

Proposal of a new system to classify possible damages in piles partially reinforced considering the results of low strain integrity tests

Proposta de novo sistema de classificação de possíveis danos em estacas parcialmente armadas a partir de resultados de ensaios PIT



R. P. S. PASQUAL^a
rodrigo@protecengenharia.com.br
<https://orcid.org/0000-0001-8667-066X>

A. C. M. KORMANN^a
alessander@ufpr.br
<https://orcid.org/0000-0002-4512-3763>

T. F. DE SOUZA JUNIOR^b
tennisonufpr@outlook.com
<https://orcid.org/0000-0003-0235-3152>

Abstract

Low strain integrity tests in piles are relatively cheap, of quick execution and nondestructive. Despite all these advantages, several variables are involved and the influence of external factors can complicate the interpretation of the results. Between them, the influence of the pile reinforcement can be high lighted. In piles partially reinforced, the difference in density and elastic modulus of the concrete in different parts of the pile and the influence of the process of introducing the reinforcement bars can induce some reflections in the test that can be confused with damage in the pile and, therefore, should be taken into account to analyze the tests results. In this research, the influence of the reinforcement embedded in the piles is analyzed using numerical (FEM) simulations and comparing them with tests made in the field. A new classification of possible damages is proposed based on the analysis of the reflections observed at the end of the reinforcement cage embedded in a pile partially reinforced.

Keywords: piles, PIT, reinforcement effects.

Resumo

Os ensaios PIT para avaliação de integridade em estacas têm um custo relativamente baixo, são de rápida execução e não destrutivos. Apesar dessas vantagens, as inúmeras variáveis envolvidas e a influência de fatores externos podem tornar a interpretação dos resultados complicada. Dentre elas, destacam-se as armaduras das estacas. Em estacas parcialmente armadas, a variação de densidade e de módulo de elasticidade entre o trecho armado e não armado e eventuais alterações na interface decorrentes do processo de introdução da armadura podem gerar reflexões que podem ser confundidas com danos nas estacas e devem ser levadas em conta na análise dos resultados. Neste trabalho a influência da armadura inserida nas estacas é avaliada com auxílio de simulações numéricas por elementos finitos e comparação com resultados de ensaios PIT executados em campo. Um novo sistema de classificação de possíveis danos é proposto para análise de reflexões nos sinais de ensaios PIT gerados na ponta da armadura inserida em estacas parcialmente armadas.

Palavras-chave: estacas, PIT, influência da armadura..

^a Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Departamento de Construção Civil, Curitiba, PR, Brasil;

^b Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Construção Civil, Porto Alegre, RS, Brasil.

Received: 30 Sep 2018 • Accepted: 14 Jan 2019 • Available Online:

 This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License

1. Introdução

Os riscos associados a problemas de integridade em fundações profundas levaram as normas brasileiras e internacionais a incluírem o tema em seus textos. Especificamente para estacas escavadas, a norma brasileira determina inspeções visuais em 1% das estacas (no mínimo uma por obra) para verificação da qualidade e integridade do fuste. Ainda que não requerida pela norma brasileira, algumas empresas têm exigido de seus fornecedores a execução de ensaios de integridade PIT em até 100% das estacas [1]. A velocidade de execução e o custo relativamente baixo são apontados como principais vantagens do ensaio. No entanto, muitas vezes a interpretação dos resultados desses ensaios é difícil especialmente quando há alterações na seção transversal das estacas ou quando há influência do solo circundante [2]. A armadura exposta acima do topo da estaca e estacas armadas parcialmente podem gerar alterações nos sinais obtidos no ensaio e dificultar a identificação de um dano [3].

Uma das formas de avaliação dos resultados obtidos no ensaio PIT e da influência desses fatores nos resultados é simular o ensaio numericamente ou analiticamente e comparar o resultado teórico obtido com o resultado prático. Ordóñez e Botero [4] por exemplo, utilizando uma solução analítica para o problema de propagação de ondas (base do ensaio PIT), simularam os resultados que seriam obtidos em estacas íntegras e em estacas com variações de seção em diversas condições. Ambrosini e Ezeberry [5] e Chai, Wei, Phoon e Yang [6] publicaram resultados obtidos em simulações numéricas modelando a estaca como uma barra e o solo como molas e amortecedores obtendo uma boa correspondência entre a simulação e resultados práticos em campo. Alguns trabalhos foram publicados recentemente simulando o ensaio em modelos numéricos tridimensionais com objetivos distintos como os de [2], [7], [8], [9], [10], [11] e [12].

Neste artigo, modelos numéricos por elementos finitos desenvolvidos pelo autor são utilizados para avaliar a influência das armaduras inseridas em estacas parcialmente armadas nos resultados dos ensaios PIT. Comparações são realizadas com ensaios realizados em campo. Um novo sistema de classificação de possíveis danos na transição entre trechos armado e não armado é proposto diferente dos que atualmente são utilizados como os propostos por Liang e Rausche [13], Webster, Rausche e Webster [14] e Cunha, Camapum de Carvalho e Silva [15].

2. Referencial teórico do estudo

Neste item é apresentado um breve resumo do referencial teórico que embasa as análises realizadas nessa pesquisa, com especial ênfase às simulações numéricas e à influência teórica da armadura da estaca no ensaio.

2.1 Simulação unidimensional por elementos finitos ensaio PIT

Considerando que o ensaio PIT se aproxima de um problema unidimensional, alguns trabalhos foram publicados simulando o ensaio por elementos finitos de forma similar ao proposto origi-

nalmente por Smith [16]. Nessa solução a estaca é considerada como uma barra e o solo como um sistema de molas e amortecedores. A carga aplicada no modelo no topo da estaca (simulação do impacto do martelo) não pode ser considerada como estática visto que há uma variação da força aplicada ao longo do tempo em que o martelo fica em contato com a estaca. Geralmente considera-se uma função seno considerando apenas metade da onda definida pela Equação (1).

$$F(t) = F_{\max} \text{sen}(\pi) \frac{t}{t_c} \quad (1)$$

Onde:

$F(t)$ – Força no instante “t”;

F_{\max} – Força máxima aplicada;

t_c – Tempo de contato do martelo com o topo da estaca.

O solo é simulado atribuindo uma mola e um amortecedor na ponta e na lateral da estaca com propriedades calculadas conforme as Equações (2) a (5).

$$k_v = 2.75G_s \quad (2)$$

$$c_v = 2\pi \rho_s c_s r_p \quad (3)$$

$$C_v = \frac{0.85 K_v r_p}{C_s} \quad (4)$$

$$K_v = \frac{4 G_s r_p}{(1 - \nu_s)} \quad (5)$$

Onde:

k_v – Constante elástica da mola que representa o solo ao longo do fuste da estaca;

G_s – Módulo de deformação cisalhante [como o ensaio PIT é um ensaio de baixa deformação recomenda-se o uso nesta fórmula do G_0 (módulo cisalhante a pequenas deformações)];

c_v – coeficiente de amortecimento ao longo do fuste da estaca (lateral);

ρ_s – Massa específica do solo;

c_s – é a velocidade das ondas “S” no solo;

r_p – raio da estaca (em m);

C_v – coeficiente de amortecimento na ponta da estaca;

K_v – coeficiente de reação vertical do solo na ponta da estaca;

ν_s – coeficiente de Poisson do solo.

As Equações (2) a (5), baseadas nos estudos de Lysmer e Richart [17], Novak [18] e Simons e Randolph [19], são derivadas assumindo um disco rígido em um plano elástico. Segundo Yu e Liao [20] os erros introduzidos por essa simplificação são pequenos.

O problema é, então, resolvido subdividindo o domínio em partes menores (elementos finitos) cada qual representada por um conjunto de equações. Segundo Hetland [11], a resposta de cada elemento é caracterizada por seus graus de liberdade e definida por equações cujas soluções podem ser obtidas por métodos de integração direta no domínio do tempo como os de Newmark [21] e Hilber, Hughes e Taylor [22]. Para cada intervalo de tempo definido, usando os métodos descritos, são obtidos o deslocamento, a velocidade e a aceleração nos pontos que definem os elementos finitos. A variação de velocidade (denominada de velocidade de partícula) ao longo do tempo no ponto que define o topo da estaca pode ser, então, obtida e comparada com os reflectogramas obtidos nos ensaios PIT de campo.

2.2 Simulação tridimensional por elementos finitos do ensaio PIT

Teoricamente, nas simulações unidimensionais de PIT, a carga é considerada aplicada no ponto superior da estaca e não são levados em consideração os efeitos decorrentes da localização do impacto no topo da estaca, os efeitos decorrentes da relação entre a área de contato do martelo e a área do topo da estaca nem os efeitos decorrentes da radiação das ondas próximo ao topo da estaca.

Além disso, são necessárias: a atribuição de condições de contorno (a representação do solo é limitada em relação ao todo representando uma parte de um maciço que tem continuidade na prática), do modelo constitutivo do solo e de condições de contato na interface solo-estaca. Todas são questões relevantes nos modelos 3-D que não são levadas em conta nos modelos 1-D.

Nas simulações 3-D, o solo também pode ser modelado por elementos finitos em vez de substituído por molas e amortecedores. Isso torna ainda mais importante o cuidado com a discretização dos elementos finitos. Segundo Hetland [11] em análises dinâmicas uma divisão em elementos muito grandes pode resultar em imprecisão dos resultados com filtragem das frequências mais altas e uma divisão em elementos muito pequenos aumenta o tempo de processamento computacional significativamente.

Definido o modelo, de forma similar ao que ocorre no modelo unidimensional, os deslocamentos, velocidades e acelerações em cada ponto são obtidos a partir da solução da equação geral de dinâmica estrutural derivada da segunda lei de Newton usando um dos métodos de integração conhecidos.

Liao e Roesset [23] compararam os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos em modelos 1-D e 3-D chegando à conclusão de que, em termos gerais, os resultados são similares sendo que nos modelos 3-D há uma tendência de haver mais oscilações de alta frequência nos sinais de velocidade de partícula. Uma estaca pode ser considerada, por aproximação, uma barra elástica unidimensional em simulações de ensaios PIT se ela satisfizer duas condições: o comprimento de onda for maior que o diâmetro e menor que o comprimento da estaca [7].

2.3 Influência da armadura na interpretação do ensaio PIT

No momento em que se aplica um golpe com o martelo no topo da estaca no ensaio, gera-se um pulso de tensão, transiente, cujo efei-

to se propaga ao longo da estaca. Devido à inércia do elemento, a tensão e deformações causadas pela força radiam do ponto de aplicação para todas as direções. Qualquer ponto da estaca estará em completo repouso antes e depois que todos os efeitos do impacto gerado sejam dissipados. Esse fenômeno é chamado de propagação de uma onda de tensão. Há, geralmente, três tipos de ondas de tensão gerados quando se causa alguma movimentação repentina em um corpo elástico e uma distorção física no meio como no caso do ensaio PIT: ondas de compressão (ondas tipo "P" ou longitudinais), ondas de cisalhamento (ondas tipo "S" ou transversais) e ondas que se propagam pela superfície e penetram relativamente pouco no interior da estaca (ondas Rayleigh ou ondas tipo "R") [24]. Considerando por aproximação a estaca como uma barra, a onda de compressão se propaga axialmente para baixo e se reflete para cima quando atinge sua ponta. Outras reflexões podem ocorrer quando houver uma mudança no material da estaca, uma mudança na área ou um seccionamento da estaca.

Quando as estacas não são armadas em toda a sua extensão, durante o ensaio as ondas de tensão se propagam parte em uma estaca armada e parte em uma estaca não armada. Teoricamente, a repentina variação de módulo de elasticidade e densidade da seção composta da estaca na transição entre esses trechos pode gerar uma reflexão (devido à redução de impedância) que pode ser confundida com um dano na estaca. Neste artigo essa hipótese é analisada utilizando simulações numéricas e resultados de ensaios de campo.

2.4 Análise gráfica pelo método Beta

A magnitude dos potenciais danos em uma estaca pode ser estimada quando há sinal claro de ponta. Nesse caso, as amplitudes de reflexão de ponta e do impacto inicial são iguais e a estimativa da magnitude do dano é dada pelo cálculo de Beta (β). De acordo com Rausche e Goble [25], Beta (β) pode ser calculado pela relação entre as impedâncias dos trechos com possível dano e a impedância da estaca íntegra.

3. Materiais e programa experimental

Foram selecionados em banco de dados disponível na empresa Protec Engenharia de Projetos, 5 (cinco) grupos de estacas com diferentes características. Cada grupo de estacas foi executado em local distinto dos demais porém todos eles na região metropolitana de Curitiba/PR. Para melhor identificação no restante

Tabela 1
Resumo das características das estacas

Grupo	Estacas			Armadura	
	Número de estacas	Diâmetro (em m)	Comprimento (em m)	Número de barras e bitola (em mm)	Comprimento embutido da armadura (em m)
1	40	0,50	13,00	6 de 16	8,00
2	32	0,30	15,00	4 de 16	4,60
3	12	0,50	10,90	5 de 16	8,00
4	12	0,70	20,50	5 de 32	8,80
5	12	0,80	21,80	12 de 25	10,50

Tabela 2
Dados de entrada complementares

Grupo	Edyn (em MPa)	tc (em ms)	F (em kN)	Função de amplificação (em vezes)
1	40312,20	0,63	8,97	15
2	36102,40	1,20	2,69	10
3	38768,30	1,11	3,53	10
4	36793,80	0,46	16,77	10
5	33989,70	0,51	8,87	10

deste trabalho, os grupos de estacas foram numerados de 1 a 5. Na Tabela 1 estão resumidas as principais características de cada um deles, extraídas de projeto, além de outros dados de entrada dos modelos numéricos e posterior comparação entre resultados. As propriedades elásticas do solo: módulo de elasticidade (E_s) e o coeficiente de Poisson (ν_s) além da massa específica (ρ_s) foram estimados com base em resultados de furos de sondagem SPT realizados próximos ao estaqueamento.

Foram adotados os valores de coeficiente de Poisson de 0,4 e massa específica de 1800 kg/m^3 para todos os tipos de solo abrangidos na pesquisa condizentes com valores presentes na literatura [26]. No caso do peso específico, ensaios realizados em amostras coletadas em campo indicam que o valor de 1800 kg/m^3 representa uma estimativa próxima da realidade. Para estimativa do módulo de elasticidade do solo foi adotado $E_u/NSPT_{60} = 9$ valor próximo ao obtido por Kormann [27] para solos da formação Guabirotuba e dentro da faixa de valores encontrada nos estudos de Stroud [28] para graus de carregamento muito baixos.

Como o ensaio PIT caracteriza-se por ser um ensaio de baixa deformação e dinâmico, a correlação com ensaios de campo de grande deformação como o SPT e que afetam majoritariamente as camadas iniciais (como ensaios de placa) não é precisa. Optou-se, então, por fazer uma estimativa desses parâmetros para as simulações numéricas com base em correlações obtidas a partir de ensaios SPT e uma posterior retroanálise comparando os resultados obtidos com o amortecimento dos sinais identificados nos resultados dos ensaios. Os resultados indicaram que as propriedades atribuídas para o solo geraram amortecimento nos sinais muito próximos dos observados nos ensaios.

Para finalizar a coleta de dados de entrada são necessários:

massa específica do concreto da estaca (assumida uma média ao longo do comprimento de 2300 kg/m^3) e o coeficiente de Poisson do concreto igual a 0,20 de acordo com ABNT NBR 6118 [29].

Além disso são necessários os valores resumidos na Tabela 2: módulo de elasticidade dinâmico do concreto (Edyn) (obtido por retroanálise a partir das velocidades médias de onda observados nos ensaios PIT em cada grupo de estacas); tempo de contato do martelo com a estaca (t_c) assumido como igual a comprimento de onda inicial médio obtido por retroanálise nos reflectogramas dos ensaios PIT realizados nas estacas e a carga máxima (F) aplicada no topo da estaca também obtida pela média observada nos relatórios dos ensaios PIT. É importante destacar que as funções de amplificação exponencial nos modelos foram adotadas iguais às utilizadas no tratamento dos resultados de campo.

Uma vez calibradas as propriedades, foram comparados os resultados obtidos nos ensaios PIT nas estacas dos Grupos 1 a 5 com os resultados das simulações numéricas no aspecto da influência da armadura. Para enriquecer as análises, de cada uma das 5 (cinco) simulações foram derivadas outras 3 (três), paramétricas, em que se variou somente um item nos modelos de origem: a taxa de aço. Na Tabela 3 é apresentado um resumo das simulações que foram realizadas.

As variações da taxa de aço realizadas nas demais simulações não destacadas na Tabela 3 seguiram a seguinte lógica: simular a influência nos resultados, mantidas todas as demais propriedades calibradas com os resultados de campo, da variação da taxa de armadura (relação entre a área de aço e a área de concreto) para 0,50%, a mínima prevista pela norma ABNT NBR 6122 [1], para 4,00% e para a máxima admissível por norma (8,00%).

Tabela 3
Resumo das simulações numéricas realizadas para comparação com resultados de campo

Simulação	Φ (em m)	Taxa de aço (%)	Simulação	Φ (em m)	Taxa de aço (%)	Simulação	Φ (em m)	Taxa de aço (%)
1	0,30	0,50	8	0,50	8,00	15	0,70	4,00
2*	0,30	1,14	9	0,50	0,50	16	0,70	8,00
3	0,30	4,00	10***	0,50	0,61	17	0,80	0,50
4	0,30	8,00	11	0,50	4,00	18*****	0,80	1,17
5	0,50	0,50	12	0,50	8,00	19	0,80	4,00
6**	0,50	0,51	13	0,70	0,50	20	0,80	8,00
7	0,50	4,00	14****	0,70	1,04	—	—	—

Legenda: *comparável com estacas do Grupo 2; **comparável com estacas do Grupo 3; ***comparável com estacas do Grupo 1; ****comparável com estacas do Grupo 4; *****comparável com estacas do Grupo 5; Φ = diâmetro de estacas

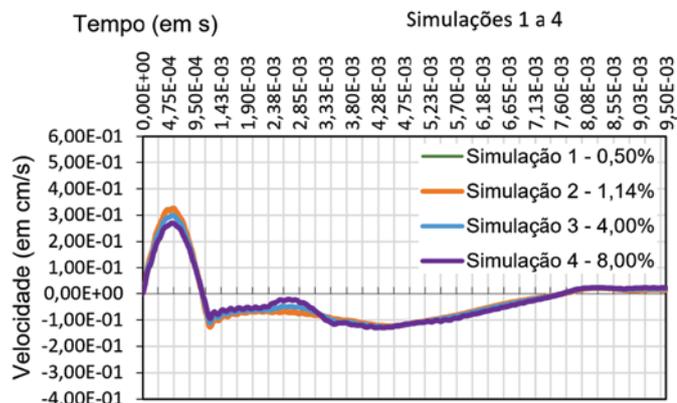


Figura 1
Reflectogramas obtidos nas simulações 1 a 4

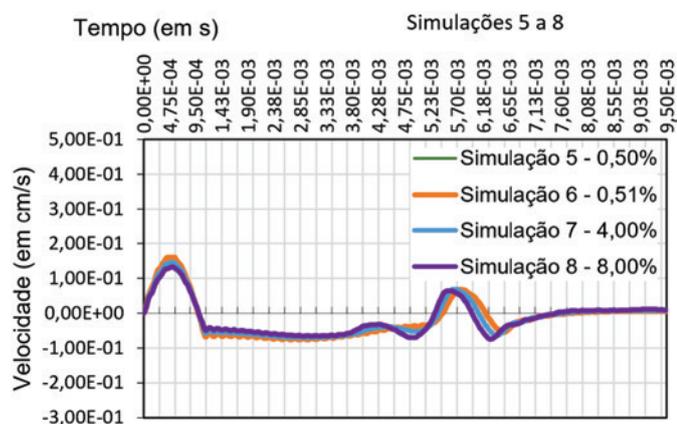


Figura 2
Reflectogramas obtidos nas simulações 5 a 8

4. Resultados e discussões

Da Figura 1 a Figura 5 estão indicados os resultados obtidos nas simulações 1 a 20, onde foi observado que as funções de amplificação dos sinais adotadas no tratamento dos resultados de campo e mantida nas simulações numéricas não foi suficiente para igualar a amplitude do sinal de ponta com a amplitude do sinal inicial.

Isso foi feito para permitir uma análise comparativa entre resultados de campo e as simulações. É possível demonstrar que, com isso, a análise pelo método Beta que é baseado na relação entre amplitudes dos picos observados no reflectograma proposto por Rausche e Goble [25] com obtenção gráfica de dados ficou prejudicada, em especial quando a transição do trecho armado para o não armado se situa a profundidades relevantes na estaca, quando a taxa de aço é elevada e quando os efeitos de amortecimento gerado pelo solo são altos.

Nos casos estudados, os valores de Beta calculados com auxílio da obtenção gráfica desse parâmetro diretamente dos reflectogramas indicados entre a Figura 1 e a Figura 5 são de 0,45% a 18,60% maiores que os valores de Beta obtidos analiticamente. Sendo assim, na Tabela 4 são indicados os valores de Beta que

são obtidos analiticamente ou graficamente com funções de amplificação corrigidas.

As simulações realizadas ilustram que a desconsideração da variação de módulo de elasticidade e massa específica entre o trecho armado e não armado podem resultar na falsa conclusão de

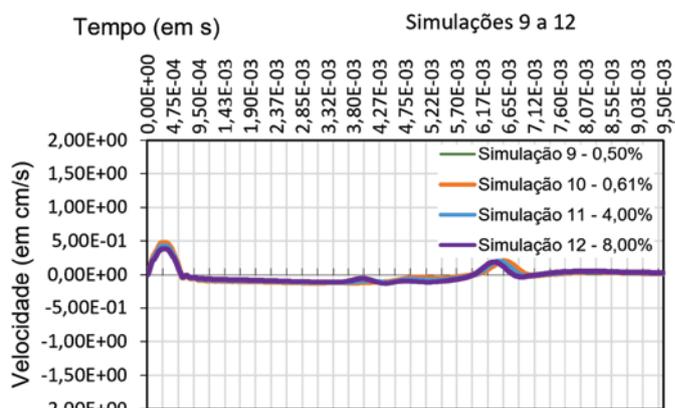


Figura 3
Reflectogramas obtidos nas simulações 9 a 12

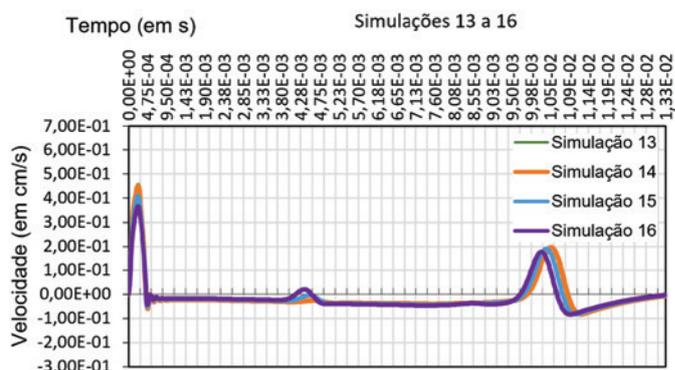


Figura 4
Reflectogramas obtidos nas simulações 13 a 16

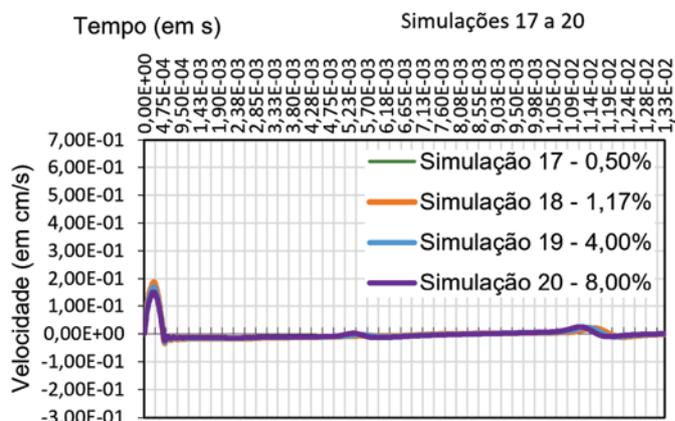


Figura 5
Reflectogramas obtidos nas simulações 17 a 20

que a estaca está danificada no ponto de transição. Para taxas convencionais de aço, abaixo de 4% (o que representa, ainda assim, uma alta densidade de armadura como por exemplo 9 barras de 20mm em uma estaca de 30cm de diâmetro) uma análise quantitativa pelo método Beta e classificada por Rausche e Goble [25] levaria à conclusão de leves danos à estaca.

4.1 Comparações com resultados de campo

Nos reflectogramas obtidos dos ensaios PIT realizados em campo foi possível identificar uma clara reflexão na região da ponta da armadura nas estacas do Grupo 2. Na Tabela 5 estão indicadas as amplitudes e os valores de Beta obtidos graficamente dos relatórios de cada uma das estacas que formam o grupo citado, assim como qual seria a classificação do dano por Rausche e Goble [25] desconsiderando a influência da armadura.

Das 32 estacas ensaiadas 12 apresentaram relações entre a amplitude da onda inicial gerada pelo golpe do martelo e a amplitude da variação de velocidade gerada na cota aproximada da ponta da armadura da estaca muito próximas das encontradas no modelo numérico. Vinte e uma (21) estacas apresentariam uma classificação por Rausche e Goble [25] igual à obtida numericamente (Levemente danificada), 10 classificação pior (dano significativo e seriamente danificada) e 1 seria classificada como íntegra. Usando

Tabela 4

Resumo dos valores de Beta (%) obtidos nas simulações 1 a 20

Simulação	Beta (%)	Classificação por Rausche e Goble (1979)
1	98,24	Levemente danificada
2	96,05	Levemente danificada
3	87,41	Levemente danificada
4	77,72	Significativamente danificada
5	98,31	Levemente danificada
6	98,27	Levemente danificada
7	87,98	Levemente danificada
8	78,61	Significativamente danificada
9	98,36	Levemente danificada
10	98,00	Levemente danificada
11	88,31	Levemente danificada
12	79,13	Significativamente danificada
13	98,24	Levemente danificada
14	96,41	Levemente danificada
15	87,55	Levemente danificada
16	77,93	Significativamente danificada
17	98,13	Levemente danificada
18	95,74	Levemente danificada
19	86,85	Levemente danificada
20	76,87	Significativamente danificada

Tabela 5

Resumo dos valores de Beta (%) obtidos nas estacas do Grupo 2

Estaca	Amplitude do pico inicial (cm/s)	Amplitude média do pico refletido (cm/s)	Beta (%)	Classificação
E37	0,547	0,162	74,20	Dano significativo
E38	0,690	0,098	86,74	Levemente danificada
E39	0,464	0,023	95,16	Levemente danificada
E40	0,545	0,122	79,87	Levemente danificada
E45	0,502	0,073	86,44	Levemente danificada
E46	0,300	0,256	40,19	Seramente danificada
E47	0,390	0,182	62,16	Dano significativo
E48	0,444	0,064	86,55	Levemente danificada
E49	0,312	0,064	81,40	Levemente danificada
E50	0,413	0,370	38,13	Seramente danificada
E51	0,373	0,200	57,72	Seramente danificada
E52	0,395	0,049	88,32	Levemente danificada
E53	0,624	0,143	79,44	Dano significativo
E54	0,372	0,020	94,76	Levemente danificada
E55	0,419	—	—	Sem danos
E68	0,487	0,049	90,42	Levemente danificada
E69	0,373	0,030	92,27	Levemente danificada
E70	0,494	0,106	80,62	Levemente danificada
E71	0,426	0,045	89,97	Levemente danificada
E72	0,279	0,068	78,27	Dano significativo
E73	0,516	0,167	72,14	Dano significativo
E74	0,375	0,068	83,37	Levemente danificada
E75	0,409	0,038	91,12	Levemente danificada
E76	0,270	0,024	91,49	Levemente danificada
E77	0,283	0,011	96,19	Levemente danificada
E78	0,313	0,016	95,02	Levemente danificada
E79	0,370	0,019	94,99	Levemente danificada
E80	0,301	0,015	95,14	Levemente danificada
E81	0,244	0,045	83,11	Levemente danificada
E82	0,276	0,083	73,86	Dano significativo
E85	0,426	0,042	90,60	Levemente danificada
E92	0,518	0,162	72,95	Dano significativo

a classificação proposta por Rausche e Goble [25], portanto, as 10 estacas com danos significativos e seriamente danificadas seriam motivo de ensaios adicionais ou até mesmo reforço. Entretanto, como explicitado nos parágrafos seguintes, a desconsideração, pelo método, da variação do módulo de elasticidade nos trechos armados e não armados da estaca somada a outros fatores como a densificação do concreto na ponta da armadura contribuem para que esses resultados sejam erroneamente interpretados.

Em média, foi verificada uma relação entre amplitudes inicial e na ponta da armadura menor do que a obtida numericamente (resultando em Beta médio igual a 81,37%) indiciando que no final do trecho armado possa haver uma tendência de maior densificação do concreto do que a teórica simulada (possivelmente devido ao confinamento gerado pelas barras) seguido de uma redução de densidade e módulo de elasticidade maiores que as teóricas no trecho não armado.

Um fator que ajuda a comprovar essa hipótese é que nas estacas E46, E50 e E55 foram realizadas provas de carga dinâmica com martelos de 13,6 kN cujos resultados de resistência máxima mobilizada (calculada pelo método CAPWAP) foram 924 kN, 869 kN e 1077 kN, respectivamente, todos satisfatórios portanto (carga de trabalho de 260 kN). Observa-se que as estacas E46 e E50 foram as que apresentaram o menor percentual Beta dentre as analisadas e a E55 o maior (não apresentou variações de impedância entre trecho armado e não armado) e, ainda assim, os resultados de resistência foram satisfatórios para todas. É menos provável, portanto, que as maiores amplitudes das ondas refletidas na transição do trecho armado para o não armado tenham sido geradas por grandes alterações de seção das estacas dado que não houve variação significativa de resistência entre as estacas que apresentaram maior variação de impedância (E46 e E50) da que apresentou a menor variação de impedância (E55).

Diferentemente do que ocorreu nas estacas do Grupo 2, nas estacas dos Grupos 1, 3, 4 e 5 não foi possível identificar uma clara

reflexão na transição do trecho armado para o não armado para comparação com as simulações numéricas 6, 10, 14 e 18. É difícil distinguir um pico de velocidade que possa ter sido causado pela variação de módulo de elasticidade e massa específica nesse local. Contribuem para isso: a transição entre o trecho armado e não armado nas estacas da simulação 2 (Grupo 2) estão mais próximas do topo da estaca (4,60 m) do que nas demais (pelo menos 8,00 m) e, portanto, o sinal refletido fica sujeito a menos amortecimento; as estacas das simulações 6, 10, 14 e 18 têm maior diâmetro e, conseqüentemente, os efeitos tridimensionais decorrentes da diferença de diâmetro entre a estaca e o martelo são mais evidentes; a taxa de aço é muito baixa para que haja um maior destaque das reflexões e nota-se que reflexões intermediárias geradas seja por variações de seção da estaca antes da transição entre o trecho armado e não armado seja por interferências externas dificultam a observação dessa variação de velocidade.

Sendo assim, nas comparações com resultados de ensaios PIT realizados em campo, das 32 estacas em que foi possível a identificação de um pico de velocidade próximo à transição entre o trecho armado e não armado (todas pertencentes ao Grupo 2 de estacas da presente pesquisa), 12 (37,5%) apresentaram relações entre a amplitude da onda inicial gerada pelo golpe do martelo e a amplitude da variação de velocidade gerada na cota aproximada da ponta da armadura da estaca muito próximas das encontradas no modelo numérico e, por conseguinte, das obtidas teoricamente. Com isso, em 21 das 32 estacas (65,63%), a análise da gravidade do possível dano pelo método Beta resultaria na mesma classificação tanto pela simulação numérica quanto pela análise dos resultados de campo, em 10 (31,25%) delas classificação pior e em 1 (3,13%) não foi possível identificar no reflectograma de campo uma variação perceptível na transição entre o trecho armado e não armado, caso em que as estacas seriam classificadas como íntegras naquele trecho, portanto. Em média foi verificada uma relação entre amplitudes inicial e na ponta da armadura menor do

Gráfico para classificação dos possíveis danos na transição entre trecho armado e não armado

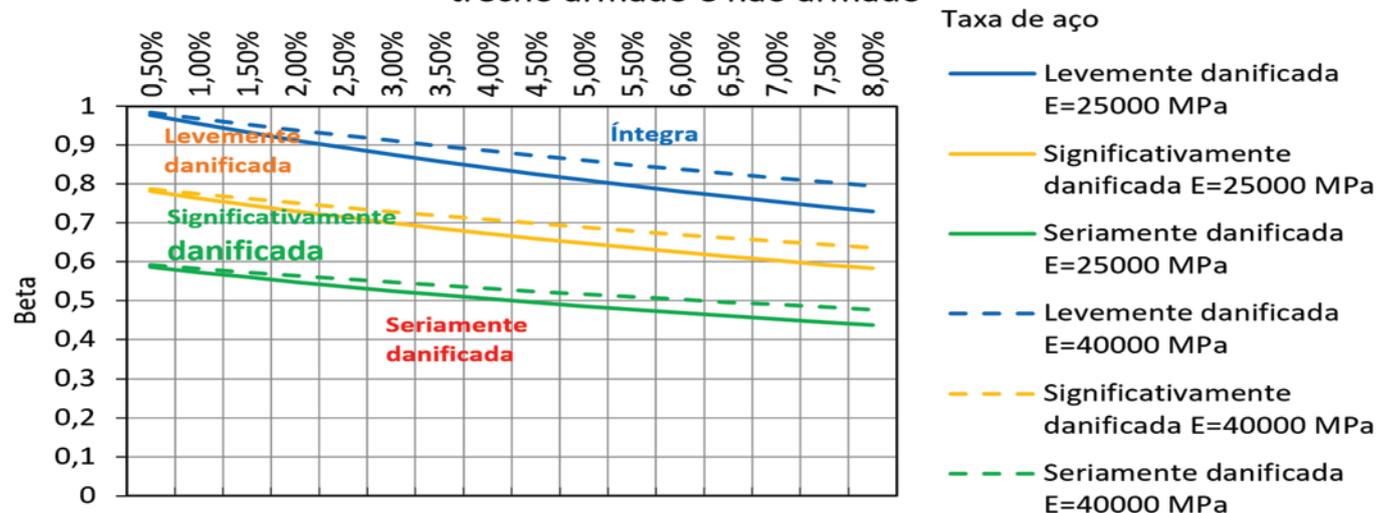


Figura 6 Classificação do possível dano na transição entre trecho armado e não armado

que a obtida numericamente (resultando em Beta médio igual a 81,37%). Ainda que em alguns casos as reflexões possam ter sido magnificadas por efeitos diversos que não exclusivamente gerados pela armadura, é possível afirmar que esses resultados indiciam que no final do trecho armado pode haver uma tendência de maior densificação do concreto (devido ao confinamento gerado pelas barras, pela presença de espaçadores da armadura e da armadura transversal) seguido de uma redução de densidade e módulo de elasticidade maiores que as teóricas no trecho não armado. Essa suposição pode ser corroborada em pesquisas futuras com a extração de testemunhos (core drilling tests) das estacas ensaiadas.

4.2 Nova classificação de potenciais danos na ponta da armadura da estaca

Conforme demonstrado anteriormente, a desconsideração da variação de módulo de elasticidade e massa específica entre o trecho armado e não armado podem resultar na falsa conclusão de que a estaca está danificada no ponto de transição, especialmente quando a estaca tem uma taxa de aço mais elevada. Uma nova classificação para análise de variações de impedância detectadas na transição do trecho armado para o não armado é proposta neste artigo, tendo em vista as seguintes variáveis:

- Módulo de elasticidade do concreto sem armadura;
- Massa específica do concreto sem armadura;
- Diâmetro da estaca;
- Taxa de aço (relação entre a área de aço e a área de concreto armado).

A variação da massa específica do concreto sem armadura tem baixa influência no cálculo de Beta e, portanto, nos resultados (mantido constante o módulo de elasticidade do concreto em uma estaca com 4% de taxa de aço e variando a massa específica do concreto simples de 2000 a 2500 kg/m³ obtém-se valores de Beta cuja diferença é de cerca de 1,4%). Adotou-se para a elaboração desse novo sistema de classificação, portanto, o valor da massa específica do concreto simples como sendo igual a 2400 kg/m³ [29].

Já o módulo de elasticidade tem uma influência maior. Quanto menor o módulo de elasticidade adotado para o concreto sem armadura, menor o Beta calculado e, portanto, menos favorável à segurança fica a proposta de um novo sistema de classificação. Como os valores variam significativamente considerando valores distintos de módulo de elasticidade para o concreto, optou-se por considerar esse fator como uma variável no sistema proposto. Sendo assim, foram feitas simulações considerando módulos de elasticidade para o concreto simples de 25000 MPa, 30000 MPa, 35000 MPa e 40000 MPa, dentro da faixa de valores, portanto, verificada em todas as simulações e ensaios de campo desta pesquisa.

Com isso, são feitas simulações e cálculos para obtenção do fator beta teórico na transição entre o trecho armado e não armado para cada taxa de aço simulada. Esse primeiro resultado oferece valores de Beta acima dos quais a estaca estaria íntegra (o pico de velocidade percebido na ponta da armadura inserida na estaca corresponderia simplesmente à variação teórica de módulo de elasticidade e massa específica de um trecho armado a um não armado e não à um dano efetivo na estaca).

Para completar o sistema de classificação há que se simular e

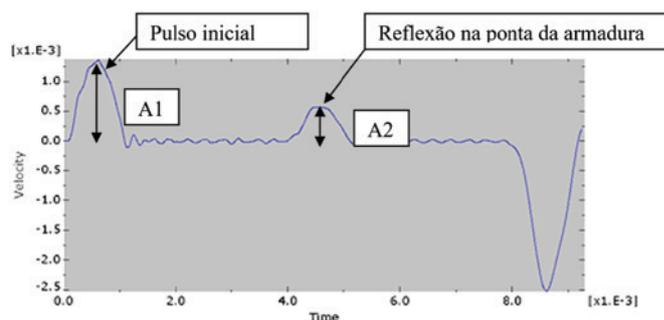


Figura 7

Indicação das amplitudes da onda inicial e onda refletida

calcular a faixa de valores de Beta que definiriam uma estaca com possíveis leves danos, com possíveis danos significativos e com possíveis sérios danos. Por retroanálise, mantendo constantes módulo de elasticidade e massa específica da estaca, é possível calcular que no sistema de classificação proposto por Rausche e Goble [25] foi considerado como possível leve dano na estaca uma variação de seção da estaca de até 20%, como um possível dano significativo uma variação de seção da estaca de até 40% e como danos sérios variações de seção acima desse valor.

Foram mantidos esses valores na classificação aqui proposta. Sendo assim, uma nova série de cálculos e simulações foram realizadas obtendo, para cada taxa de aço, quais seriam os valores obtidos para o fator Beta variando a seção da estaca em 20% e em 40%. O resultado de todas as simulações realizadas foi compilado no gráfico da Figura 6.

Portanto, de posse de um reflectograma de um ensaio PIT com clara reflexão de ponta, aplica-se uma função de amplificação de tal forma que a amplitude do sinal refletido na ponta da estaca se iguale à amplitude do sinal inicial (dada pelo golpe do martelo). Havendo uma reflexão intermediária que coincida com a ponta da armadura inserida na estaca, desconsidera-se a amplitude dessa reflexão do reflectograma. De posse desses dois valores (amplitude do pico de velocidade inicial e amplitude do pico de velocidade na transição do trecho armado ao não armado), aplica-se a Equação (6) para obtenção do valor de Beta, de acordo Bungenstab e Beim [3].

$$\beta = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \quad (6)$$

Onde:

α - relação entre a amplitude (A2) observada na transição do trecho armado ao não armado e o dobro da amplitude (A1) do pulso inicial (ver Figura 7).

De posse desse valor de "Beta", de uma estimativa do módulo de elasticidade dinâmico do concreto simples utilizado na estaca e da taxa de aço, verifica-se no gráfico correspondente (ver Figura 6) a classificação do possível dano na estaca. Se o ponto de encontro entre a taxa de aço e o "Beta" observado ficar na área em azul, a estaca pode ser considerada como possivelmente íntegra, na área em amarelo, há possível leve dano na estaca, na área em vermelho, possível dano significativo e na área em verde, possível

sério dano. Importante ressaltar que a classificação aqui proposta e a Figura 6 são válidas para picos de velocidade observados na cota da ponta da armadura inserida em uma estaca parcialmente armada (transição entre trechos armado e não armado).

Ressaltem-se as diferenças significativas de classificação das estacas em relação ao proposto por Rausche e Goble [25] especialmente para taxas de aço mais elevadas. Quanto aos gráficos, os mesmos foram gerados amparados amplamente em aspectos teóricos e em todo o embasamento relatado neste artigo. Ainda assim, é importante ressaltar que um eventual usuário dessa classificação deve conhecer todas as considerações relatadas em [30], as restrições e limitações do ensaio e, mesmo, reclassificar os danos.

5. Conclusões

A partir dos resultados do estudo realizado foram obtidas as seguintes conclusões:

- a) Foi percebido que qualquer análise baseada na avaliação de um possível dano em uma estaca pelo método Beta ou equivalente fica prejudicada sem a clara identificação da ponta no ensaio e a correta amplificação dos sinais de tal forma que a amplitude do sinal de ponta seja igual à amplitude do pico inicial gerado pelo golpe do martelo. Entretanto, quando a reflexão, quer seja pela armadura ou por algum dano na estaca, ocorre a poucos metros de profundidade, esse problema é minimizado visto que, próximo ao topo, o fator de amplificação em funções exponenciais é baixo (efeitos de amortecimento menores do que em profundidades mais elevadas).
- b) Na maior parte das estacas (Grupos 1, 3, 4 e 5) não ficou claramente evidente a partir do reflectograma do ensaio PIT realizado em campo, o surgimento de reflexão devido à variação de módulo de elasticidade e da massa específica entre os trechos. Contribuiu para a dificuldade de identificação dessa reflexão, as interferências de alta frequência, o maior amortecimento dos sinais em alta profundidade e a taxa de armadura relativamente baixa das estacas (até 1,17%). Nas estacas com menor diâmetro (0,30 m), com clara identificação de sinal de ponta, sem reflexões de sinal identificadas antes da ponta da armadura e com transição entre trecho armado para não armado a menor profundidade (até 4,60 m) foi possível identificar picos de velocidade no sinal indiciando uma variação de impedância que pode ser atribuída ao efeito da armadura inserida na estaca.
- c) As análises realizadas demonstram a possibilidade de ajuste da classificação dos potenciais danos nas estacas proposta por Rausche e Goble [25], baseada no método Beta, considerando a influência da armadura. Essa nova classificação foi proposta no item 4.2. Essa nova classificação pode ser testada em trabalhos futuros com posterior exumação das estacas ou amostragem rotativas para efetiva comprovação de campo da metodologia.

6. Agradecimentos

Os autores prestam agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento à pesquisa

através do Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Construção Civil (PPGECC) da UFPR, assim como à empresa Protec Engenharia de Projetos pela disponibilização dos dados utilizados.

7. Referências bibliográficas

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e Execução de Fundações – NBR 6122. Rio de Janeiro, 2010.
- [2] SCHAUER, M. & LANGER, S. Numerical simulations of pile integrity tests using a coupled FEM SBFEM approach. PAMM, v.12, s/n., 2012; p. 547-548.
- [3] BUNGENSTAB, F. C., & BEIM, J. W. (2015). Continuous Flight Auger (CFA) Piles – A Review of the Execution Process and Integrity Evaluation by Low Strain Test. Proceedings of the Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Buenos Aires, 2015, Anais, Buenos Aires, 2015, v.15, p.414-421.
- [4] ORDÓÑEZ, J. A. R., & BOTERO, V. H. R. (2010). Análisis espectral de propagación de ondas para análisis de pruebas de integridad de pilotes. Ingenieria y Universidad, v.10, n.2, 2010; p.139-153.
- [5] AMBROSINI, D., & EZEBERRY, J. Long piles integrity through Impact Echo technique. Proceedings of the Congreso Argentino de Mecánica Computacional, 24º, Buenos Aires, 2005, Anais, Buenos Aires, 2005, s/v., p.619-651.
- [6] CHAI, H.-Y., WEI C.-F., PHOON K.-K., & YANG Y.-M. Some observations on the performance of the signal matching technique in assessment of pile integrity. Journal of Nondestructive Evaluation, v.30, n. 4, p.246-258.
- [7] LUO, W., CHEN, F., & HU, J. Improvement of Low Strain Pile Integrity Test. Proceedings of the ASEE (American Society of Engineering Education) Conference, Beijing, 2010, Anais, Beijing, 2010, s/v., p. 583-589.
- [8] DING, X., LIU H., LIU J., & CHEN Y. Wave propagation in a pipe pile for low-strain integrity testing. Journal of Engineering Mechanics, v.137, n 9., 2011; p.598-609.
- [9] COSIC, M., FOLIC, B., & FOLIC, R.. Numerical simulation of the pile integrity test on defected piles. Acta Geotechnica Slovenica, v.11, s/n., 2014; p.4-19.
- [10] WANG, Z., WU, Y., & XIAO, Z. Numerical Assessment of Factors Affecting Waveform Based on Low Strain Testing of Piles. Open Civil Engineering Journal, v.8, s/n., 2014; p.64-70.
- [11] HETLAND, J. (2015). Numerical Modelling of a Pile Model Test with Focus on Small-strain Stiffness. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Departamento de engenharia civil e de transporte, Norwegian University of Science and Technology, 130p..
- [12] HOU, S.-W., HU S.-J., GUO S.-P., & ZENG Y.-Q. (2016) The Research of Multi-defective Piles for Low Strain Testing and Numerical Simulation. Structures Congress, 16º, Jeju Island, 2016, Anais, Jeju Island, 2016, s/ v., p.1-8.
- [13] LIANG, L., RAUSCHE, F. (2011) Quality Assessment Procedure and Classifications of Cast-in-Place Shaft using Low Strain Dynamic Test. Deep Foundations Institute Annual Conference on Deep Foundations, 36º, Boston, 2011, Proceedings, Boston, 2011, s/ v., p.553-562.

- [14] WEBSTER, K.; RAUSCHE F.; WEBSTER, S. (2011) Pile and Shaft Integrity Test Results Classification, Mitigation, Acceptance, and/or Rejection. In: Transportation Research Board, 90^o, 2011.
- [15] CUNHA, R.P.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; SILVA, C.M. (2002) Controle de qualidade e aceitação de estacas moldadas in loco via utilização de ensaios de integridade de estacas (PIT). Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 12^o, São Paulo, 2002, v.3, p. 1569-1579.
- [16] SMITH, E.A.L. Pile-Driving Analysis by the wave equation. ASCE Paper, v.127,s/n^o, 1964; p.1145.
- [17] LYSMER, J.F.E.R., & RICHART, F.E. Dynamic Response of Footings to Vertical Loading. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, v.92, n^o1, 1966; p.65-91.
- [18] NOVAK, M. Dynamic stiffness and damping of piles. Canadian Geotechnical Journal, v.11, n.4, 1974 p.574-598.
- [19] SIMONS, H.A., & RANDOLPH, M.F. (1984). A New Approach to One-Dimensional Pile Driving Analysis, Cambridge: Cambridge Univ., Engineering Dep, v. 159, 1984.
- [20] YU, C.-P., & LIAO, S.-T. Theoretical basis and numerical simulation of impedance log test for evaluating the integrity of columns and piles. Canadian geotechnical journal, v.43, n.12, 2006; p.1238-1248.
- [21] NEWMARK, N. M. A method of computation for structural dynamics. Journal of Engineering Mechanics - ASCE, v.85, n.3, 1959; p.67-94.
- [22] HILBER, H. M., HUGHES, T. JR., & TAYLOR, R. L. Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, v.5, n. 3, 1977; p. 283-292.
- [23] LIAO, S. T., & ROESSET, J. M. Dynamic response of intact piles to impulse loads. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, v.21, s/n., 1997; p.255-275.
- [24] FINNO, R. J., GASSMAN, S. L., & OSBORN, P. W. (1997). Non-destructive evaluation of a deep foundation test section at the Northwestern University national geotechnical experimentation site. (Relatório/1997), Federal Highway Administration Office, Northwestern University, Evanston, Illinois, EUA, 306p.
- [25] RAUSCHE, F., & GOBLE, G. Determination of pile damage by top measurements. American Society for Testing and Materials: Philadelphia, n.670, 1979; p.500-506.
- [26] BOWLES, J. E. (1977) Foundation analysis and design – McGraw Hill, Ltda.
- [27] KORMANN, A. C. M. (2002) Ensaio de integridade de estacas (PIT) – conceitos básicos. Workshop Controle de Qualidade de Fundações através de Provas de Carga Dinâmicas e Verificação de Integridade Estrutural, Sinduscon-SP e ABMS. São Paulo, 2002.
- [28] STROUD, M. A. (1989) The standard penetration test – its application and interpretation. Conference on Penetration Testing in the UK, Londres, 1989. Anais... Londres: Thomas Telford, 1989.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento – NBR 6118. Rio de Janeiro, 2014.
- [30] PASQUAL, R.P.S. (2018) Ensaio de baixa deformação para avaliação da integridade de estacas (PIT)—desenvolvimento de modelos numéricos por elementos finitos e contribuições às análises de resultados. Dissertação (Mestrado Engenharia de Construção Civil)—Universidade Federal do Paraná, 2018, 209 p..