}{2m_i}\right) \quad (10)$$

e

$$C_2 = \left(1 + \frac{c\Delta t}{2m_i}\right) \quad (11)$$

chega-se finalmente a:

$$u_{3i} = \frac{1}{C_2} \left\{ \frac{\Delta t^2}{m_i} [f(t) - f_S(t)] + 2u_{2i} - C_1 u_{1i} \right\} \quad (12)$$

A Equação (12), juntamente com a Equação (4), são resolvidas sucessivamente a cada passo de integração. Para cada incremento de tempo calcula-se a força atuante nos segmentos de barra, $f_S(t)$, e a seguir as novas posições nodais, u_{3i} .

O esquema de integração explícita por diferenças finitas utilizado é simples e robusto. Contudo, essa simplicidade é obtida à custa de tempo de processamento, pois por uma questão de estabilidade numérica o intervalo de tempo de integração, t , deve ser escolhido suficientemente menor que L_0/c , onde c é a velocidade do som no aço.

5. Monitoramento da energia no sistema

Considerando que após a liberação do martelo não são aplicadas outras forças externas ao sistema martelo-haste-solo, a energia total inicial deve permanecer constante ao longo do tempo. Esta energia total inicial de referência é dada por:

$$E_{TOT}(t=0) = m_H g u_{H0} + m_R g u_{R0} \quad (13)$$

onde m_H é a massa do martelo, m_R é a massa total da haste, g é a aceleração da gravidade, e u_{H0} e u_{R0} são as alturas iniciais do martelo e da haste, respectivamente, em relação a um nível de referência arbitrário. A partir do início da integração, a energia total, $E_{TOT}(t)$, é calculada como a soma de diversos tipos de energia:

$$E_{\text{TOT}}(t) = E_{\text{TOT}}(t=0) = E_P(t) + E_C(t) + E_{\text{PE}}(t) + E_D(t) + E_A(t) \quad (14)$$

onde $E_P(t)$ é a energia potencial instantânea (de todo o conjunto), $E_C(t)$ é a energia cinética instantânea, $E_{\text{PE}}(t)$ é a energia potencial elástica instantânea, $E_D(t)$ é a energia dissipada pelo critério de amortecimento proporcional a massa, e $E_A(t)$ é a energia entregue ao solo pelo amostrador.

Considerando agora que o sistema tem n_N nós e n_B barras (considerando martelo e haste em conjunto), estas energias podem ser calculadas como:

$$E_P(t) = \sum_{i=1}^{n_N} m_i g u_i(t) \quad (15)$$

$$E_C(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_N} m_i v_i^2(t) \quad (16)$$

$$E_{\text{PE}}(t) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n_B} \frac{L_{0j}}{EA_j} F_j(t) \quad (17)$$

$$E_D(t) = \sum_{i=1}^{n_N} c \int_0^t v_i^2(\tau) d\tau \quad (18)$$

$$E_A(t) = \int_0^t F_A(\tau) v_A(\tau) d\tau \quad (19)$$

onde $F_i(t)$ é a força instantânea em cada segmento de barra, $F_A(t)$ é a força na ponta do amostrador, calculada com o modelo de Smith, e $v_A(t)$ é a velocidade da ponta do amostrador. Observa-se que todas as formas de energia, com exceção da energia de amortecimento, podem ser avaliadas instantaneamente. A trabalho de amortecimento, dado o seu caráter dissipativo, precisa ser acumulada em uma variável durante o processo de integração. O mesmo acontece com a parcela não restituível da energia dissipada no solo.

6. Exemplo de simulação e monitoramento da energia

A seguir apresenta-se um exemplo de uma simulação numérica efetuada para ilustrar a aplicabilidade do programa desenvolvido para avaliar os diferentes fatores que afetam a energia que efetivamente chega ao amostrador. Neste exemplo, são demonstradas as influências do comprimento das hastes e o valor da penetração permanente do amostrador no solo no cálculo da energia utilizada para cravar o amostrador no solo.

O exemplo refere-se a um golpe de um martelo de 65kg com 75cm de altura de queda inicial caindo sobre uma haste de 12,6 metros (ver Figura 4). Os parâmetros adotados neste exemplo para simular o golpe de martelo satisfazem as especificações da NBR 6484. O tubo de aço que constitui a haste é do tipo *Schedule 80*, com 3,23kg de massa por metro linear e 4,1cm² de área de seção transversal. Considera-se uma módulo de Young para o aço, tanto do martelo

como do tubo, $E = 205\text{GPa}$. O martelo, cujo comprimento (altura) total é de 23cm, é discretizado com 11 nós e 10 barras. Já a haste tem sua discretização feita com elementos de 2,3cm, sendo que o número total de elementos depende do comprimento de haste a ser representado.

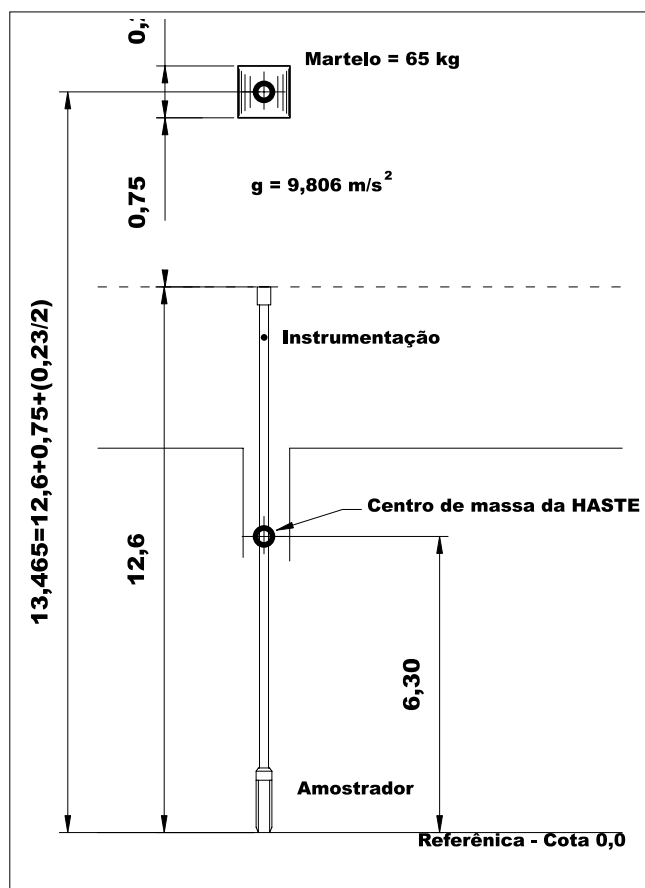


Figura 4: Dados do exemplo.

A Figura 5 apresenta o resultado desta simulação numérica. Esta figura ilustra o processo de transferência de energia às hastes incluindo as diversas ondas que percorrem a composição e a sua influência na penetração do amostrador devido à aplicação de um golpe do martelo. Nas curvas que representam as trajetórias da base inferior do martelo e do topo da cabeça de bater é possível identificar os diversos impactos. O intervalo entre os pontos 1 e 2 corresponde ao tempo de duração do primeiro impacto; 3 e 4 ao segundo impacto; 5 e 6 ao terceiro impacto; 7 e 8 ao quarto impacto. Nos sinais de força e velocidade (expressa em unidade de força) é possível verificar também os pontos do impacto

(tempo de contato entre martelo e cabeça de bater), ou seja, de A a B; E a G e K a L, representando respectivamente o primeiro, segundo, terceiro impacto.

O primeiro impacto, do ponto A até B, introduz na haste a primeira onda longitudinal incidente. O contato entre martelo e cabeça de bater é interrompido em B devido à onda de tração que chega da extremidade inferior após o tempo $2L/c_p$, onde L é o comprimento da haste e c_p a velocidade da onda longitudinal no aço. Esta onda refletida na parte superior da haste retorna em direção do amostrador dando início à segunda onda longitudinal incidente, referente ainda ao primeiro impacto, do ponto B até C. Do ponto C a D tem-se a terceira onda longitudinal incidente. A quarta onda longitudinal, referente ao primeiro impacto que vai do ponto D a F, é perturbada pelo segundo impacto. A partir desse instante tem-se a onda gerada pelo primeiro e segundo impacto. Os impactos subseqüentes geram novas ondas que vão se sobrepondo tornando a interpretação do sinal cada vez mais complexa.

A penetração do amostrador no solo devido à aplicação de um golpe só se inicia após a chegada da frente da primeira onda longitudinal incidente (ponto a) que ocorre a um tempo L/c_p do instante do início do primeiro impacto. A chegada da segunda e terceira onda longitudinal é percebida na cravação do amostrador nos pontos b e c respectivamente. É visível nesse gráfico (Figura 2) que a segunda e terceira onda longitudinal tem uma contribuição significativa no deslocamento do amostrador. Esse fato também é percebido quando da chegada do segundo impacto, o qual sem dúvida também contribui na cravação do amostrador. Já os demais impactos não são tão significativos no que diz respeito à cravação do amostrador no solo.

Para ilustrar o balanço das distintas energias tanto relacionadas ao martelo como a haste o programa permite, a cada passo de integração, determinar a energia potencial, $E_p(t)$, a energia cinética, $E_c(t)$, a energia potencial elástica, $E_{pe}(t)$, a energia dissipada pelo critério de amortecimento proporcional à massa, $E_d(t)$ e a energia entregue ao solo, $E_A(t)$.

Para o exemplo, o nível de referência (cota zero) foi posicionado na parte inferior do amostrador (Figura 2) desta forma, é possível fazer o equilíbrio de energia antes e depois do impacto. O centro de massa do martelo, no instante inicial, encontra-se a uma altura de 13,465m acima do nível de referência. Desta forma a energia potencial inicial do martelo é $65\text{kg} \cdot 13,465\text{m} \cdot 9,806\text{m/s}^2 = 8582 \text{ J}$. No instante em que o martelo inicia a sua queda a energia potencial irá diminuir e a energia cinética irá crescer proporcionalmente. A Figura 6a apresenta as variações da energia potencial (E_{pm}) e da energia cinética (E_{cm}). As variações da energia potencial elástica ($E_{pe,m}$) e do amortecimento dinâmico (E_{dm}) do martelo ao longo do tempo são apresentadas na Figura 6b.

Considerando que a penetração permanente do amostrador no solo é de 3,0cm (ver Figura 5) (correspondente a $N_{spt} = 10$ golpes) o valor da energia potencial final do martelo é de $(12,6m - 0,030m + 0,23m/2) \times 65kg \times 9,806m/s^2 = 8084$ J. A energia cinética do martelo sai de um valor inicial nulo, atinge o valor máximo de 478 J e no final do processo volta a ser nulo. Por outro lado, a variação da energia elástica do martelo ao longo do tempo, bem como a de amortecimento dinâmico (Figura 6b) é muito pequena.

Para as hastes, a energia potencial inicial é de $(12,6m \times 3,23kg/m) \times 9,806m/s^2 \times 12,6m/2 = 2514$ J e após a cravação do amostrador de um valor de 3,0cm passa a ser de $(12,6m \times 3,23kg/m) \times 9,806m/s^2 \times (12,6m/2 - 0,030m) = 2501$ J. Neste caso, a influência da deformação elástica das hastes em função do peso do martelo é desprezível. A Figura 7a apresenta o gráfico da variação da energia potencial e da energia cinética da haste e a Figura 7b apresenta o gráfico da variação da energia potencial elástica e da energia de amortecimento dinâmico da haste ao longo do tempo. Pela análise das Figuras 6 e 7 pode-se verificar que a energia inicial total do martelo e da haste era de 8582 J + 2514 J = 11096 J e no final do processo a energia total do martelo e da haste é de 8084 J + 2501 J = 10585 J. Com a variação da energia total do sistema deve permanecer constante a diferença $11096 - 10585 = 511$ J é a energia transferida para o solo conforme apresentado na Figura 8. Portanto, pode-se concluir que a massa da haste, que está diretamente associada ao seu comprimento e seção e o valor da penetração permanente do amostrador no solo representam um valor significativo de energia que não deve ser desprezada.

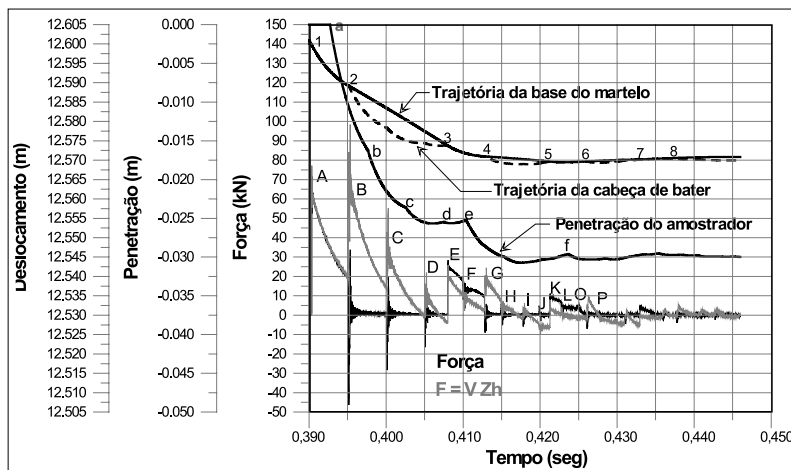


Figura 5: Simulação numérica de golpe de martelo sobre uma haste.

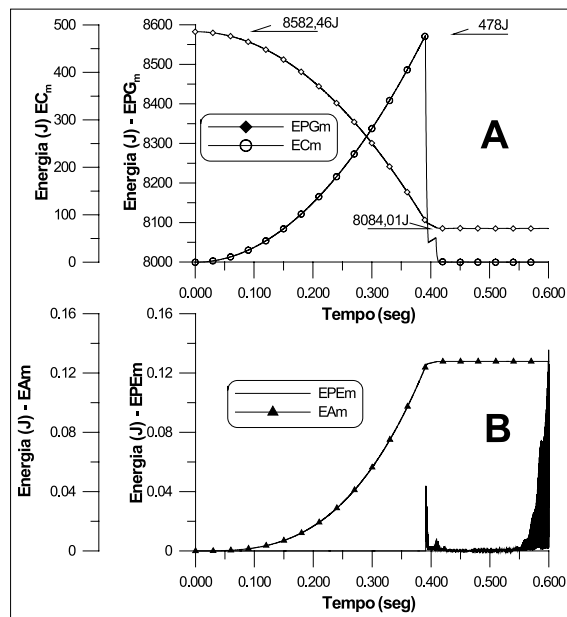


Figura 6: Gráfico de energias do martelo. A) Energia potencial e energia cinética; B) Energia elástica e energia de amortecimento dinâmico.

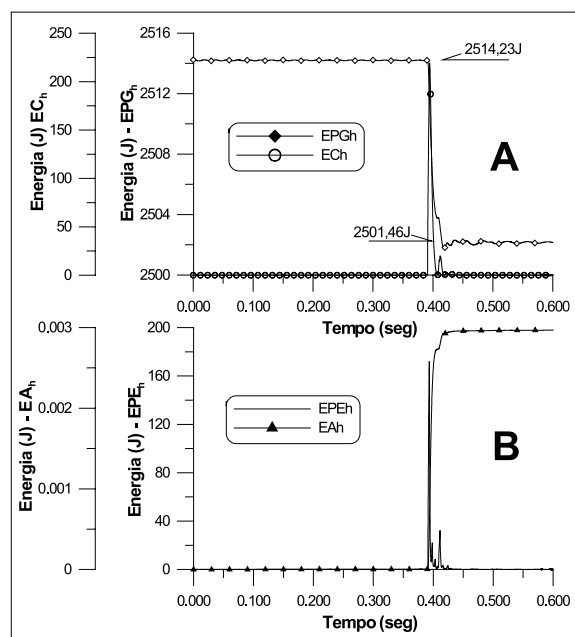


Figura 7: Gráfico de energia da haste. A) Energia potencial e energia cinética; B) Energia elástica e energia de amortecimento dinâmico.

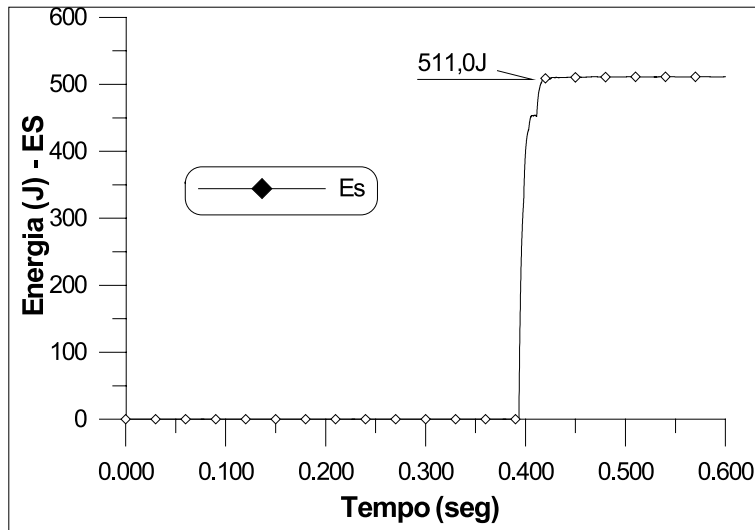


Figura 8: Energia entregue para o solo ao longo do tempo.

7. Comparação entre resultados numéricos e experimentais

A Figura 9 apresenta uma comparação entre sinais medidos experimentalmente e as respectivas séries temporais numericamente simuladas para uma haste de comprimento 5,8m, considerada curta. Os valores apresentados referem-se a um ponto na extremidade superior da haste. A figura mostra a força neste ponto conhecida de quatro formas distintas:

- a) Calculada através da expressão (Schmertmann et al. 1979):

$$F = vZ_H \quad (20)$$

onde v é a velocidade do ponto (medida pela integração dos sinais dos acelerômetros) e Z_H é a impedância da haste, calculada como:

$$Z_H = \frac{EA}{c_p} \quad (21)$$

onde A é a área da seção transversal da haste, E é o módulo de Young e c_p é a velocidade da onda longitudinal no material (aço inox), dada por:

$$c_p = \sqrt{E/\rho} \quad (22)$$

sendo a massa específica do material.

- b) Medida diretamente pela célula de carga (extensômetros).
 c) Calculada pela Equação (21), mas com a velocidade obtida da simulação numérica.
 d) Calculada pela Equação (4) na simulação numérica.

Na Figura 9 podem ser observados os sucessivos impactos do martelo, decorrentes do descolamento entre este e o topo da haste durante o golpe, efeito esse captado tanto experimental como numericamente. Também são captados os sucessivos retornos da onda de pressão, que ocorrem entre os impactos. Observa-se uma excelente concordância entre os sinais experimentais e numéricos. A divergência entre os sinais oriundos de diferentes métodos para o cálculo da força se deve ao fato de que os acelerômetros são capazes de captar o movimento de corpo rígido, o que não é possível através dos extensômetros.

Na Figura 10 são apresentados os mesmos resultados para uma haste de 11,8m, considerada de comprimento médio. Também neste caso se observa uma excelente concordância entre experimento e simulação. Nota-se que para uma haste mais longa, ocorre um número menor de impactos antes de o sinal ter sua amplitude reduzida a níveis insignificantes. Este efeito é ainda mais acentuado para a haste de 35,8m de comprimento, considerada longa, apresentada na Figura 11, onde apenas o primeiro e o segundo impactos do martelo contribuem para a energia introduzida na haste.

8. Conclusões

No presente trabalho confrontaram-se as abordagens experimental e numérica no estudo da simulação da propagação de ondas no ensaio de sondagem SPT (*Standard Penetration Test*). Mostrou-se que em ambos os casos é possível a avaliação da energia que chega ao amostrador, situado na extremidade inferior do sistema de hastes, a qual está efetivamente disponível para a ruptura do solo e conseqüentemente correlacionada com os resultados do ensaio. O conhecimento desta energia efetiva, em relação a energia potencial total inicialmente disponível, permite a avaliação da influência nos resultados de fatores tais como o comprimento das hastes e a própria distância de penetração no solo (não-linearidade geométrica).

Enquanto a abordagem experimental permite uma avaliação da propagação de ondas sob condições reais de operação, com todos os seus ruídos e aspectos secundários, a abordagem numérica, devidamente validada por comparações com experimentos, oferece as vantagens da rapidez e do baixo custo para o estudo de configurações de ensaio diversas. Em ambos os casos, o objetivo final é o estabelecimento de critérios práticos que permita uma correlação mais coerente do N_{SPT} com a resistência do solo. Para tanto faz-se necessário o estabelecimento de correções sobre o N_{SPT} , que incorporem os fatores que tem influência relevante sobre o processo de transmissão de energia ao amostrador. Neste contexto, o método de simulação apresentado mostra-se de grande utilidade.

Finalmente, cabe observar que o modelo pode ainda ser aperfeiçoado para levar em conta aspectos tais como a perda no impacto do martelo (choque não-elástico), descontinuidades nas emendas das hastes, entre outros. Também é

possível a adoção de um modelo de comportamento do solo mais elaborado que o modelo de Smith. Todos estes aperfeiçoamentos, embora úteis para estudos específicos, não alteram as conclusões de caráter geral aqui apresentadas sobre quais fatores devem ser considerados na correção do N_{SPT} quanto à eficiência da transmissão de energia ao amostrador.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e a CAPES pelo apoio dado a essa pesquisa.

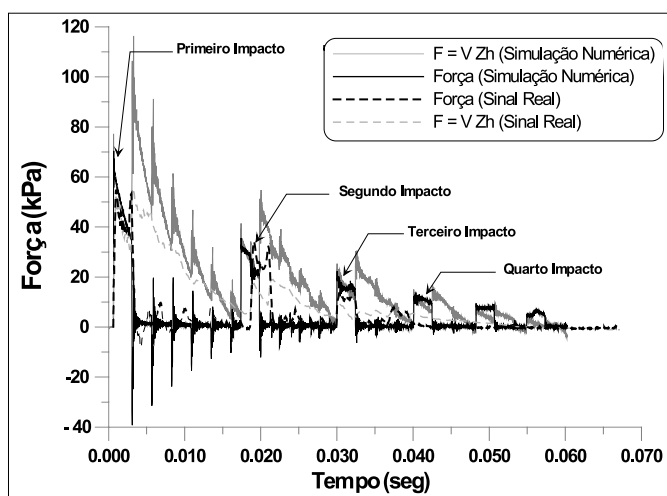


Figura 9: Comparação entre resultados experimentais e simulação numérica (haste com 5,8m).

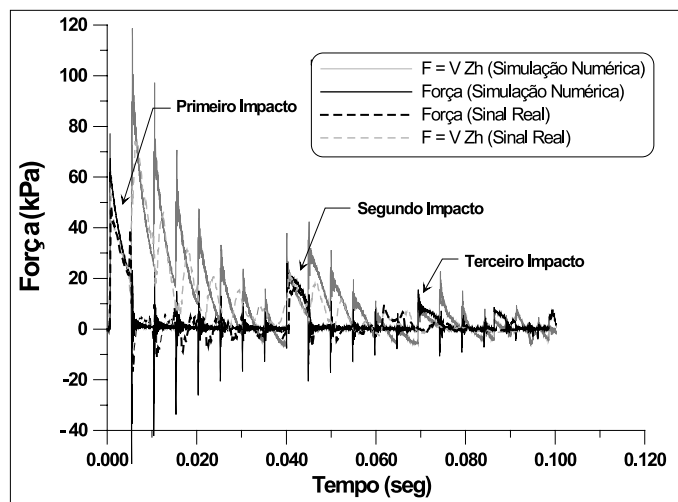


Figura 10: Comparação entre resultados experimentais e simulação numérica (haste com 11,8m).

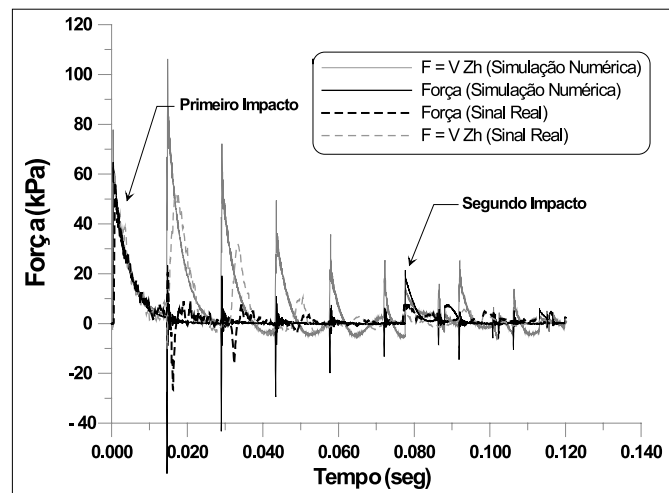


Figura 11: Comparação entre resultados experimentais e simulação numérica (haste com 35,8m).

Referências

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). *NBR 6484: Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de Ensaio*. Rio de Janeiro, ABNT.
- Butler, J. J.; Caliendo, J. A. and Goble, G. G. (1998). Comparison of SPT energy measurement methods. *Proceeding of '98 ISC International Conference on Site Characterization*, Atlanta, v. 2, p. 901-906.
- Farrar, J. A. (1998). Summary of Standard Penetration Test (SPT) energy measurement experience. *Proceeding of '98 ISC International Conference on Site Characterization*, Atlanta, v. 2, p. 919-926.
- Odebrecht (2003), *Medias de Energia no Ensaio do SPT*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Odebrecht, E.; Schnaid, F.; Rocha, M. M. and Bernardes, G. P. (2004). *Transferência de energia no ensaio SPT: Efeito do comprimento de hastes e da magnitude dos deslocamentos, Solos e Rocha*. (em fase de publicação).
- Schmertmann, J. H. and Palacios, A. (1979). Energy dynamics of SPT. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, v. 105, n. GT8, p. 909-926, Aug.
- Seed, R. B.; Tokimatsu, K.; Harder, L. F. and Chung, R. M. (1985). Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 111, n. 12, p. 1425-1445.
- Smith, E. A. L. (1960). Pile driving analysis by the wave equation. *Journal Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, n. SM4, p. 2574, Aug.
- 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.

Abstract

From the various methods of ground investigation currently practised worldwide, the Standard Penetration Test, SPT, remains as the most popular, widely used *in situ* testing technique. Given its simplicity, low cost and robustness, along with the large empirical experience gathered in different geomaterials, this technique is recognized as a valuable engineering tool in geotechnical practice. However, there are still some important aspects of interpretation that are open to debate, most of them related to scatter in test data produced by the highly variable energy delivered to the SPT rods, which are believed to depend on both the type of equipment and test procedure. Until recently, research efforts have not produced a sounding approach to assess the energy reaching the sampler, which is responsible for the sampler penetration and is therefore directly correlated to soil shear strength properties.

The present work is part of a comprehensive research program reported by Odebrecht (2003), which include measurements of the energy contained in the stress wave that propagates down the drill rods as well as the identification of the most relevant factors affecting these measurements. Besides the experimental work, a numerical model was developed to simulate the propagation mechanism. This model consists of a discretization of the complete SPT system, including hammer, rods, sampler and soil, in which the associated dynamic equilibrium equations are solved by means of a finite differences scheme in time domain. Special boundary conditions are applied to the contact surface between hammer and rod top, in order to ensure displacement compatibility during impact. The soil beneath the sampler tip is modeled as elasto-perfectly plastic, according to Smith (1960).

Results from the simulations indicate that the energy transmitted to the sampler-soil system is a function of the length of the rods, the secondary impacts of the hammer and the permanent penetration of the sampler. These effects, often disregarded in practice, should be considered when calculating the potential energy delivered by the SPT.

1. Introduction

From the various methods of ground investigation currently in use worldwide, the Standard Penetration Test (SPT) remains as the most popular *in situ* testing technique. On account of its simplicity, low cost and robustness, along with the large experience gathered in different geomaterials, this technique is recognized as a valuable engineering tool in geotechnical practice.

However, there are still some important aspects of interpretation that are open to debate, most of them related to scatter in test data produced by the highly variable energy delivered to the SPT rods. The test is often interpreted by means of empirical correlations and these correlations rely on the blow count number N_{SPT} which in recent years has been subjected to various “corrections” to account for the lack of standardization, effects of overburden pressure and influence of rod length. Scatter produced by the highly variable and unknown values of the energy delivered to the SPT rod system can now be properly accounted for by standardizing the measured blow counts (N_{SPT} value) to a reference value of 60% of the potential energy of the SPT hammer.

The study described herein is part of a comprehensive research program reported by Odebrecht (2003). It provides new insights for the analysis of SPT data from which all the above aspects can be rationally interpreted by a combination of calibration chamber test results and a numerical finite difference simulation. In this paper emphasis is given to numerical simulations that allow the assessment of both the stress wave propagation mechanism along the rods to be characterized and experimental data recorded in the field.

2. Experimental results

The equipment developed for measuring force and acceleration signals consists of a load cell and a couple of piezoelectric accelerometers mounted on SPT rods. From these measurements the stress wave propagation along the rods is interpreted and the energy transmitted to the rod-sampler-soil system is calculated.

A building under construction has been used to support the testing configuration in which the driving system was mounted at several different floors, whereas the calibration chamber was placed at underground level. Energy measurements are monitored in three different positions: below the anvil and above the sampler.

3. Numerical model for the SPT

The numerical study comprises a set of runs designed to evaluate the influence of the SPT rod length in different soil conditions. The model consists of the discretization of the whole system – hammer, rods, sampler and soil, in which dynamic equilibrium equations are solved by a finite difference method integrated explicitly in the time domain. The hammer, rods and sampler are characterized by a linear elastic model, whereas the soil is represented by Smith’s (1960) elastic-plastic model.

In the analysis, a free-fall hammer hits the composition of rods and generates compression P-waves that propagate downwards towards the sampler-soil system. At the lower end of the sampler, these P-waves reach the soil that in turn produce a reaction force calculated as a function of the soil ultimate strength, R_u , elastic strain (or quake), Q , and damping factor, J . The model is capable of delivering displacements, velocities, accelerations, stresses and strains at any point, allowing a straightforward comparison with experimental records.

4. Application of the finite difference program

In this section the formulation for the finite differences scheme is presented. This formulation has been implemented in a FORTRAN 90 code. Despite of its simplicity, the method is quite demanding in terms of computational effort, for the integration step must be very small to avoid numerical instability.

5. Monitoring the energy of the system

In this section the formulation for evaluating the energy at each time step is presented. The balance between total potential energy, kinetic energy, elastic potential energy, mass proportional damping energy and soil rupture energy must be monitored during numerical integration.

6. Numerical simulations and energy measurements

A parametric study was carried out to evaluate the influence of the constitutive parameters on the energy transmitted to the soil. All simulations are focused on tests performed strictly according to the Brazilian Standard (NBR6484/2001) in which a Terzaghi-Peck split barrel connected to Schedule 80 (3.23kg/m) rods was used. The manual release of a 65 kg pin-guided hammer produced an impact on a 3.72 kg steel anvil through which the hammer energy passes into the drill rods.

Typical records of forces and displacements calculated in the numerical simulation are presented in Figure 5. The impact of the falling hammer produces a first compression wave that propagates downwards to the sampler and reflects upwards as a tension wave arriving at the hammer at a time corresponding to $2/c$. At this time the rods pull temporarily away from the hammer until a second impact is produced. Since the first disturbance wave was not fully transmitted to the anvil, the ram still has a downward velocity (positive particle velocity). The same mechanism is then reproduced in the rods giving

rise to a third impact. Every impact produces an increase in the energy delivered to the rod-sampler system.

7. Comparison between experimental and numerical results

Figures 9 to 11 present a comparison between experimental and numerical results. An excellent agreement can be observed. Aspects like the multiplicity of hammer impacts, the amplitude of transmitted forces, among others, have been consistently reproduced.

The comparison was carried out for several rod lengths. Both the numerical model and the experimental results highlight the importance of this factor in determining the amount of energy reaching the sampler.

8. Conclusions

Results from the simulations indicate that the energy transmitted to the sampler-soil system is a function of the length of the rods, the secondary impacts of the hammer and the permanent penetration of the sampler. These effects, often disregarded in practice, should be considered when calculating the potential energy delivered by the SPT.

The numerical model presented in this paper has consistently reproduced the experimental results, both qualitatively and quantitatively.