

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GUSTAVO ANDRÉ SINHORINI

**ESTUDO NUMÉRICO DA AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE DE ESTACAS DE
CONCRETO COM O ENSAIO *PILE INTEGRITY TEST* (PIT)**

CAMPO MOURÃO
2017

GUSTAVO ANDRÉ SINHORINI

**ESTUDO NUMÉRICO DA AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE DE ESTACAS DE
CONCRETO COM O ENSAIO *PILE INTEGRITY TEST* (PIT)**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior em Engenharia Civil, Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Carreira

CAMPO MOURÃO
2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Coordenação de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso

**ESTUDO NUMÉRICO DA AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE DE ESTACAS DE CONCRETO
COM O ENSAIO *PILE INTEGRITY TEST* (PIT)**

por

GUSTAVO ANDRÉ SINHORINI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 15:50h do dia 05 de dezembro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof^ª. Dr. Ewerton Clayton Alves da Fonseca

(UTFPR)

Prof. Dr. Douglas Fukunaga Surco

(UTFPR)

Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Carreira

(UTFPR)

Orientador

Responsável pelo TCC: **Prof. Me. Valdomiro Lubachevski Kurta**

Coordenador do Curso de Engenharia Civil:

Prof. Dr. Ronaldo Rigobello

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que sempre me sustentou ao longo de todos estes anos com sua infinita misericórdia e graça. A Ele seja toda glória.

Aos meus pais Kirk e Selma que sempre foram suporte tanto nos momentos ruins quanto nos bons. Agradeço por terem acreditado, confiado e investido em mim. Também ao meu irmão Thales o qual sempre admirei pela determinação e garra. Aos meus avós Leoclides, Zilda, Ercilio e Hermínia pelo apoio e incentivo durante a minha caminhada.

Aos bispos Etelvino e Gorete, aos pastores Wellington e Letícia pelo incentivo tanto em palavras quanto em orações. Obrigado por todas as palavras de incentivo e fé. A minha namorada Amanda pelo apoio nesses últimos meses.

Ao meu orientador professor Dr. Marcelo Rodrigo Carreira pelo apoio e orientação ao longo desse trabalho. O senhor é um exemplo a ser seguido como profissional.

A todo o corpo docente da Coordenação de Engenharia Civil pelo conhecimento transmitido durante a minha formação profissional.

A Universidade Estadual de Maringá pela disponibilização do software Abaqus para a realização de todas as simulações presentes neste trabalho.

Por fim, a todos os meus amigos que estiveram presentes nesses anos, em especial aos amigos que fiz durante o curso, Josué, Tainã, Paulo Roberto, Tati e Matheus. Sempre me lembrarei de cada um de vocês e desejo sejam muito felizes em tudo o que fizerem.

RESUMO

SINHORINI, Gustavo A. **Estudo numérico da avaliação de integridade de estacas de concreto com o ensaio *pile Integrity test* (PIT)**. 2017, 50 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2017.

As fundações são parte fundamental de uma construção, sendo estas as responsáveis por transmitir a carga da estrutura para o solo. Dentre os diversos tipos de fundação, as estacas em concreto são amplamente utilizadas na construção civil podendo estas serem moldadas *in loco* ou ainda pré-fabricadas e posteriormente cravadas no solo. Durante o processo de execução das estacas, podem surgir danos ao longo do fuste devido a falhas de execução que, se não detectados previamente, podem vir comprometer parcial ou totalmente estes elementos de fundação e conseqüentemente toda a edificação. Diante disso, o ensaio de vibração longitudinal de baixa deformação, ou PIT, apresenta-se como uma valiosa ferramenta para a obtenção de um maior controle de qualidade do estaqueamento. Com este ensaio é possível detectar danos ao longo do fuste da estaca, permitindo assim a identificação e correção de possíveis danos ainda na fase de execução. Desta forma, este trabalho tem por objetivo estudar e compreender a fundamentação teórica do ensaio PIT, bem como suas potencialidades e limitações e, através de simulação numérica, exemplificar a aplicação do ensaio em estacas íntegras e com defeitos ao longo do fuste. Os resultados obtidos foram coerentes quando comparados com a bibliografia, apresentando limitações quanto à modelagem do solo.

Palavras Chave: Fundações; Estacas; PIT; Integridade; Elementos Finitos.

ABSTRACT

SINHORINI, Gustavo A. **Numerical study of the evaluation of the integrity of concrete piles with the test pile integrity test (PIT)**. 2017, 50 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2017.

The foundations are a fundamental part of a construction, and these are responsible for transmitting the structural load to the soil. Among the various types of foundation, concrete piles are widely used in civil construction and can be molded in situ or pre-fabricated and later driven in the ground. During the execution of the piles, damages can occur along the shaft due to failures of execution which, if not previously detected, may partially or totally compromise these foundations elements and consequently the whole building. Therefore, the Pile Integrity Test, or PIT, is a valuable tool to obtain a better control of the quality of the piles. Through this test it is possible to detect failures along the shaft of the pile, thus allowing identification and correction of possible damages still in the execution phase. In this way, this work aims to study and understand the theoretical basis of the PIT test, as well as its limitations and, through numerical simulation, to exemplify the application of the test in intact piles and with variations along the shaft. The results obtained were consistent when compared with the literature, presenting limitations on soil modeling.

Keywords: Foundations; Piles; PIT; Integrity; Finite Element.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Cravação de estaca pré-fabricada</i>	17
<i>Figura 2 - Representação da execução de estaca Franki, como um exemplo de estacas moldadas in loco com cravação de revestimento. (1) Perfuração; (2) instalação da armadura; (3) concretagem; (4) estaca pronta</i>	18
<i>Figura 3 - Representação das etapas construtivas da estaca hélice contínua (exemplo de estacas com trado helicoidal). (1) Escavação; (2) retirada do trado e lançamento de concreto; (3) retirada lenta do trado e lançamento de concreto; (4) colocação de reforço</i>	18
<i>Figura 4 - Representação esquemática do ensaio PDA</i>	21
<i>Figura 5 - Representação esquemática do ensaio PIT</i>	22
<i>Figura 6 – Ensaio PIT e coletor de sinal</i>	24
<i>Figura 7 - Exemplo típico de um reflectograma onde é mostrado a velocidade em função do tempo</i>	25
<i>Figura 8 - Vibração longitudinal de uma barra</i>	28
<i>Figura 9 - Elemento infinitesimal da barra</i>	28
<i>Figura 10 - Exemplos de sinais típicos da variação da impedância da estaca. (a) redução na impedância; (b) aumento na impedância; (c) redução na impedância próximo ao topo com reflexões secundárias; (d) aumento redução da impedância próximo ao topo com reflexões secundárias</i>	33
<i>Figura 11 - Perfil do terreno adotado caracterizado por sondagem à percussão SPT, realizada em Campo Mourão - PR</i>	35
<i>Figura 12 - Modelo da estaca</i>	38
<i>Figura 13 - Modelo do solo</i>	39
<i>Figura 14 - Pontos de aplicação e recepção do impulso aplicado</i>	39
<i>Figura 15- Representação da estaca envolta no solo</i>	40
<i>Figura 16 - Estaca íntegra envolta em duas camadas de solo</i>	41
<i>Figura 17 - Estaca íntegra envolta em uma camada de solo</i>	42
<i>Figura 18 - Estaca com aumento súbito de seção</i>	43
<i>Figura 19 - Estaca com redução súbita de seção</i>	43
<i>Figura 20 - Estaca com trinca na profundidade 8 metros</i>	44
<i>Figura 21 - Representação da superfície gerada para simulação da trinca</i>	44
<i>Figura 22 - Representação trinca na estaca</i>	45

<i>Figura 23 - Reflectograma referente à estaca íntegra envolta em duas camadas de solo e filtrado a 800 Hz</i>	<i>46</i>
<i>Figura 24 - Reflectograma não filtrado da estaca íntegra</i>	<i>47</i>
<i>Figura 25 - Reflectograma referente à estaca íntegra envolta em uma camada de solo filtrada a 800 Hz</i>	<i>47</i>
<i>Figura 26 - Reflectograma referente à estaca com aumento de seção filtrada a 800 Hz</i>	<i>48</i>
<i>Figura 27 - Reflectograma referente à estaca com aumento de seção filtrada a 1000 Hz.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 28 - Reflectograma referente à estaca com aumento de seção filtrada a 1200 Hz.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 29 - Reflectograma referente à estaca com diminuição súbita de seção filtrada a 800 Hz.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 30 - Reflectograma referente à estaca com diminuição súbita de seção filtrada a 1000 Hz.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 31 - Reflectograma referente à estaca com diminuição súbita de seção filtrada a 1200 Hz.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 32 - Reflectograma referente à estaca com trinca filtrada a 800 Hz</i>	<i>52</i>
<i>Figura 33 - Reflectograma estaca com trinca filtrada a 1000 Hz.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 34 - Reflectograma estaca com trinca filtrada a 1200 Hz.....</i>	<i>53</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Classificação Beta de integridade das estacas</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 2 – Classificação recomendada das estacas de concreto via ensaio PIT</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 3 – Condições de contorno comuns para uma barra longitudinal submetida à vibração longitudinal.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 4 – Coeficiente alfa.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 5 – Coeficiente K.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 6 – Comparação da variação do reflectograma devido à filtragem</i>	<i>53</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS.....	11
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 OBJETIVO GERAL.....	13
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS FUNDAÇÕES.....	14
3.1.1 <i>Fundações rasas</i>	15
3.1.2 <i>Fundações profundas</i>	15
3.2 FUNDAÇÕES EM ESTACAS	15
3.2.1 <i>Métodos executivos de estacas de concreto</i>	16
3.3 CONTROLE DE QUALIDADE DE ESTACAS DE CONCRETO	19
3.4 AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE ESTACAS DE CONCRETO	19
3.4.1 <i>Pile Driving Analyzer (PDA)</i>	20
3.4.2 <i>Pile Integrity Testing (PIT)</i>	21
3.5 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO PIT	27
3.5.1 <i>Propagação de onda longitudinal em uma barra</i>	27
3.5.2 <i>Análise de sinais para obtenção do reflectograma</i>	31
3.5.3 <i>Efeitos da variação da impedância no reflectograma</i>	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1 DEFINIÇÃO DO PERFIL DO TERRENO	34
4.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES	36
4.3 MODELAGEM NUMÉRICA VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	37
4.5 DEFEITOS SIMULADOS.....	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
6. CONCLUSÕES.....	54
7. REFERÊNCIAS.....	56

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

Em qualquer obra, a fundação é o item que suporta toda a carga estrutural e a transmite ao terreno. Erros na escolha, no dimensionamento ou na execução das fundações podem gerar transtornos e riscos, além do alto custo para reforços e reparos.

As fundações profundas, em particular as estacas de concreto, são amplamente utilizadas na construção civil, sendo estas moldadas *in loco* ou ainda pré-fabricadas e posteriormente cravadas no solo por meio de equipamento bate estaca. Porém, durante o processo de execução da fundação em estacas, sejam as moldadas no local ou as pré-moldadas, podem ocorrer danos que, se não devidamente detectados podem vir a comprometer totalmente a construção e por consequência, todo o investimento empregado.

Após a conclusão do estaqueamento de uma obra, é necessário verificar se as estacas atendem às especificações de projeto. Ante a isso, a NBR 6122:2010, sugere que sejam executados ensaios para a verificação do desempenho das fundações, como a capacidade de carga bem como a integridade das estacas. A capacidade de carga é verificada pelos ensaios de carregamento estático e dinâmico de alta deformação (PDA), porém, além destes ensaios possuírem um custo elevado, costumam causar dificuldade de movimentação dos equipamentos dentro do canteiro de obra.

Diferentemente, o ensaio de vibração longitudinal de baixa deformação, ou PIT, apresenta-se como uma boa alternativa, principalmente pela facilidade de execução e custo inferior aos ensaios estáticos ou até mesmo dos dinâmicos de alta deformação, sendo que o PIT fornece apenas a verificação da integridade do fuste da estaca, não excluindo a necessidade de execução de ensaios que verifiquem a capacidade de carga.

O PIT além de ser um ensaio não destrutivo, ou seja, não danifica a estrutura durante a execução de ensaio, permite que uma grande quantidade de estacas seja ensaiada e verificada no mesmo dia, e caso haja alguma suspeita maior quanto a determinada estaca, aplica-se o ensaio estático ou dinâmico de alta deformação.

Por esse motivo, o estudo do ensaio PIT como ensaio para avaliação de estacas torna-se de grande importância uma vez que o mesmo torna possível a

identificação e a correção de possíveis danos ou defeitos ainda na fase de execução das fundações da obra. Além disso, este estudo torna-se importante para compreender as limitações e as simplificações que são adotadas durante a modelagem do sistema solo-estaca para a simulação numérica.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar as potencialidades e limitações do ensaio dinâmico de vibração longitudinal de baixa deformação, mais conhecido como PIT (*Pile Integrity Test*), na avaliação da integridade de estacas de concreto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender os fundamentos teóricos do ensaio de vibração longitudinal;
- Exemplificar, por meio de simulação numérica, a aplicação do ensaio PIT na avaliação da integridade de estacas de concreto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As fundações são os elementos que sustentam toda a infraestrutura, portanto, necessitam de grande atenção. Durante o processo de instalação podem ocorrer danos ao longo das estacas, comprometendo a capacidade de estas atuarem de maneira eficaz, para as quais foram projetadas.

A partir disso, e através da utilização dos conceitos da equação da onda, pesquisadores pioneiros como Isaacs¹ (1931, apud Alves, Danziger, 2008) e Smith² (1960, apud Alves, Danziger, 2008), desenvolveram estudos que permitiram a utilização destes conceitos para verificação tanto da capacidade de carga quanto para verificação da presença de defeitos ao longo do fuste. Tais estudos vieram para contribuir muito com o controle de qualidade das fundações.

Segundo Valinho et.al (2006), acredita-se atualmente que a segurança e a confiabilidade dos elementos de fundação estão mais associadas ao processo executivo do que ao projeto. Portanto, o controle de qualidade na execução das fundações é fundamental para que haja uma eficiente transmissão das cargas para o solo.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS FUNDAÇÕES

De acordo com Cintra e Aoki (2010), a fundação é o sistema formado pelo elemento estrutural (estaca) e o elemento geotécnico (maciço que envolve a estaca). Portanto é uma combinação entre boa resistência estrutural aos esforços solicitantes, e também uma adequada rigidez do solo que evite deformações excessivas. A classificação do elemento estrutural de fundação é feita de acordo com a maneira como ocorre a transferência da carga para o solo e onde ela se apoia. Desta forma, elas podem ser classificadas em diretas (ou rasas) e indiretas (ou profundas).

¹ Isaacs, D.V. (1931). "Reinforced Concrete Pile Formulae" Journal of the Institution of Engineers Australia, Vol 3, N.9, pp.305-323.

² Smith, E.A.L. (1960). "Pile Driving Analysis by the Wave Equation". ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, Vol. 86, N. SM4, pp.35-61.

3.1.1 Fundações rasas

De acordo com norma NBR 6122:2010, as fundações rasas são aquelas nas quais a carga é transmitida ao terreno, predominantemente pelas tensões distribuídas sob a base da fundação. Nestas fundações, a cota de assentamento em relação ao nível do terreno adjacente é inferior a duas vezes a menor dimensão em planta da fundação. De acordo com Velloso e Lopes (1998), enquadram-se neste grupo os blocos, sapatas, vigas de fundação, grelha, sapatas associadas e o radier.

3.1.2 Fundações profundas

Ainda de acordo com a norma NBR 6122:2010, as fundações indiretas são aquelas que transmitem as cargas ao terreno ou pela base (resistência de ponta) ou pela superfície lateral (resistência de fuste) ou ainda por uma combinação das duas. À medida que se aplica um aumento gradativo de carga, são mobilizadas tanto as tensões laterais quando as normais à base (AOKI; CINTRA, 2010). Velloso e Lopes (1998) enquadram as estacas, os tubulões e caixões como exemplos de fundações profundas. De acordo com a norma NBR 6122:2010, este tipo de fundação deve ainda estar assente em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão em planta, e no mínimo a 3 m em relação do nível do terreno.

3.2 FUNDAÇÕES EM ESTACAS

As estacas são, segundo a norma NBR 6122:2010, elementos de fundação profunda que são executados inteiramente por equipamentos ou ferramentas, sem que haja a necessidade de descida de pessoas, como no caso do tubulão. São caracterizadas pela solicitação tanto da resistência lateral quanto de ponta. Estes elementos podem ainda ser fabricados com diferentes materiais, tais como o aço, madeira, concreto ou ainda de forma mista entre os materiais citados.

De acordo com Décourt (1998), as estacas ainda podem ser agrupadas em dois grupos: estacas de deslocamento e estacas escavadas. As de deslocamento são as estacas introduzidas no terreno por algum processo que não promova a retirada

de solo. Já as estacas escavadas são aquelas que são executadas no próprio local ou *in situ* através da perfuração do terreno por algum processo qualquer que envolva a retirada desse material, com ou sem revestimento e com ou sem a utilização de fluido estabilizante.

3.2.1 Métodos executivos de estacas de concreto

As estacas de concreto podem ser moldadas *in loco* ou pré-moldadas. As estacas moldadas *in loco* enquadram-se na categoria de estacas escavadas e por isso, necessitam da retirada de solo e subsequente preenchimento do vazio com concreto simples ou armado (NBR 6122:2010). Alguns exemplos de estacas que se encaixam nessa categoria são: estacas tipo broca, Strauss, Franki, estacas ômega, hélice contínua, estacas raiz, dentre outras. Já as estacas pré-moldadas enquadram-se dentro da classificação das estacas de deslocamento, sem a retirada do solo. Exemplos de estacas pré-moldadas são: concreto pré-moldados (seções quadradas), concreto centrifugado (seções cilíndricas), concreto protendido (seções quadradas) e estacas mega (GONÇALVES; MARINHO; FUTAI, 2014).

Para Likins (2011), qualquer fundação profunda necessita tanto de uma boa estrutura quanto de uma boa capacidade geotécnica do solo. A falta de uma das duas condições, pode gerar problemas que necessitem de remediações que possuem alto custo. O projeto e a execução de fundações é normatizado pela NBR 6122:2010 que recomenda e cita os principais métodos de execução dos elementos de fundação, dentre eles, as estacas. Para Hertlein e Davis (2006), para uma boa compreensão dos defeitos que possam surgir nas estacas, torna-se necessário um bom conhecimento e entendimento dos métodos de instalação e execução das mesmas. Ainda segundo Hertlein e Davis (2006), a probabilidade de um defeito aparecer, sua natureza, causa e provável influência na capacidade de carga da estaca são todas variáveis que mudam de acordo com o método executivo adotado.

De acordo com Hertlein e Davis (2006), existem basicamente 4 métodos comumente adotados para a execução de estacas, existindo ainda variações desses métodos. Todos os métodos construtivos modernos são baseados em um desses métodos, sendo eles:

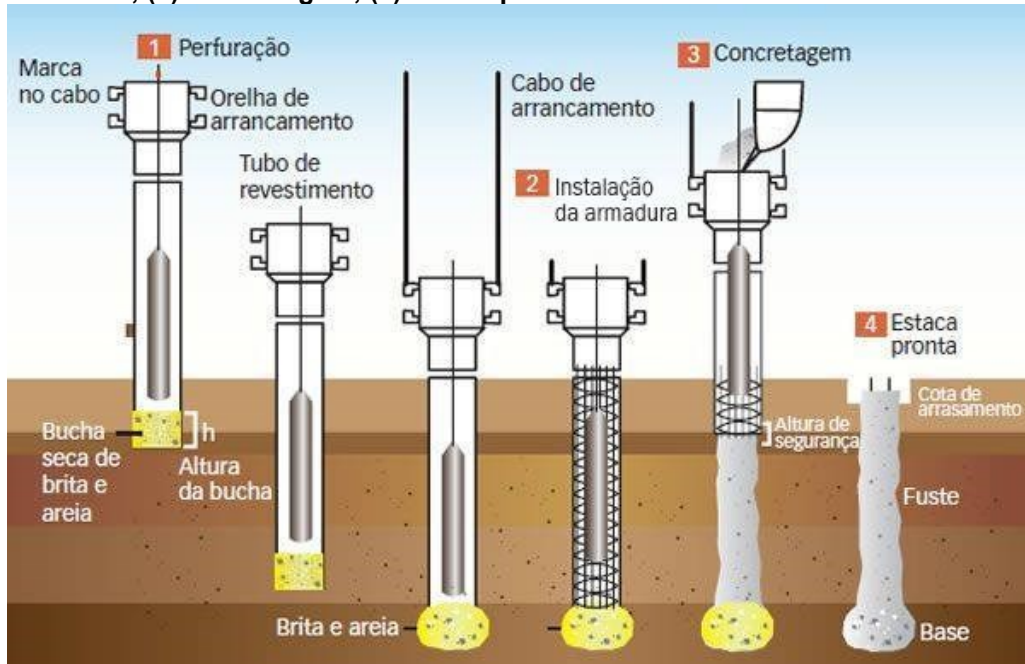
- Estacas cravadas: são estacas pré-fabricadas que são cravadas no solo por impacto ou vibração. A Figura 1 mostra a cravação de uma estaca pré-moldada.
- Estacas fabricadas *in loco*: um revestimento metálico e oco é cravado no solo, preenchido pelo material de fundação e posteriormente retirado, como exibido na Figura 2;
- Estacas escavadas: após a escavação do solo, este espaço é preenchido pelo material de fundação;
- Estaca moldada *in loco* por trado helicoidal: um trado é parafusado no solo e o material de fundação passa através do trado à medida que o trado é retirado lentamente, como mostrado na Figura 3.

Figura 1 - Cravação de estaca pré-fabricada



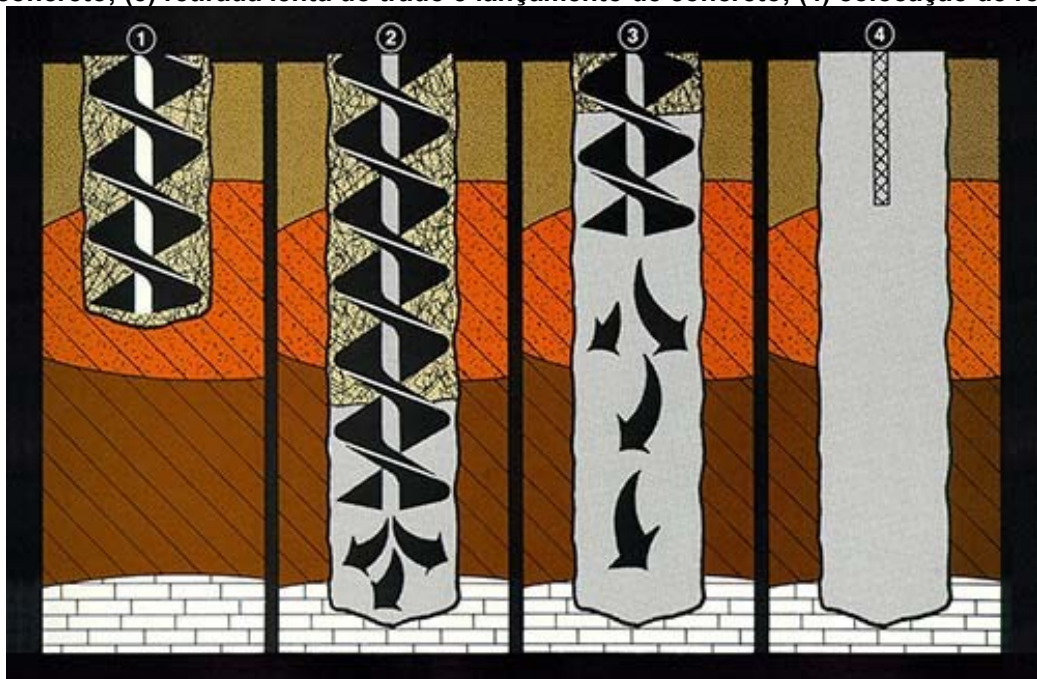
Fonte: Adaptado de Serki Fundações Especiais.

Figura 2 - Representação da execução de estaca Franki, como um exemplo de estacas moldadas in loco com cravação de revestimento. (1) Perfuração; (2) instalação da armadura; (3) concretagem; (4) estaca pronta



Fonte: Nakamura (2013).

Figura 3 - Representação das etapas construtivas da estaca hélice contínua (exemplo de estacas com trado helicoidal). (1) Escavação; (2) retirada do trado e lançamento de concreto; (3) retirada lenta do trado e lançamento de concreto; (4) colocação de reforço



Fonte: West Coast Foundation, Florida.

3.3 CONTROLE DE QUALIDADE DE ESTACAS DE CONCRETO

Para Likins (2011), qualquer fundação necessita ser executada de maneira segura tanto do ponto de vista estrutural quanto geotécnico. Durante o processo de execução, alguns danos podem surgir ao longo do fuste fazendo com que a integridade ou a capacidade de carga da estaca sejam seriamente comprometidas.

De acordo com Rausche, Likins e Hussein (1988), durante o processo de cravação podem surgir danos resultantes da alta tensão axial ou devido à flexão ao longo do fuste, tensão esta que é causada pela combinação entre o alto impacto gerado pelo martelo, como também pela resistência do solo (HUSSEIN; LIKINS, 2005). Já nas estacas que são moldadas *in loco*, danos podem aparecer como estrangulamento, presença de espaços vazios ao longo do fuste, separação do concreto, dentre outros. E mesmo após a instalação, as estacas podem ser danificadas devido à movimentação lateral do solo consequente da presença de equipamentos pesados, ou falhas de muros de contenção. Pela possibilidade de aparecimento de danos nas estacas, torna-se indispensável a execução de ensaios que forneçam informações à cerca da qualidade, integridade e capacidade de carga das estacas.

A norma ABNT 6122:2010 recomenda a execução de ensaios de carregamento estático e dinâmico para a inspeção e verificação tanto da integridade como da capacidade de carga. No entanto, no caso das estacas, segundo Rausche, Likins e Hussein (1988), a aplicação de ensaio estático em todas as estacas torna-se impraticável tanto pelo alto custo, quanto pela própria dificuldade de movimentação dos equipamentos dentro do canteiro de obra.

3.4 AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE ESTACAS DE CONCRETO

Alternativamente, de acordo com Medeiros (2005), a verificação da capacidade de carga e da integridade das estacas podem utilizar os ensaios dinâmicos não destrutivos, que além de apresentarem menor custo comparado com o ensaio estático, são mais ágeis. Os ensaios dinâmicos não destrutivos são divididos em ensaios de alta e de baixa deformação sendo que no ensaio de alta deformação, a capacidade de carga da estaca é estimada a partir da análise dinâmica da estaca

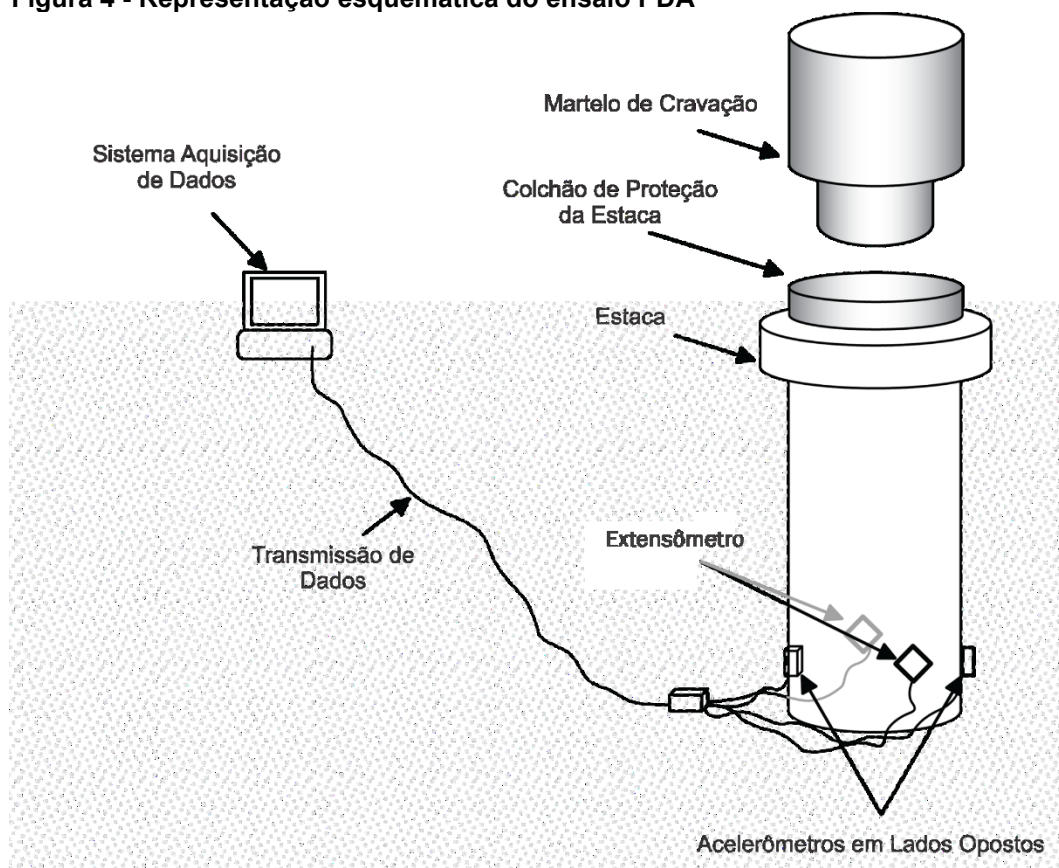
quando sujeita a um impacto causado por um peso. Já no ensaio de baixa deformação, avalia-se a velocidade de propagação da onda de choque gerada pelo impacto de um martelo portátil no topo da estaca, a fim de verificar sua integridade.

Já o ensaio de baixa deformação é realizado através de um impacto na extremidade superior da estaca por um martelo portátil que é usado para a verificação da integridade do fuste, sendo que para isso avalia-se a velocidade de propagação da onda de choque gerada através da estaca. Dois ensaios são apresentados:

3.4.1 *Pile Driving Analyzer (PDA)*

O PDA é um ensaio de alta deformação que produz força e movimento mediante a queda de um corpo com elevada massa e essas informações são registradas pelo sistema P.D.A. (LIKINS et al.,1993). Este ensaio é comumente executado durante a cravação da estaca, sendo também possível sua execução em estacas escavadas. O P.D.A., segundo Globe (1980 apud LIKINS et al.,1993) ainda fornece informações adicionais às fornecidas pelos ensaios estáticos convencionais, como a avaliação e controle da atuação do martelo utilizado na cravação, as tensões de cravação e a integridade da estaca. A Figura 4, representa esquematicamente a instrumentação do ensaio PDA, representando os extensômetros da estaca e os acelerômetros que são responsáveis por registrar a aceleração da onda que percorre o fuste.

Figura 4 - Representação esquemática do ensaio PDA



Fonte: Adaptado Hertlein e Davis (2006).

3.4.2 Pile Integrity Testing (PIT)

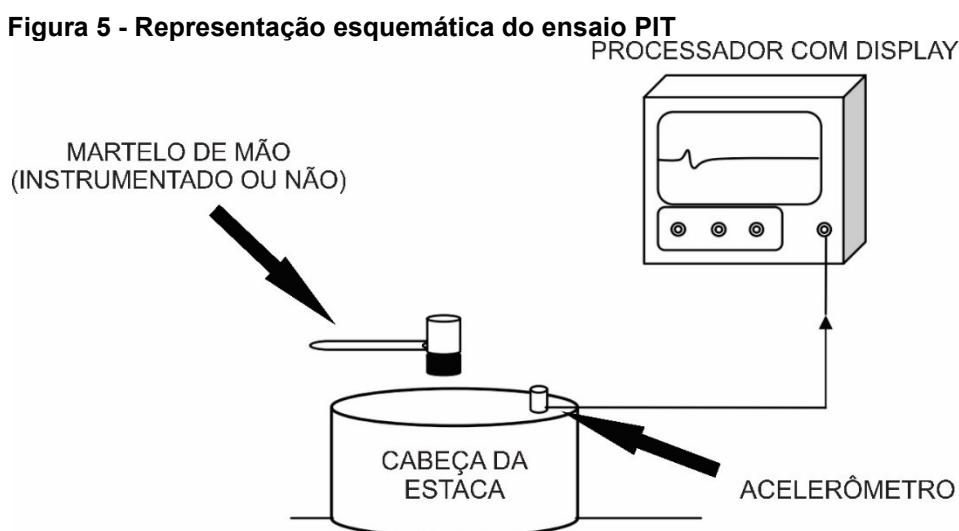
O teste de integridade de estacas (*Pile Integrity Testing*) é um ensaio dinâmico de baixa deformação que pode ser executado tanto em estacas tipo hélice contínua, estacas moldadas *in situ* ou pré-fabricadas. O ensaio detecta defeitos potencialmente perigosos, como fissuras significativas, redução no diâmetro e descontinuidades ao longo do fuste, e em alguns casos, o PIT pode ser utilizado ainda para a determinação do comprimento de estacas pré-existent.

De acordo com Hertlein e Davis (2006), o ensaio consiste na batida de um martelo portátil (instrumentado ou não) na cabeça da estaca, gerando uma onda de compressão que desce canalizada pelo fuste da estaca, comportando-se como uma onda unidimensional em uma barra. Parte da onda é refletida para cima onde há qualquer variação de impedância ao longo da estaca, sendo a impedância a resistência oferecida pelo meio à propagação da onda (JUNIOR, 2017). Estas

respostas serão mensuradas por um sensor (acelerômetro ou geofone) que é acoplado na cabeça da estaca. A Figura 5 demonstra uma representação esquemática do ensaio.

O material do topo da estaca deve ser preparado de tal modo que não haja irregularidades afim de garantir uma transmissão adequada da onda de tensão ao longo da estaca. O sensor (acelerômetro ou geofone) também é acoplado no topo da estaca, fixado por meio de material viscoso, geralmente cera de petróleo que permite fixá-lo adequadamente, então o martelo é batido próximo ao eixo da estaca.

Segundo Hertlein e Davis (2006), o teste deve ser executado algumas vezes (pelo menos 3), à fim de obter amostras representativas e chegando em um resultado médio a partir da análise desses resultados individuais.



Fonte: Adaptado de Hertlein e Davis (2006).

Ainda para Hertlein e Davis (2006), a variação da impedância pode surgir como um resultado da variação da seção do fuste, da densidade do concreto, ou variação das propriedades da interação solo-estrutura. A onda percorre a estaca a uma velocidade c , sendo essa a velocidade de propagação da onda na barra em um período de tempo t e, entre o impulso gerado pelo martelo e a subida das ondas refletidas do final da estaca até a cabeça da estaca é a medida da distância percorrida pela onda, representada pela equação (1).

$$t = \frac{2L}{c} \quad (1)$$

Onde o L representa a distância entre o topo da estaca e a superfície de reflexão, que no caso é a ponta da estaca. Se há uma velocidade c conhecida, ou possa ser estimada dentro de limites razoáveis, então t dará uma estimativa do comprimento da estaca ou a profundidade de qualquer outra reflexão ao longo do fuste. Se há uma estaca com comprimento conhecido, pode-se comparar o valor calculado com o valor conhecido a fim de verificar se a profundidade de reflexão está correta.

Quando uma onda unidimensional percorre a estaca, que adiante será caracterizada como uma barra simples (ou haste), sua velocidade c é uma função do módulo de elasticidade, E , e da densidade, ρ . A carga aplicada F , e a velocidade da partícula, c , em um ponto relacionado é $F = Zc$. Para uma seção transversal com área A , a constante de proporcionalidade é, $Z = EA/c$, e essa constante é chamada de impedância da estaca já que esta mede a resistência da estaca em variar a velocidade (RAUSCHE; LIKINS; HUSSEIN, 1988). Mais adiante será demonstrado a variação da impedância dos resultados do ensaio PIT.

Para Bungenstab e Beim (2015), possíveis danos são avaliados procurando por reduções ou acréscimo na impedância ao longo do fuste, e essa variação necessita de uma certa magnitude, aparecendo como um pico, pois o acréscimo gradual geralmente demonstra um acréscimo na resistência lateral do solo.

A variação de impedância é avaliada através de uma linha de base, considerando o efeito da resistência lateral do solo. Por esse motivo, a magnitude do defeito pode ser somente estimada em estacas com uma clara reflexão na base. A reflexão de ponta deve ser, portanto, ajustada de modo a ter a mesma amplitude do pulso inicial, assim podendo ser aplicado o método Beta que mede a taxa de variação da impedância, classificando as estacas de acordo com o grau do dano encontrado. Esse método mede a variação da impedância de Z_2 para Z_1 , como mostrado na equação (2), a seguir.

$$\beta = \frac{Z_2}{Z_1} = \left(\frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \right) \quad (2)$$

Onde α é a amplitude do dano dividido por duas vezes a amplitude do pulso inicial. Para Bungenstab e Beim (2015), o método Beta somente permite encontrar uma estimativa da magnitude do dano encontrado, por possuir algumas simplificações, como por exemplo desconsiderar a resistência lateral do solo na equação (2).

Rausche e Globe (1979), apresentam na Tabela 1 os valores que relacionam a severidade do dano com o respectivo valor Beta calculado.

Tabela 1 – Classificação Beta de integridade das estacas

Beta (β)	Condição da Estaca
1,0	Estaca íntegra
0,8-1,0	Apresenta pequeno dano
0,6-0,8	Danificada
<0,6	Quebrada

Fonte: Adaptado Rausche e Globe (1979).

Quando a qualidade dos dados recolhidos no ensaio não é boa o suficiente, os resultados podem tornar-se inconclusivos, portanto a utilização da Tabela 1 pode não ser corretamente aplicada. Ante a isso Webster et.al (2011, apud Bungenstab e Beim, 2015), propôs a Tabela 2, como uma forma de classificação geral das estacas baseando-se na qualidade dos dados obtidos no ensaio.

Tabela 2 – Classificação recomendada das estacas de concreto via ensaio PIT

Classe	Classificação	Comentário
AA	Íntegra	Reflexão clara do final da estaca indicando, colocando essas estacas em um nível aceitável
AB	Não possui defeitos indicados	Não registra reflexão tanto de reduções significativas do fuste, da qualidade do material nem uma clara reflexão da ponta da estaca. As estacas classificadas nesse grupo não indicam deficiência significativa
ABx	Não indicação defeito a profundidade x(m)	Devido a limitação do ensaio, a interpretação da estaca completa não é possível, como em estacas muito longas ou aquelas com alta resistência do solo
PFx	Indício de falha à uma profundidade x(m)	Indicação de uma provável falha, sendo necessária uma análise quantitativa para uma verificar a severidade da falha
PDx	Indício de provável defeito à uma profundidade x(m)	Os registros mostram uma grande reflexão devido à uma grande redução de seção ou qualidade do concreto. Não há uma clara reflexão de ponta
IVx	Dados inconclusivos abaixo da profundidade x(m) devido à vibrações	Os dados são inconclusivos devido à vibração gerada por máquinas em construções próxima
IR	Dados inconclusivos	Estaca de baixa qualidade, baixa resistência e possui teste inconclusivo

Fonte: Adaptado de Bungenstab e Beim (2015)

3.4.2.1 Normatização

O PIT não possui uma norma específica que regulamenta a execução do ensaio no Brasil, somente sendo sugerido a execução de ensaios dinâmicos na norma NBR 6122:2010. O ensaio é regulamentado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) através da norma ASTM D5882:2007.

A norma trata sobre o procedimento para determinar a integridade de estacas individuais que estejam posicionadas verticalmente ou inclinadas pela medição e análise da velocidade e da força (opcional) induzida por um impacto através de um martelo portátil.

3.4.2.2 Equipamentos

Para Rausche, Likins e Kung (1992), três equipamentos são necessários para a execução do ensaio de baixa deformação: O martelo (com ou sem sensor de força), o sensor e o processador como já representado na Figura 4.

Segundo a norma regulamentadora ASTM D5882 sugere, o impacto pode ser feito por qualquer dispositivo (como um martelo portátil) que produz um pulso de força menor com tempo de duração geralmente menor do que um 1 ms e não deve produzir danos locais na estaca. Um martelo com uma ponta de plástico muito duro pode provocar esse pulso de força sem danificar a estaca, e, ainda de acordo com a norma, o impacto deve ser aplicado axialmente à estaca, normalmente no topo da estaca. Dependendo do tamanho da estaca a ser testada, o tamanho do martelo pode variar, de 0,5 kg à 5 kg sendo que os martelos menores geram menores impactos e maiores frequências, e os martelos maiores e mais pesados conseguem gerar maior energia no topo da estaca (RAUSCHE; LIKINS; KUNG, 1992). Ainda de acordo com os autores, os martelos menores tendem a fornecer maior detalhes sobre a variação da impedância, enquanto os martelos maiores são preferíveis quando se deseja uma boa reflexão da ponta da estaca.

Ainda segundo a norma ASTM D5882, utilizando um acelerômetro como receptor dos pulsos gerados, a velocidade é obtida através da integração do sinal recebido no acelerômetro. O acelerômetro deve ser posicionado próximo ou no topo

da estaca e deve ter seu eixo sensitivo paralelo ao eixo da estaca. Os sinais devem ser transmitidos a um aparato que registre, reduza e mostre os dados obtidos em função do tempo através de um reflectograma, exemplificado na Figura 7.

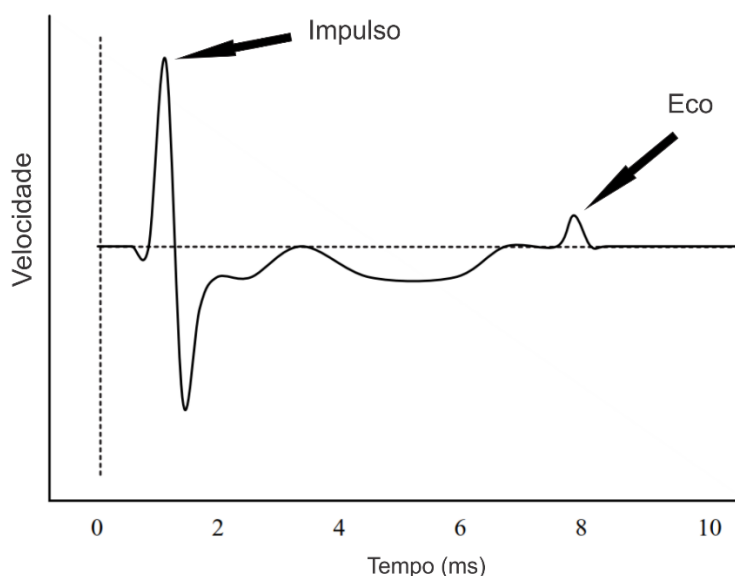
Os dados são armazenados em um coletor portátil, como por exemplo o do P.I.T., mostrado na Figura 6, para posteriormente ser transferido para o computador para cálculo, interpretação e plotagem dos dados.

Figura 6 – Ensaio PIT e coletor de sinal



Fonte: Adaptado de The Constructor (2017).

Figura 7 - Exemplo típico de um reflectograma onde é mostrado a velocidade em função do tempo



Fonte: Autoria própria (2017)

3.4.2.3 Aplicações e Limitações

O ensaio de baixa deformação, como o PIT, é aplicável para todos os tipos de estaca de concreto. Estacas de madeira apresentam-se também adequadas para este ensaio, assim como alguns tipos de estaca em aço, porém a demanda pela aplicação do ensaio nestas é baixa (ALBRECHT; CANNON, 1993). As principais vantagens do PIT, segundo Ni et.al (2006) são a qualidade dos resultados, rapidez, economia e portabilidade. Ainda segundo Likins e Rausche (2000), em alguns casos o PIT é a única alternativa prática a ser executada em locais onde não se pode fazer nada devido à falta de conhecimento sobre a estrutura a ser verificada.

O ensaio é utilizado em muitas das vezes para a verificação da integridade da estaca e conseqüentemente, para um controle de qualidade das fundações. Cunha, Camapum de Carvalho e Silva (2002) utilizaram o PIT para a verificação do comprimento e da qualidade das estacas de um prédio comercial em Taguatinga-DF. No ensaio foi utilizado um martelo de 450 gramas para a execução de todos os ensaios para uma melhor obtenção do sinal, já que no início dos ensaios foram percebidas grandes variações de impedância ao longo do fuste. Estas variações de impedância geram componentes secundárias que podem dificultar a análise do comprimento da estaca e da sua real condição de integridade. Os sinais foram filtrados

(banda inferior e superior) e magnificados de maneira a se obter a melhor propagação das ondas ao longo do comprimento das estacas nesta obra. A maioria foi classificada como totalmente íntegra (classificação A), sendo algumas das estacas não ensaiadas devido ao fato do bloco de coroamento já ter sido concretado. Através dos sinais obtidos, em algumas estacas foi sugerido que se escavasse próximo a ponta da estaca para conferir o real estado de integridade, devido à sinais de difícil interpretação.

Hussein e Morgano (1993), mostram também em seu trabalho a aplicação do ensaio PIT para verificação de estacas já existentes e confirmação do comprimento destas. Todas as estacas foram reportadas com 7,6 m, com diâmetro de 406 mm., e foram executadas através do método de hélice contínua. Considerado o comprimento de 7,6 m, uma velocidade de 3750 m/s foi calculada. No total, 37 estacas foram constatadas como íntegras, 1 estaca com comprimento menor do que o comprimento de projeto, 2 estacas sofreram variações de impedância (abaulamento) e 2 estacas obtiveram resultado inconclusivo devido à falta de uma boa reflexão de ponta.

Ainda no trabalho apresentado por Hussein e Morgano (1993), um total de 95 estacas com diâmetro de 406 mm e comprimento variando entre 9 e 30 m foram executadas ao lado de um hospital através do método hélice contínua. Pelo fato do alto potencial de danificação das estacas pela movimentação de equipamentos pesados sobre as estacas, foi decidido realizar o PIT para verificação da integridade das estacas executadas. 46 estacas foram testadas com o PIT e assumindo uma velocidade de onda de 4000 m/s, 20 estacas foram classificadas como quebradas entre 0,6 e 3 m abaixo do topo da estaca.

Como mostrado, o PIT é um ensaio pode ser amplamente utilizado para verificação de estacas executadas ou pré-existentes, fornecendo dados quanto a integridade e o comprimento aproximado do elemento. Destaca-se basicamente pela facilidade de manuseio, execução e com preço relativamente barato perante outros métodos, como o ensaio dinâmico de alta deformação ou o ensaio de carregamento estático. Apesar da alta possibilidade de utilização do PIT, segundo Ni et al (2006) este ensaio apresenta limitações, tais como:

- Comprimento da estaca. É difícil determinar o comprimento de estacas muito esbeltas. Isso ocorre porque parte da energia de impacto é irradiada para o solo que envolve a estaca dificultando a execução do ensaio.

- Estacas cobertas com bloco. Devido ao fato das estacas já estarem cobertas e devido à interação solo-estaca, a obtenção de sinais pode torna-se de difícil obtenção.
- Estacas com pequenos defeitos. O tipo e o tamanho do defeito podem ser determinados pelo ensaio, sendo que defeitos com tamanho igual ou maior do que 10% da área de seção transversal conseguem ser facilmente detectados e localizados.
- Estacas com múltiplos defeitos. Defeitos isolados ao longo da estaca podem ser facilmente encontrados, tornando-se difícil a interpretação de estacas com muitos defeitos e nesses casos, torna-se difícil também a determinação do comprimento da estaca

Além das limitações acima citadas, de acordo com Albrecht e Cannon (1993), não fornece dados acerca da capacidade de carga da estaca.

3.5 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO PIT

Os ensaios dinâmicos não destrutivos para estacas, em específico o PIT, baseiam-se na equação da onda e Smith (1960 apud CAI, 2000) foi quem primeiro utilizou esta teoria e inicialmente fez uma análise numérica de uma onda unidirecional para uma estaca utilizando o método das diferenças finitas. Considerando a estaca como um elemento de barra, será mostrada a fundamentação matemática que mostra a propagação de uma onda longitudinal em uma estaca.

3.5.1 Propagação de onda longitudinal em uma barra

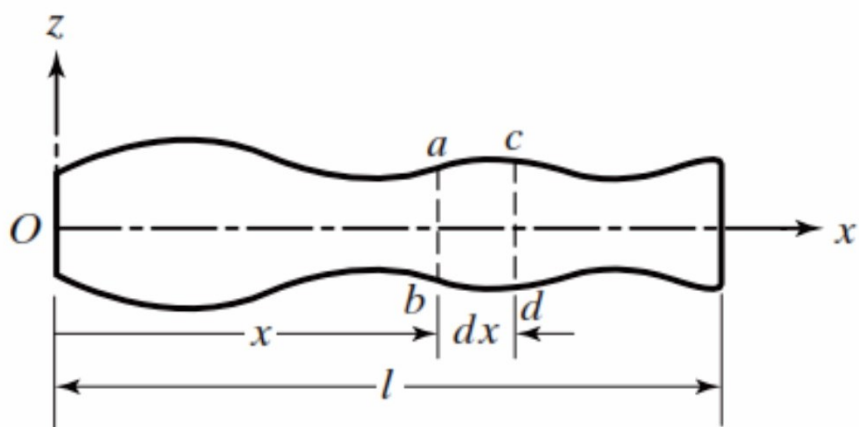
Baseando-se em Rao (2011), e considerando-se a estaca com um elemento de barra elástica ou haste com comprimento l e seção transversal $A(x)$, como é mostrada na Figura 8. As forças axiais que agem sobre um elemento infinitesimal da barra são dadas por P e $P + dP$, mostrados na Figura 9, onde:

$$P = \sigma A = EA \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3)$$

Onde σ é a tensão normal, E é o módulo de Young, u é o deslocamento axial, e $\partial u / \partial x$ é a deformação axial. Ainda de acordo com Rao (2011), se $f(x, t)$ denota a força externa por unidade de comprimento, a soma das forças na direção x fornece a equação do movimento, como mostrado na equação (4).

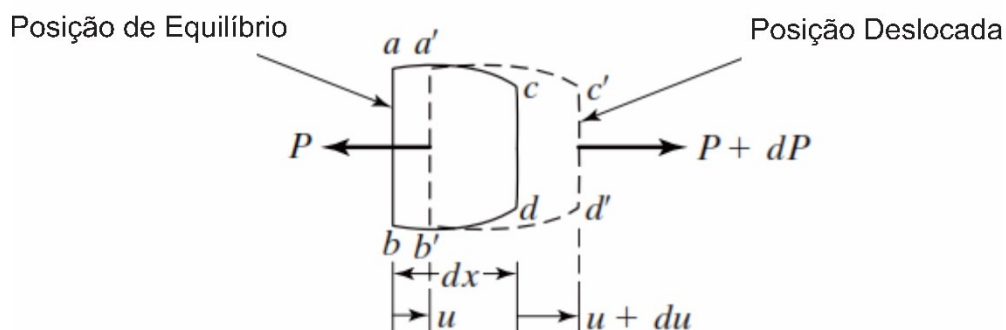
$$(P + dP) + f dx - P = \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (4)$$

Figura 8 - Vibração longitudinal de uma barra



Fonte: Rao (2011).

Figura 9 - Elemento infinitesimal da barra



Fonte: Adaptado de Rao (2011).

Na equação (4), ρ é a densidade do material. Usando a relação $dP = (\partial P / \partial x) dx$ e a equação (3), a equação do movimento para uma vibração forçada longitudinal em uma barra não-uniforme pode ser expressa como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[EA(x) \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right] + f(x, t) = \rho(x) A(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x, t) \quad (5)$$

Para uma barra uniforme ou prismática, a equação (5) é reduzida a:

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, t) + f(x, t) = \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x, t) \quad (6)$$

A equação de vibração livre pode ser obtida à partir da equação (6), considerando $f(x, t) = 0$. Assim,

$$c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x, t) \quad (7)$$

Onde,

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (8)$$

A equação (7) é chamada de equação da onda unidimensional, e isso implica que durante vibrações longitudinais, deslocamentos são propagados na direção axial com uma velocidade c dada pela equação (8) (PRAKASH, 1981).

Considerando uma barra de comprimento finito l como mostrado na Figura 4, vibrando em um de seus modos axiais, a solução para a equação (7) pode ser escrita da seguinte forma:

$$u = U(A \cos \omega_n t + B \sin \omega_n t) \quad (9)$$

Onde A e B são constantes que dependem das condições iniciais, ω_n é a frequência natural da barra e U função de x que define o modo de vibração. Substituindo a equação (9) na equação (7), tem-se:

$$\frac{d^2U}{dx^2} + \frac{\omega_n^2}{c^2}U = 0 \quad (10)$$

Para qual a solução é:

$$U = C \cos \frac{\omega_n x}{c} + D \sin \frac{\omega_n x}{c} \quad (11)$$

As constantes C e D são determinadas satisfazendo-se as condições de contorno nas extremidades da barra. Unindo-se a equação (9) e equação (11), obtém-se:

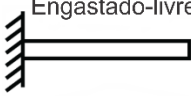
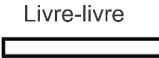
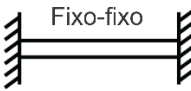
$$u(x, t) = U(x)T(t) = \left(C \cos \frac{\omega_n x}{c} + D \sin \frac{\omega_n x}{c} \right) (A \cos \omega_n t + D \sin \omega_n t) \quad (12)$$

Onde, segundo Rao (2011), a função $U(x)$ representa o modo normal de vibração axial e depende somente de x , e a função $T(t)$ depende somente de t . Se a barra apresenta um deslocamento inicial conhecido $u_0(x)$ e uma velocidade inicial $\dot{u}_0(x)$, as condições iniciais podem ser definidas como:

$$\begin{aligned} u(x, t = 0) &= u_0(x) \\ \dot{u}_0(x, t = 0) &= \dot{u}_0(x) \end{aligned} \quad (13)$$

A determinação do deslocamento U depende das condições de contorno impostas ao problema, e a Tabela 3 traz a solução para as condições de contorno mais comuns.

Tabela 3 – Condições de contorno comuns para uma barra longitudinal submetida à vibração longitudinal

Condições apoio da barra	Condições de contorno	Equação da frequência	Auto função	Frequência natural
 Engastado-livre	$u(0, t) = 0$ $\frac{\partial u}{\partial x}(l, t) = 0$	$\cos \frac{\omega l}{c} = 0$	$U_n(x) = C_n \sin \frac{(2n + 1)\pi x}{2l}$	$\omega_n = \frac{(2n + 1)\pi c}{2l}$ $n = 0, 1, 2, \dots$
 Livre-livre	$\frac{\partial u}{\partial x}(0, t) = 0$ $\frac{\partial u}{\partial x}(l, t) = 0$	$\sin \frac{\omega l}{c} = 0$	$U_n(x) = C_n \cos \frac{n\pi x}{l}$	$\omega_n = \frac{n\pi c}{l}$ $n = 0, 1, 2, \dots$
 Fixo-fixo	$u(0, t) = 0$ $u(l, t) = 0$	$\sin \frac{\omega l}{c} = 0$	$U_n(x) = C_n \cos \frac{n\pi x}{l}$	$\omega_n = \frac{n\pi c}{l}$ $n = 1, 2, 3, \dots$

Fonte: Adaptado de Rao (2011).

3.5.2 Análise de sinais para obtenção do reflectograma

O sinal é geralmente processado de modo a fornecer em um display a velocidade em função do tempo. Se um acelerômetro for usado como sensor, então a integração do sinal obtido fornecerá a velocidade, e isso irá fornecer, mostrado na Figura 7 na seção 3.4.2.2, um reflectograma que mostra a variação de velocidade em função do tempo

Como ocorrem atenuações do sinal devido à distância percorrida, os sinais são amplificados exponencialmente ao longo do tempo para aumentar as reflexões nas proximidades do fim da estaca.

A amplificação do sinal deve ser feita, segundo Hertlein e Davis (2006), de acordo com a experiência do analista, pois com a amplificação do sinal, há também um aumento dos ruídos que devem ser filtrados, verificando a faixa de utilização para cortar os sinais que não sejam provenientes da estaca. Calculando-se a frequência natural da estaca é possível determinar a faixa de filtragem próximo a esse valor, retirando assim, os ruídos que não se referem à estaca.

3.5.3 Efeitos da variação da impedância no reflectograma

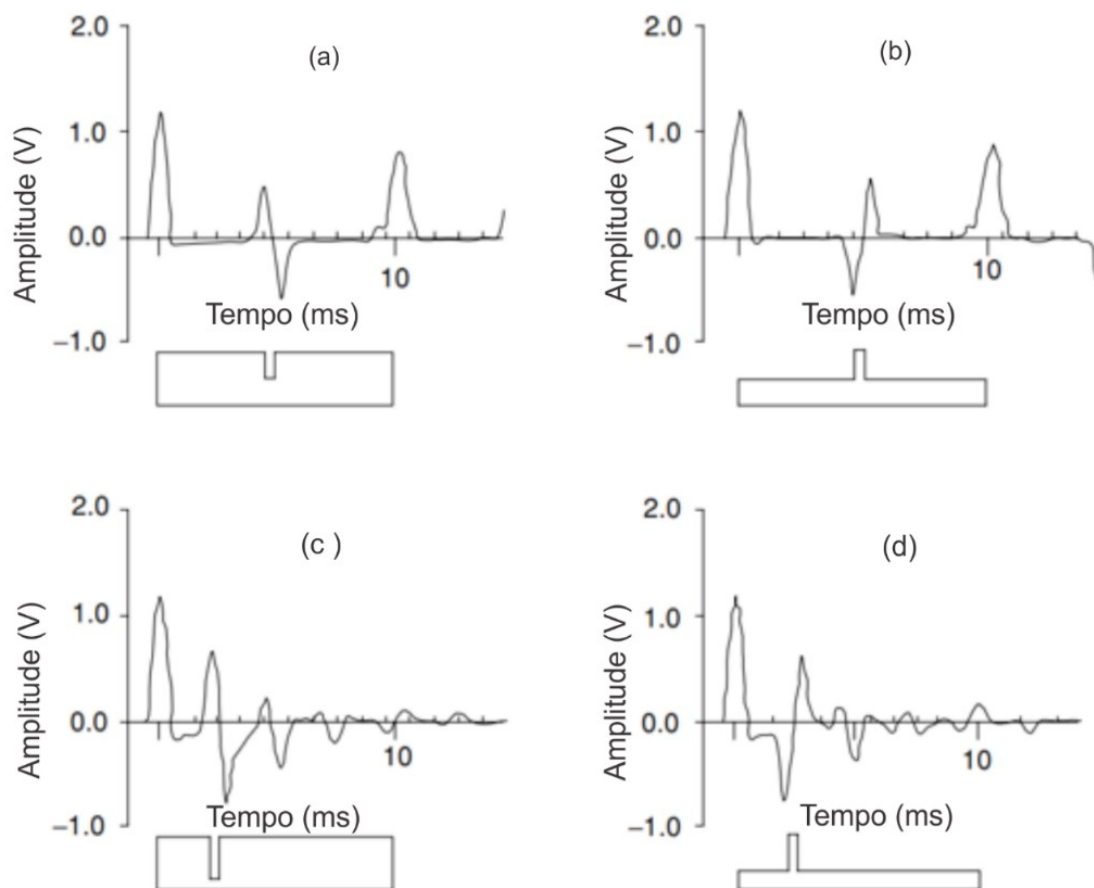
Como mostrado anteriormente, qualquer variação da impedância da estaca indica uma variação seja da seção transversal do elemento, qualidade do concreto (densidade e módulo de elasticidade) ou ainda variação nas camadas de solo.

Supondo que em uma determinada profundidade, ocorra uma variação qualquer de impedância na estaca, a onda gerada pelo ensaio PIT desce até chegar nessa variação de impedância fazendo com que parte da onda seja refletida para o topo da estaca, e sendo receptada pelo acelerômetro, e parte da onda continua a descer até o final da estaca. Em uma estaca íntegra, por exemplo, não haverá reflexão parcial ao longo do fuste, sendo a onda propagada diretamente até o final da estaca sendo refletida totalmente quando chega ao final desta.

Nos fustes onde há um decréscimo na seção transversal ou no módulo de elasticidade irá gerar um pico no reflectograma, enquanto um aumento tanto da seção quanto do módulo de elasticidade irá gerar um vale na curva de resposta do reflectograma. Ainda, de acordo com Hertlein e Davis (2006), pode haver reflexão devido ao acréscimo de resistência lateral do solo. A Figura 10 apresenta exemplos da variação da impedância e seus efeitos no reflectograma.

Variações de impedância próximas ao topo da estaca, podem ainda ser de difícil interpretação devido à superposição com o pico da velocidade inicial. Para esses casos, segundo Bugenstab e Beim (2015), a utilização de um martelo instrumentado (com um medidor de força empregado na ponta) pode ser de grande ajuda pois a avaliação da integridade nesses casos é feita comparando a magnitude da força aplicada com o pico inicial da velocidade e sua largura. Se o impulso da força é “mais largo” ou maior do que o pico da velocidade inicial, pode ser que haja um acréscimo na impedância próxima ao topo da estaca. Quando o impulso da força é “mais estreito” do que a velocidade, é provável que haja um decréscimo na impedância na região.

Figura 10 - Exemplos de sinais típicos da variação da impedância da estaca. (a) redução na impedância; (b) aumento na impedância; (c) redução na impedância próximo ao topo com reflexões secundárias; (d) aumento redução da impedância próximo ao topo com reflexões secundárias



Fonte: Adaptado de Hertlein e Davis (2006).

4. MÉTODOS

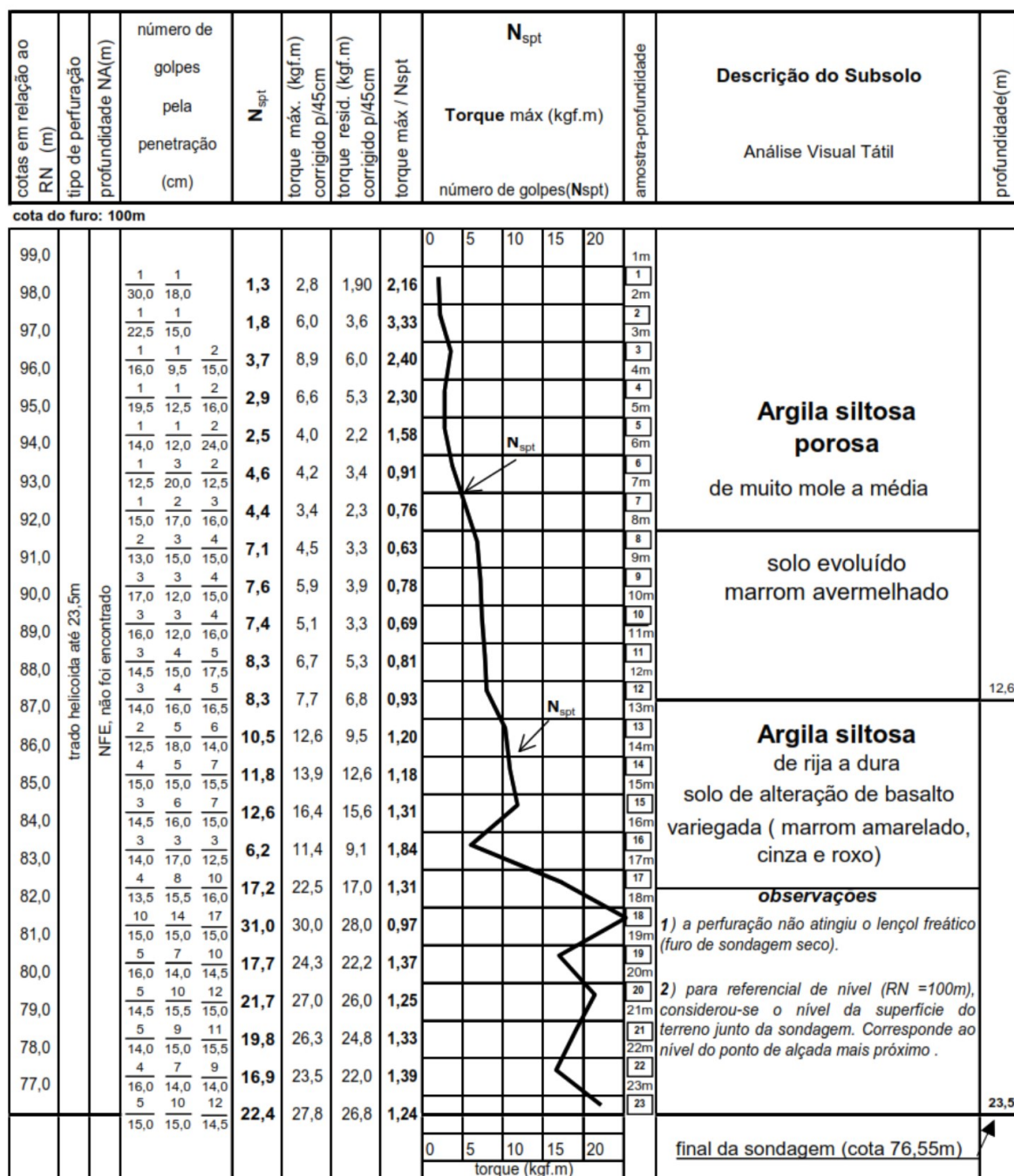
Para a compreensão e investigação do ensaio PIT na avaliação da integridade de estacas de concreto, foram simuladas numericamente 5 estacas localizadas hipoteticamente no centro do município de Campo Mourão - PR, a fim de compreender as potencialidades e as limitações do ensaio dinâmico de baixa deformação. As modelagens foram realizadas no programa ABAQUS.

4.1 Definição do perfil do terreno

O perfil do subsolo adotado para a modelagem das estacas baseou-se na sondagem realizada por Belincanta e Costa Branco (2003), no município de Campo Mourão, no estado do Paraná. A Figura 11 mostra o perfil do terreno adotado.

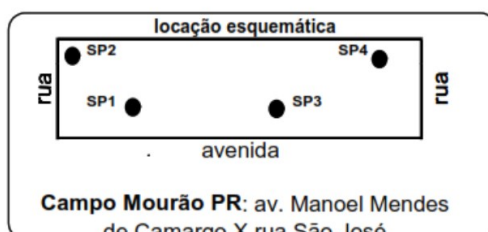
Portanto, o perfil do terreno ilustrado na Figura 11, caracteriza o perfil do subsolo como uma camada com 12 metros de espessura de argila siltosa porosa que varia de muito mole a média, e uma camada de argila siltosa que varia de rija a dura com 11 metros de espessura.

Figura 11 - Perfil do terreno adotado caracterizado por sondagem à percussão SPT, realizada em Campo Mourão - PR



legenda

TH : Trado helicoidal de 58mm
CA : Circulação d'água
NA : Nível d'água após a estab.
RA : Referencial de Nível



Sondagem de Simples Reconhecimento SP 3
NORMA DE REFERÊNCIA : NBR 6484/80

REVESTIMENTO	REFERENCIAIS DO FURO
Diâmetro Interno = 67mm	RN : 100,0m
	Cota do furo : 100,0m
AMOSTRADOR RAYMOND	PERÍODO DE EXECUÇÃO
Diâmetro Int. = 34,9mm	Início : 01 / 08 / 00
Diâmetro Ext. = 50,8mm	Final : 03 / 08 / 00

Fonte: Belincanta e Costa Branco (2003).

4.2 Determinação dos parâmetros dos materiais utilizados nas simulações

As 5 estacas simuladas são de concreto com módulo de elasticidade $E = 30$ GPa. O coeficiente de Poisson adotado para estas foi de $\nu=0,17$ e densidade $\rho=2500$ kg/m³. As estacas modeladas possuem 18 metros de comprimento e 80 centímetros de diâmetro.

Embora não possua comportamento elástico linear, por questão de simplicidade e tendo em vista o objetivo do trabalho, o solo foi modelado como material isotrópico. Os parâmetros do solo foram ajustados utilizando-se como base, os estudos feitos por Teixeira e Godoy (1996, apud Cintra, Aoki e Albiero, 2003), que correlacionam o número de SPT com o módulo de deformabilidade. A Equação (14) mostra a correlação feita pelos autores que foi utilizada na determinação do módulo de deformabilidade do solo.

$$E_s = \alpha K N_{SPT} \quad (14)$$

Onde α e K são coeficientes empíricos dados nas Tabelas 4 e 5, em função do tipo de solo.

Tabela 4 – Coeficiente alfa

Solo	α
Areia	3
Silte	5
Argila	7

Fonte: Teixeira e Godoy (1996, apud Cintra, Aoki e Albiero, 2003)

Tabela 5 – Coeficiente K

Solo	K (MPa)
Areia com pedregulhos	1,1
Areia	0,9
Areia siltosa	0,7
Areia argilosa	0,55
Silte arenoso	0,45
Silte	0,35
Argila arenosa	0,3
Silte argiloso	0,25
Argila siltosa	0,2

Fonte: Teixeira e Godoy (1996, apud Cintra, Aoki e Albiero, 2003)

Inicialmente, foi realizada a simulação de uma estaca íntegra envolta em duas camadas de solo com diferentes parâmetros, conforme mostrado na Figura 11. A primeira camada foi admitida como argila siltosa média, e a segunda como argila siltosa dura, onde estas foram classificadas de acordo com o valor máximo do N_{SPT} referente à cada camada. Sendo assim, para a primeira camada admitiu-se um valor de $N_{SPT}=8,3$ e para a segunda camada um valor de $N_{SPT}=31$.

A primeira camada possui coeficiente de Poisson e densidade iguais a $\nu=0,45$ e $\rho=1500 \text{ kg/m}^3$, respectivamente. Já a segunda camada apresenta coeficiente de Poisson e densidade iguais a $\nu=0,5$ e $\rho=2000 \text{ kg/m}^3$.

Portanto os valores de α e K adotados foram, respectivamente 7 e 0,2 para ambas as camadas, fornecendo os valores do módulo de deformabilidade que foram adotados para cada camada, conforme mostrado nas Equações (15) e (16), a seguir.

$$E_1 = 7.0,2.8,3 = 11,62 \text{ MPa} \quad (15)$$

$$E_2 = 7.0,2.31 = 43,4 \text{ MPa} \quad (16)$$

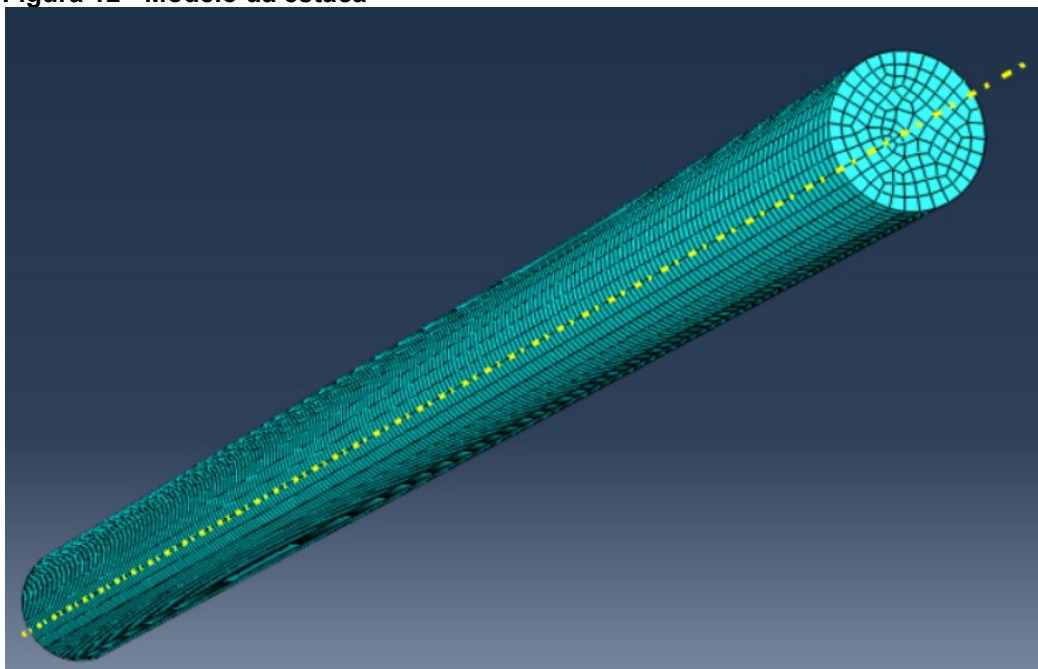
Posteriormente, foi realizada uma simulação com uma estaca íntegra envolta em uma única camada de solo, sendo esta de argila siltosa média. Esta simulação fez-se necessária para avaliação da variação de camada de solo e suas implicações na modelagem numérica.

4.3 Modelagem numérica via Método dos Elementos Finitos

A modelagem numérica foi feita no software ABAQUS, com o qual foram modeladas estacas com 18 metros de comprimento e com diâmetro padrão de 80 cm, ilustrado na Figura 12. Baseando-se nos estudos realizados por Wang, Wu e Xiao (2014), o diâmetro do maciço de solo que circunda a estaca adotado foi de 10 vezes o diâmetro da estaca, portanto o maciço de solo tem diâmetro igual a 8 metros, mostrado na Figura 13. Por simplificação, tanto estaca quanto o solo serão considerados e analisados como material com comportamento elástico linear, mostrado na seção 4.2.

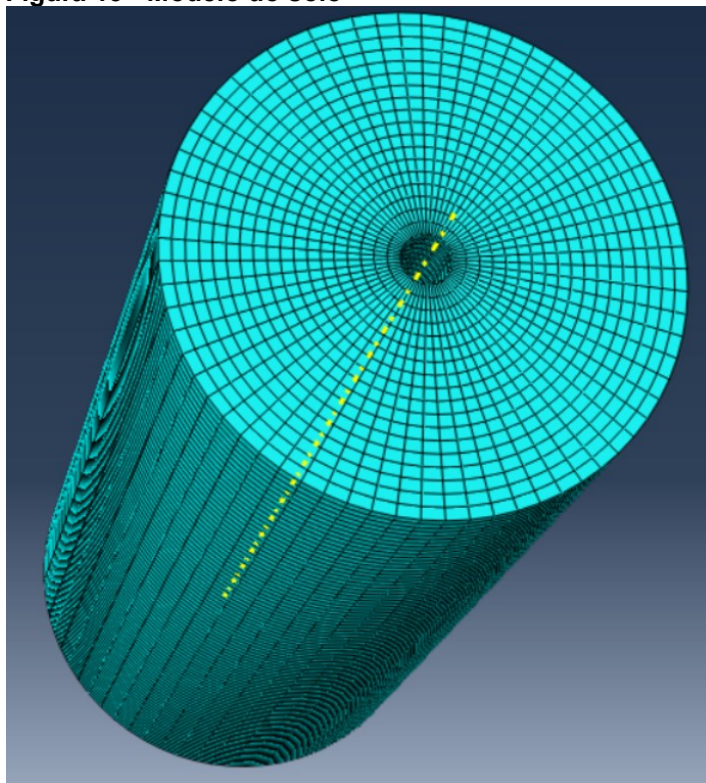
A malha adotada na simulação tem o tamanho de 80 mm para estacas e 200 mm para o solo, e ambos adotaram o elemento contínuo tridimensional com 8 nós C3D8R para a malha, possuindo 6 graus de liberdade cada um dos nós. Um pulso senoidal com intensidade 1100 N e período 3ms, simulando o martelo modelo 8208:3 do fabricante Brüel & Kjaer, foi aplicado na coordenada (0,0,0). Já a recepção deste pulso simulando o acelerômetro, foi posicionada a $2R/3$ do centro, portanto na coordenada (0.267,0,0). As coordenadas de entrada e saída do sinal basearam-se ainda no trabalho realizado por Wang, Wu e Xiao (2014). A Figura 14 exibe os pontos de entrada e saída do pulso aplicado e a Figura 15 exibe um modelo de interação da estaca com o solo. Abaixo de todas as estacas adotou-se uma camada de solo com espessura igual a 9 metros.

Figura 12 - Modelo da estaca



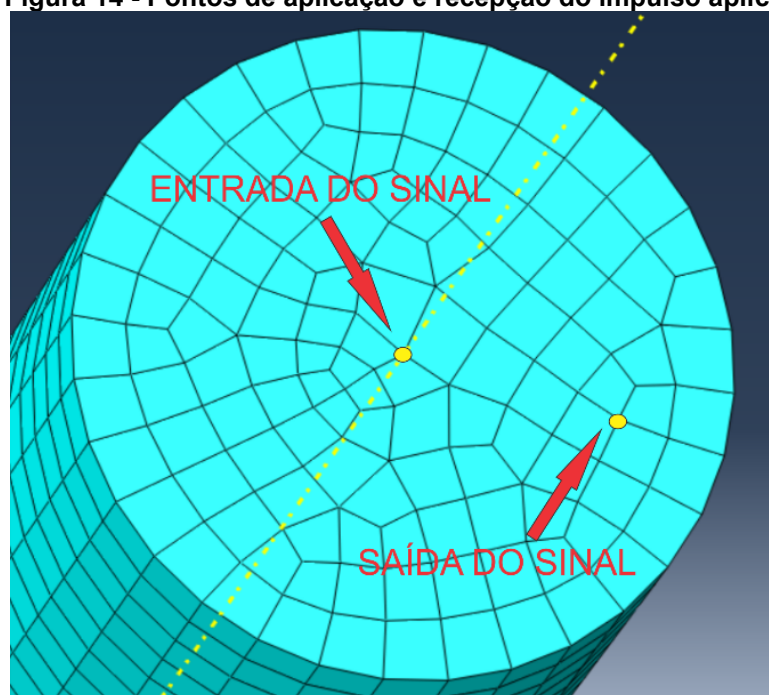
Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 13 - Modelo do solo



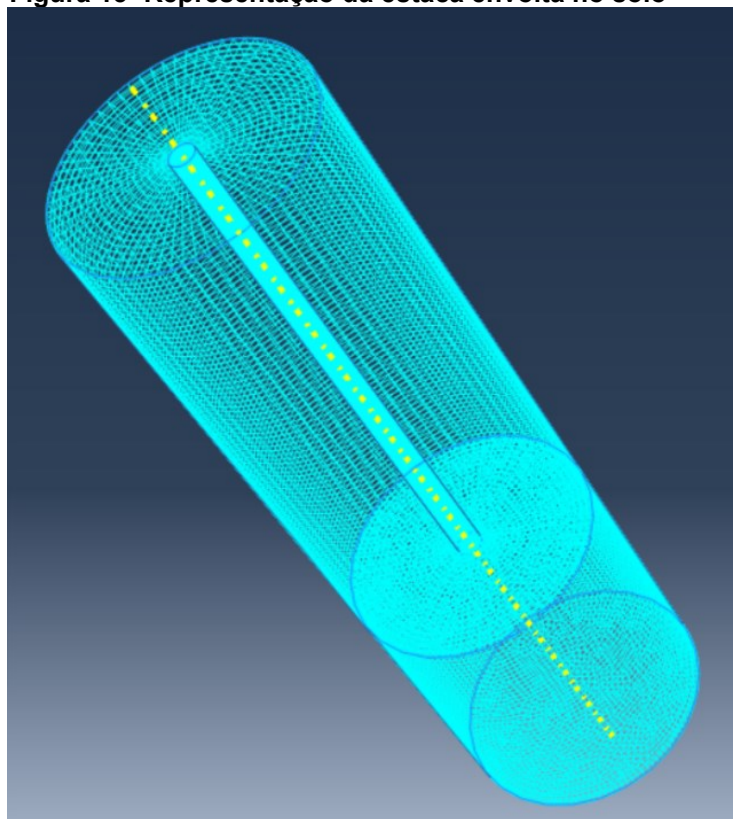
Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 14 - Pontos de aplicação e recepção do impulso aplicado



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 15- Representação da estaca envolta no solo



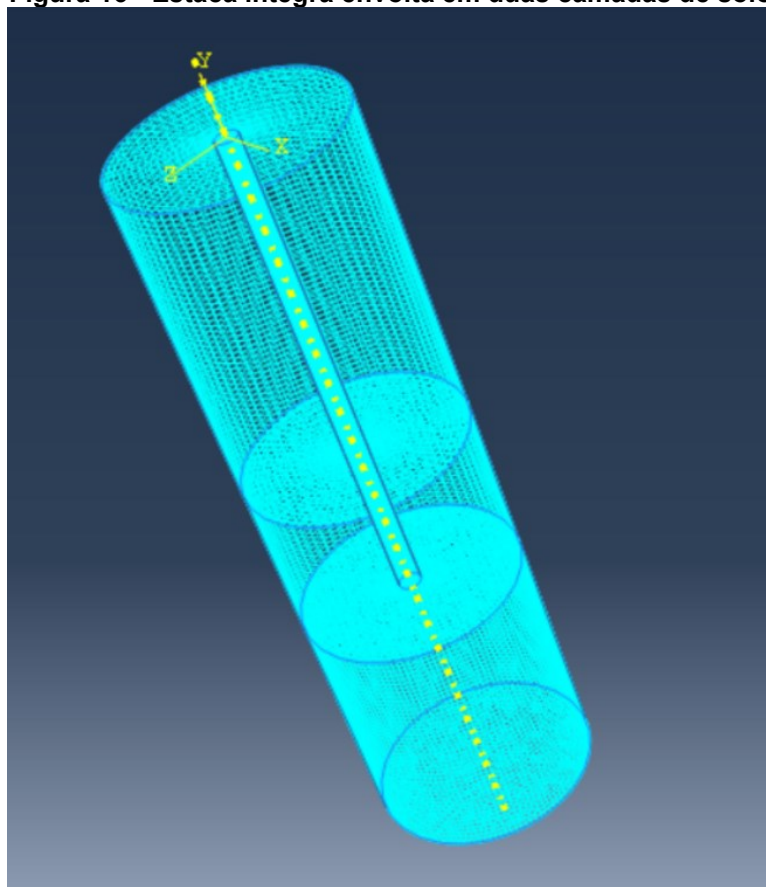
Fonte: A autoria própria (2017).

4.5 Defeitos Simulados

Foram simuladas 5 estacas de concreto, sendo duas destas íntegras e três com variações ao longo do fuste. Uma estaca íntegra foi simulada circundada pelas duas camadas de solo e a outra estaca íntegra foi simulada envolta em apenas uma camada a fim de verificar a interferência da variação dos parâmetros do solo no reflectograma gerado pela simulação numérica do ensaio PIT.

A primeira estaca íntegra, demonstrada na Figura 16, perpassou as duas camadas de subsolo classificadas na seção 4.2, portanto argila siltosa média até profundidade 12 metros, ocorrendo a mudança para argila siltosa dura até o final da estaca. A camada de solo sob a estaca apresenta os mesmos parâmetros da segunda camada.

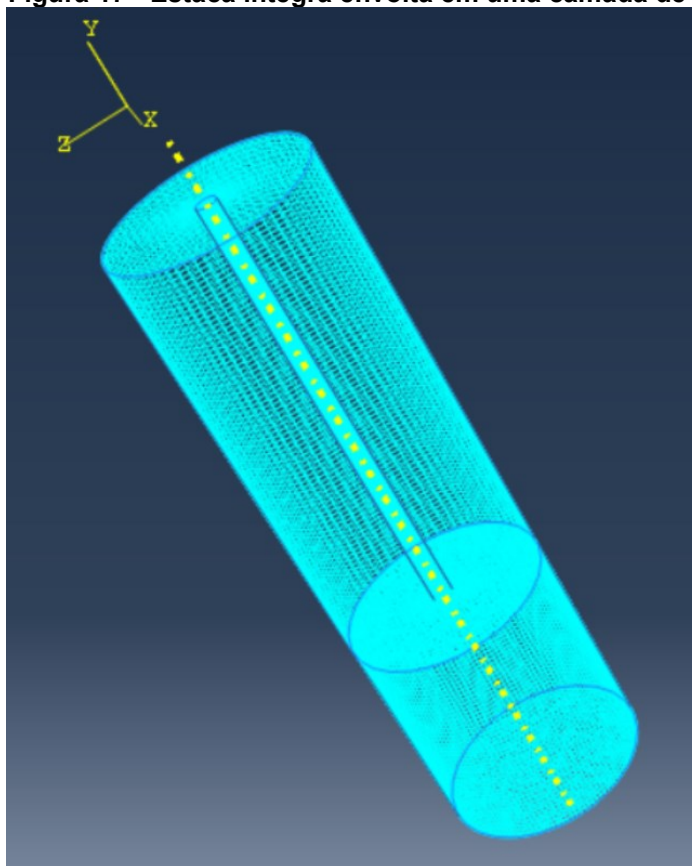
Figura 16 - Estaca íntegra envolta em duas camadas de solo



Fonte: Autoria própria (2017)

Já a segunda estaca íntegra, exibida na Figura 17, foi modelada estando envolta em apenas uma camada de solo, considerando esta camada apenas como argila siltosa média, com os parâmetros referentes a esta camada e definidos na seção 4.2. A camada de solo sob a estaca também apresenta os parâmetros referentes à argila siltosa média.

Figura 17 - Estaca íntegra envolta em uma camada de solo



Fonte: Autoria própria (2017).

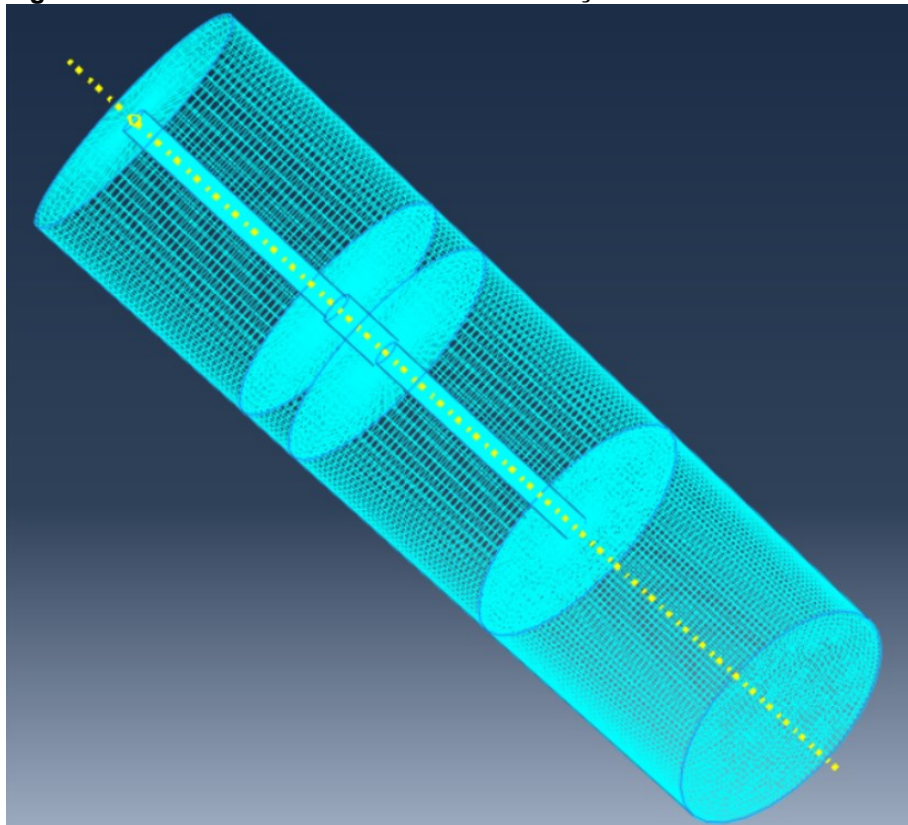
Além das estacas íntegras, foram simuladas 3 estacas com falhas ao longo do fuste sendo que, as três estacas a seguir são envoltas, simplificada, por apenas uma camada de solo cujo os parâmetros são referentes à camada de argila siltosa média.

A primeira estaca com defeito, representada na Figura 18, apresenta um aumento súbito de seção, variando de 80 cm para 100 cm na profundidade 8 metros, retornando à seção original na profundidade 10 metros. A segunda estaca modelada com variação ao longo do fuste e representada na Figura 19, apresenta uma diminuição súbita de seção, variando de 80 cm para 50 cm na profundidade 8 metros e retornando à seção original na profundidade 10 metros. Já a terceira estaca simulada com variação ao longo do fuste, apresenta a modelagem de uma trinca na profundidade 8 metros, conforme mostra a Figura 20.

A trinca simulada na estaca da Figura 20, consistiu na modelagem de um pequeno elemento de estaca com 5 cm de espessura, formando um semicírculo na profundidade 8 metros. Este semicírculo foi unido ao sólido superior e inferior de

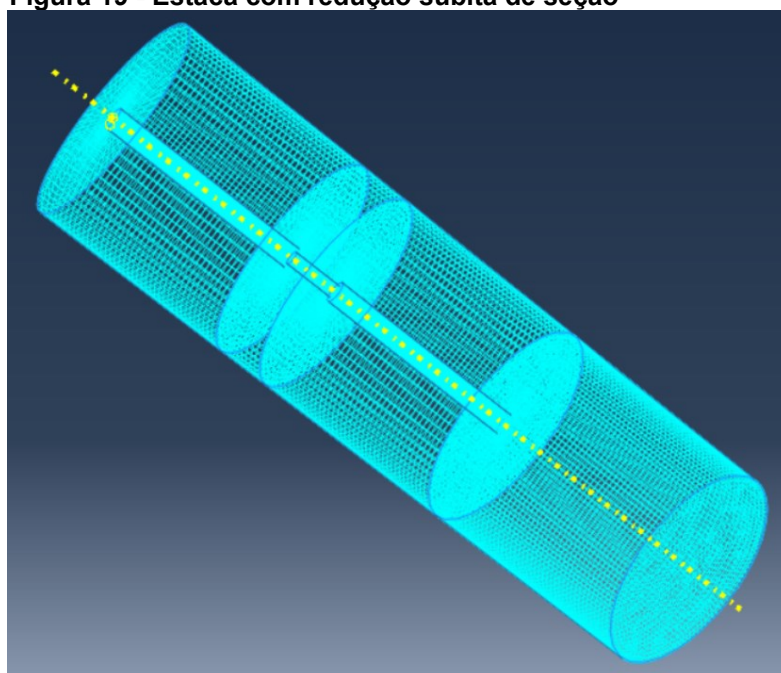
estaca, formando apenas uma pequena redução de impedância, conforme foi representado na Figura 21 e 22.

Figura 18 - Estaca com aumento súbito de seção



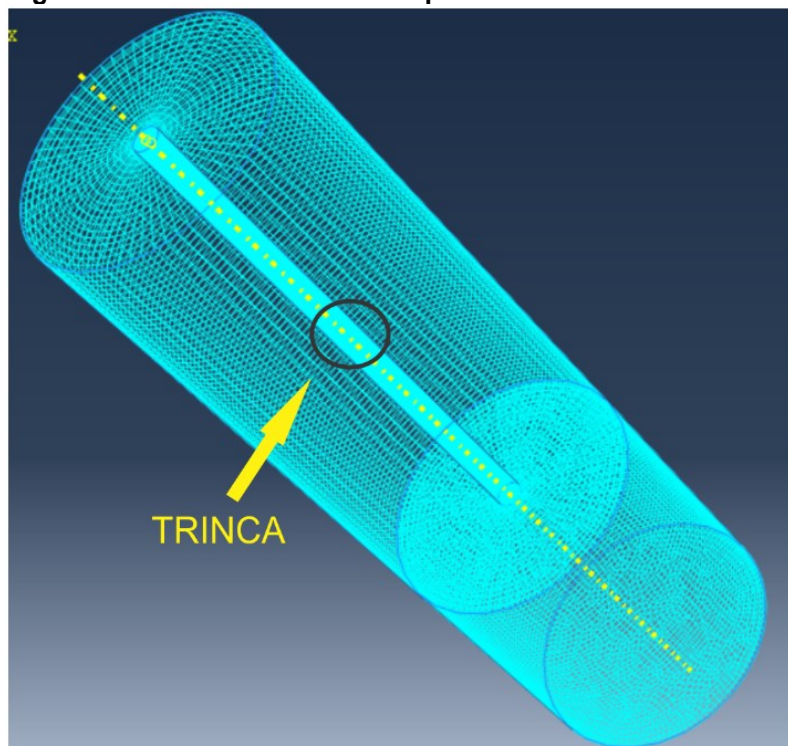
Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 19 - Estaca com redução súbita de seção



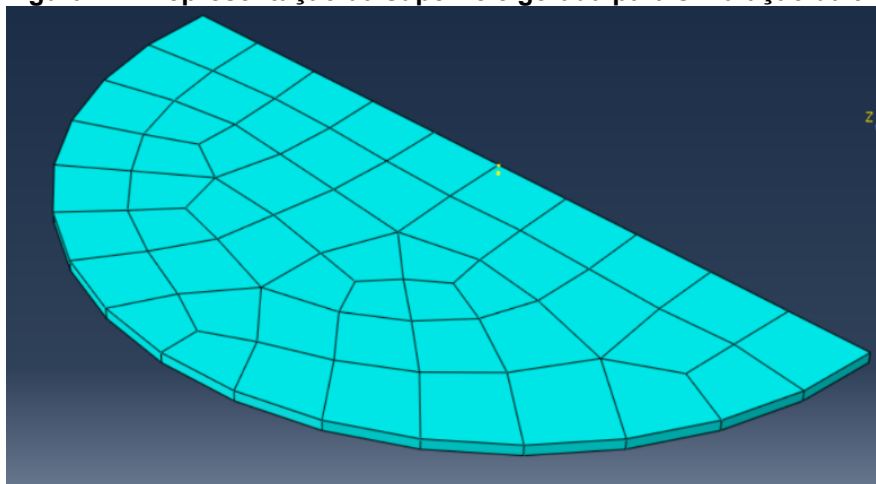
Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 20 - Estaca com trinca na profundidade 8 metros

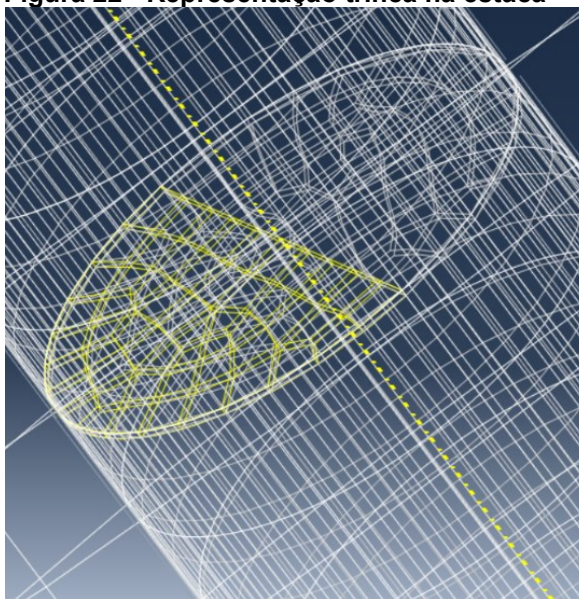


Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 21 - Representação da superfície gerada para simulação da trinca



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 22 - Representação trinca na estaca

Fonte: Autoria própria (2017).

Para todos os ensaios simulados no ABAQUS, gerou-se a plotagem de um reflectograma da velocidade em função do tempo, e para os sinais obtidos em todas as simulações fez-se necessária a aplicação de um filtro passa baixa, a fim de diminuir os ruídos gerados.

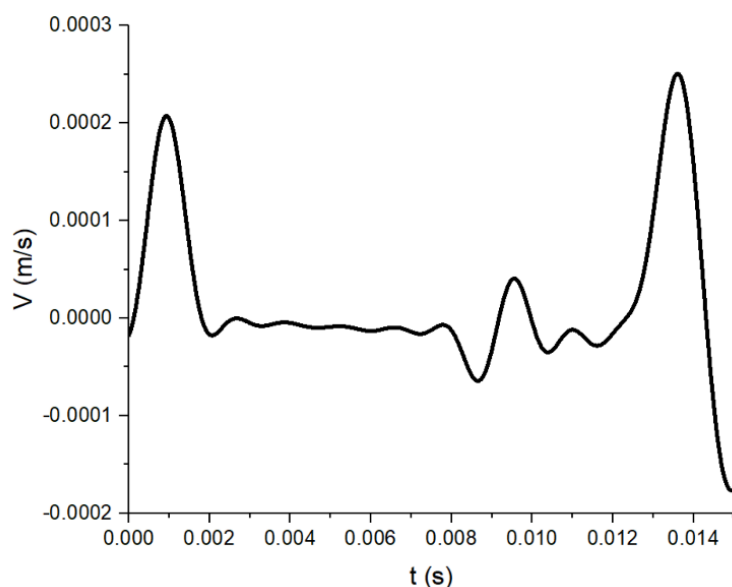
De acordo com o trabalho realizado por Cosic, Folic e Folic (2014), o processo de aplicação do filtro deve ser iterativo. Desta forma, pode-se testar diferentes frequências de corte a fim de encontrar a melhor frequência para a qual se consiga atenuar os ruídos sem introduzir erros nos resultados devido à filtragem. Portanto, para as 3 estacas com variações ao longo do fuste, aplicou-se um filtro passa baixa de 800 Hz, 1000 Hz e 1200 Hz a fim de comparar a detecção da profundidade do dano e comprimento da estaca modelada com a calculada. O filtro de 800 Hz foi adotado baseando-se no cálculo da frequência de corte do sistema, e os outros dois valores apresentados foram adotados aleatoriamente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os reflectogramas gerados a partir da simulação do ensaio PIT para cada estaca apresentada anteriormente, serviram para indicar possíveis danos ao longo do fuste da estaca. A Figura 23 apresenta o resultado da simulação do ensaio para a

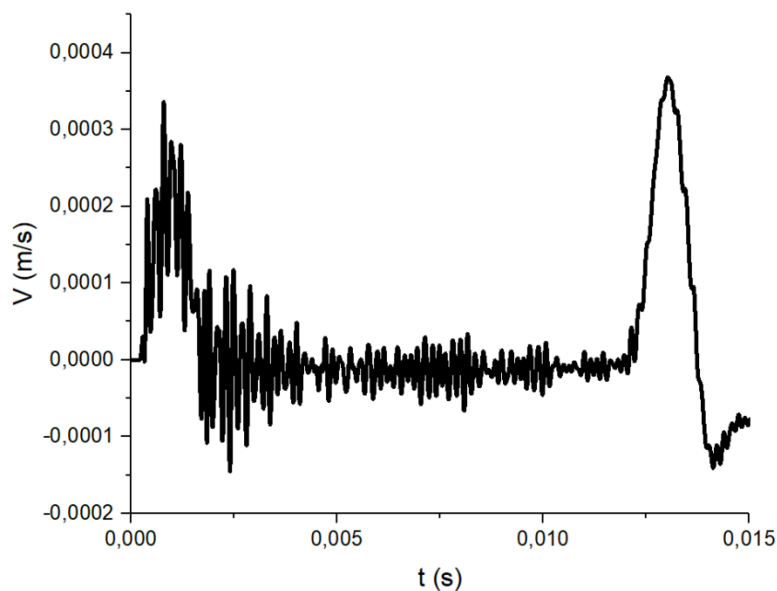
estaca íntegra envolta nas duas camadas de solo. O reflectograma gerado por esta estaca indicou um possível dano na profundidade 12 metros, apresentando um vale no tempo aproximado de 0,0085 s, que segundo a literatura, indica um aumento na impedância ao longo do fuste dificultando assim, a propagação da onda. Esse resultado deve-se à mudança brusca da camada de solo gerando um vale que poderia ser erroneamente interpretado como um possível dano, tratando-se apenas de uma limitação quanto à modelagem do solo. Por apresentar essa limitação, optou-se por simular as estacas em apenas uma camada de solo, a fim de verificar somente as reflexões inerentes à estaca de concreto.

Figura 23 - Reflectograma referente à estaca íntegra envolta em duas camadas de solo e filtrado a 800 Hz

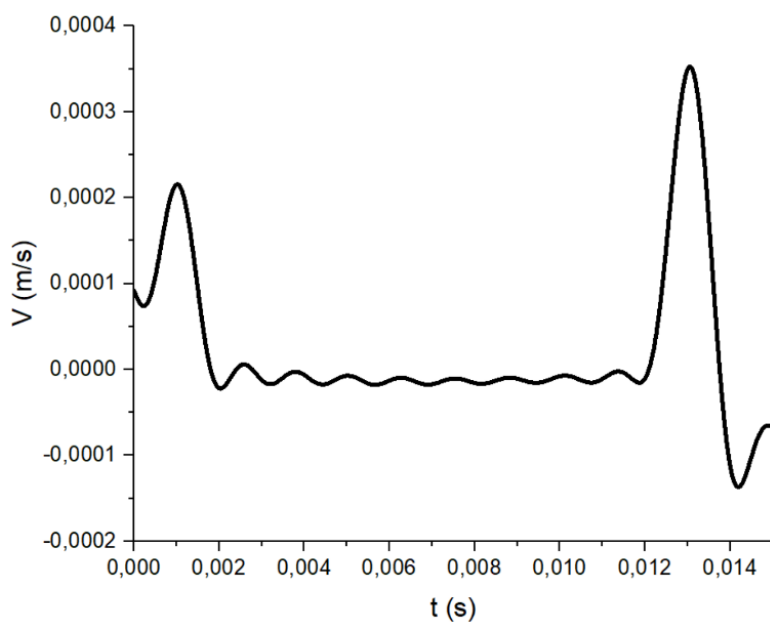


Fonte: Autoria própria (2017).

A Figura 24, a seguir, apresenta o resultado da simulação do PIT na estaca íntegra envolta em apenas uma camada de solo sem filtragem e posteriormente, a Figura 25 apresenta a mesma estaca filtrada a 800 Hz a fim de demonstrar a influência da filtragem no reflectograma. Por não apresentar nenhuma variação ao longo do fuste, apresentou apenas os sinais de entrada e saída da estaca.

Figura 24 - Reflectograma não filtrado da estaca íntegra

Fonte: Autoria Própria (2017).

Figura 25 - Reflectograma referente à estaca íntegra envolta em uma camada de solo filtrada a 800 Hz

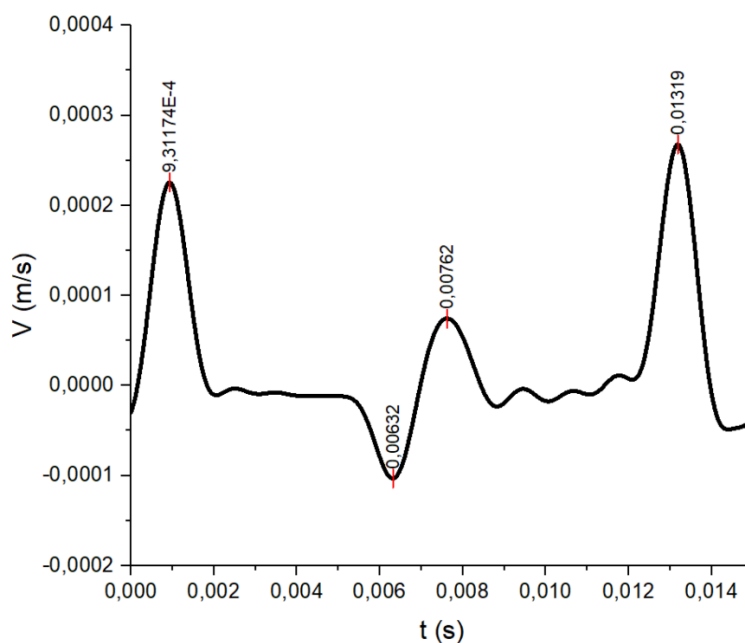
Fonte: Autoria própria (2017).

Para a estaca com aumento de seção, o reflectograma indicou, conforme mostra a Figura 26, um vale no tempo de 0,00632 s. Estimando-se a velocidade de

propagação da onda na estaca de concreto através da equação (8), obteve-se uma velocidade igual a 3464,102 m/s e adotando a equação (1), obteve-se uma estimativa da profundidade do dano, sendo este estimado na profundidade 9,33 m. O valor encontrado diferiu em relação do valor adotado de 8 metros possivelmente devido à interferência da filtragem nos picos gerados no reflectograma.

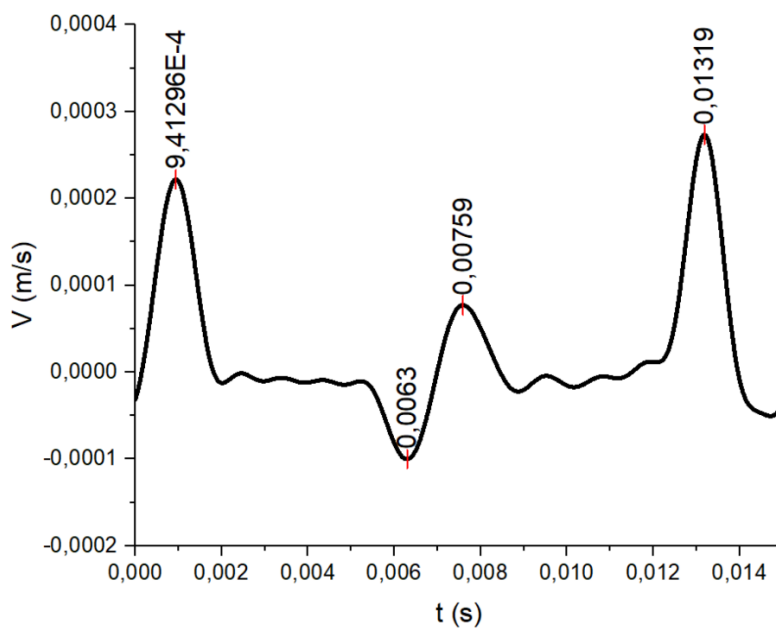
Para o reflectograma da Figura 26, adotou-se inicialmente um filtro passa baixa de 800 Hz. Posteriormente, o sinal da mesma estaca foi filtrado a 1000 Hz e 1200 Hz, conforme mostra a Figura 27 e 28 a seguir. A mudança no filtro gerou uma atenuação dos picos de entrada e resposta do sinal gerando assim, uma alteração do valor de t utilizado na equação (8) e influenciando no cálculo da profundidade do dano da estaca.

Figura 26 - Reflectograma referente à estaca com aumento de seção filtrada a 800 Hz



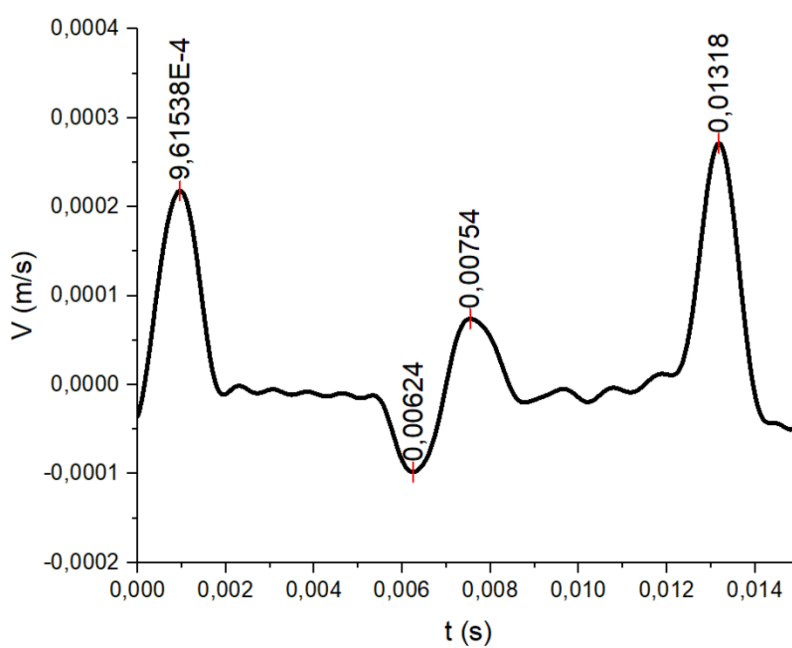
Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 27 - Reflectograma referente à estaca com aumento de seção filtrada a 1000 Hz



Fonte: Autoria própria (2017).

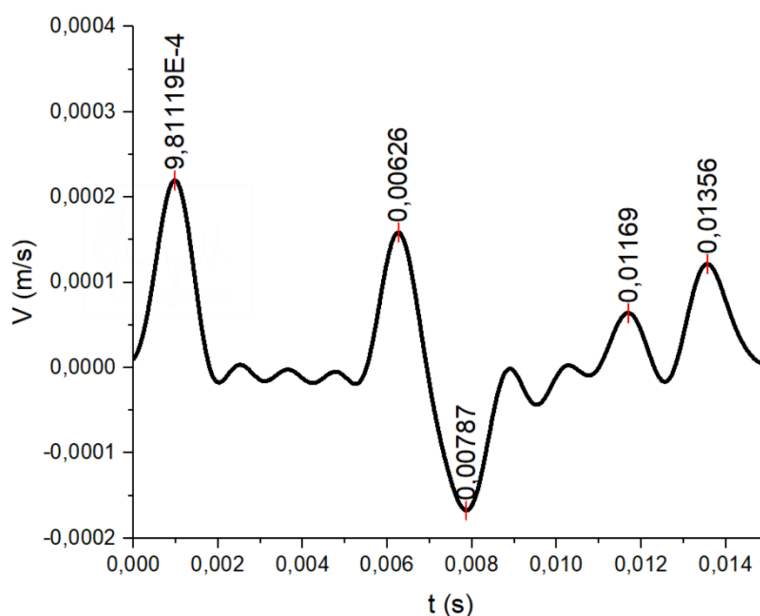
Figura 28 - Reflectograma referente à estaca com aumento de seção filtrada a 1200 Hz



Fonte: Autoria própria (2017).

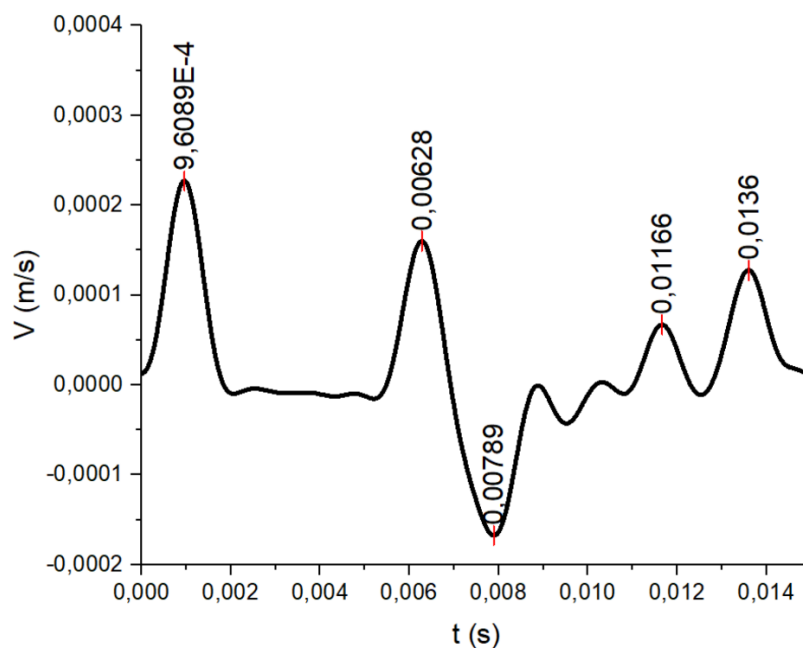
Para a estaca com redução súbita de seção, gerou-se um reflectograma mostrado na Figura 29, em que há um pico no tempo de 0,00626 s, indicando uma redução na impedância e por consequência um aumento da velocidade de propagação da onda ao longo do fuste. Através da equação (1) e (8), também foi possível estimar a profundidade do dano na profundidade 9,14 m. O reflectograma ainda, indicou reflexões secundárias após a indicação da redução na impedância, mostrando-se condizente com resultados exibidos pela literatura. As Figuras 30 e 31 mostram o reflectograma da mesma estaca filtrada a 1000 Hz e 1200 Hz.

Figura 29 - Reflectograma referente à estaca com diminuição súbita de seção filtrada a 800 Hz



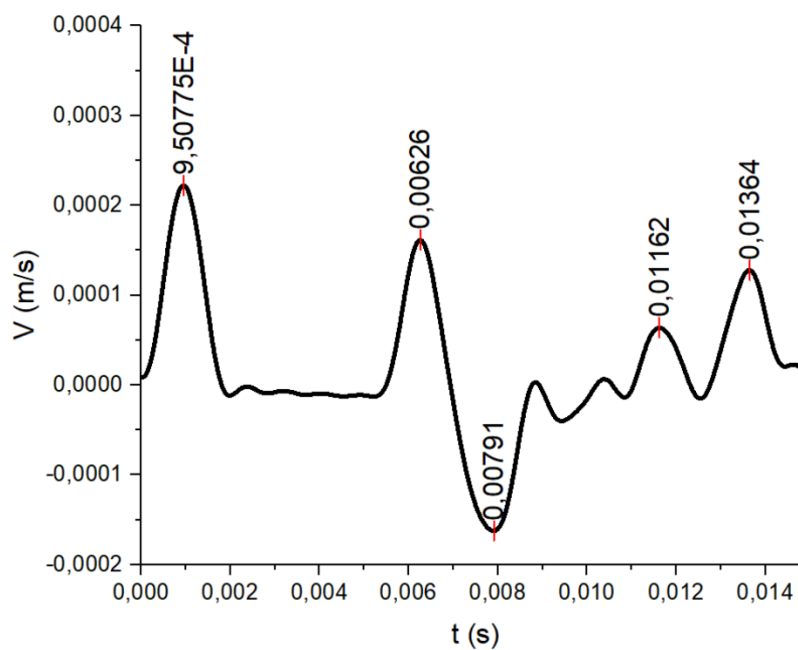
Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 30 - Reflectograma referente à estaca com diminuição súbita de seção filtrada a 1000 Hz



Fonte: Autoria Própria (2017).

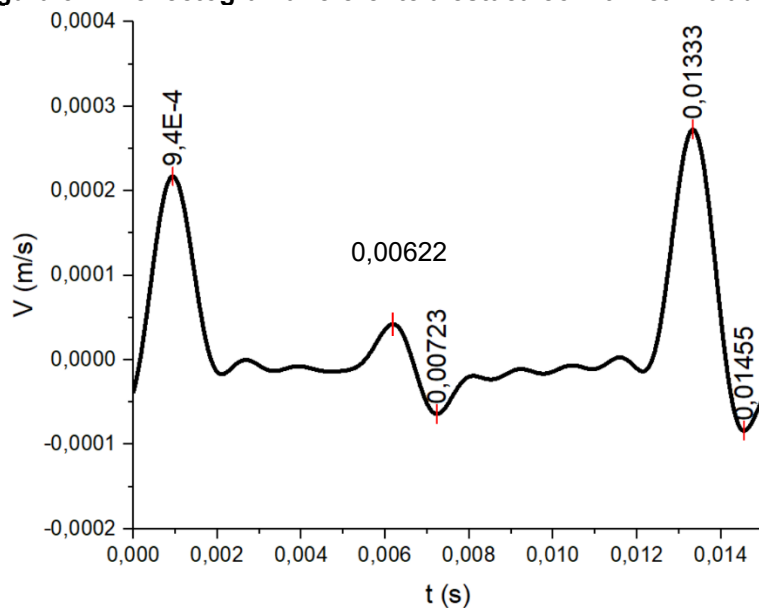
Figura 31 - Reflectograma referente à estaca com diminuição súbita de seção filtrada a 1200 Hz



Fonte: Autoria própria (2017).

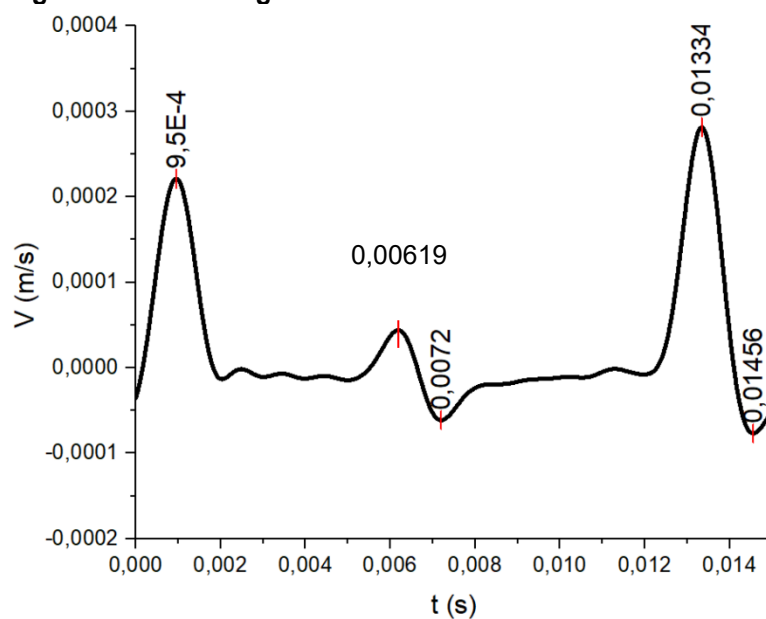
Por último, o reflectograma apresentado na Figura 32 é referente à estaca simulando uma trinca na profundidade 8 metros. O ensaio indicou uma redução na impedância através do pico gerado no tempo de 0,00623 s, onde também foi estimado a profundidade da trinca em 9,14 m.

Figura 32 - Reflectograma referente à estaca com trinca filtrada a 800 Hz



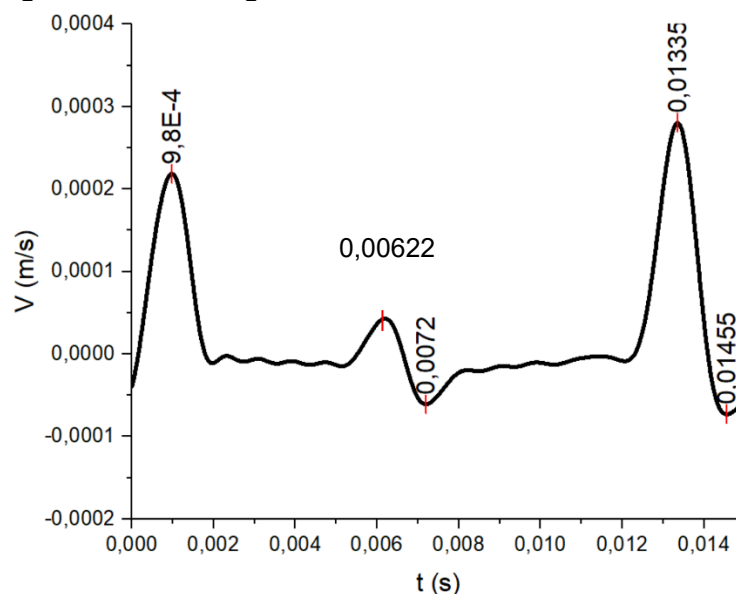
Fonte: Autoria Própria (2017).

Figura 33 - Reflectograma estaca com trinca filtrada a 1000 Hz



Fonte: Autoria Própria (2017).

Figura 34 - Reflectograma estaca com trinca filtrada a 1200 Hz



Fonte: Autoria Própria (2017)

Para as 3 estacas com variação ao longo do fuste, gerou-se a Tabela 6, a fim de comparar o comprimento da estaca e a profundidade do dano adotado na simulação e o valor encontrado seguindo os cálculos das equações (1) e (8) de acordo com os reflectogramas gerados.

Tabela 6 – Comparação da variação do reflectograma devido à filtragem

Estaca	Aumento de seção			Redução de seção			Trinca		
	800 Hz	1000 Hz	1200 Hz	800 Hz	1000 Hz	1200 Hz	800 Hz	1000 Hz	1200 Hz
Comprimento estimado da estaca (m)	21,24	21,21	21,16	21,78	21,89	21,97	21,46	21,46	21,77
Profundidade estimada do dano (m)	9,33	9,28	9,14	9,14	9,21	9,19	9,14	9,07	9,07
Erro (%)	16,6	16	14,25	14,25	15,12	14,9	14,25	13,4	13,4

Fonte: Autoria Própria (2017).

As estacas com danos apresentaram variações entre 13% e 16% no comprimento e na determinação da profundidade do dano devido à mudança na filtragem, que faz com que os picos de vales do reflectograma desloquem-se fazendo com que haja variação no tempo de reflexão e conseqüentemente, no cálculo do

comprimento da estaca e na profundidade da variação ao longo do fuste, o que é corroborado segundo o trabalho realizado por Lugovtsova e Soldatov (2017). Segundo os autores, diferentes tipos de filtragem podem afetar os resultados, entre eles, a estimativa do comprimento da estaca e da profundidade do dano. Ainda de acordo com o trabalho realizado por Souza et. al (2015), foi encontrado uma variação aproximada de 12,5% com a estimativa dos comprimentos das estacas.

6. CONCLUSÕES

O claro entendimento dos conceitos, das potencialidades e limitações do ensaio PIT é fundamental visando um maior controle de qualidade dos elementos de fundação, em especial as estacas de concreto. Com base na pesquisa realizada e em seus resultados, pode-se obter as seguintes conclusões:

- O PIT apresenta-se como uma poderosa ferramenta para a detecção de variações, ou danos, ao longo do fuste das estacas de maneira ágil e econômica sendo muitas das vezes a única ferramenta de verificação das estacas;
- A verificação do comprimento de estacas muito esbeltas torna-se difícil pois parte da energia de impacto é irradiada para o solo, absorvendo este, grande parte da energia;
- O ensaio apresenta dificuldades em determinar defeitos menores que 10% da área de seção transversal;
- O ensaio apresenta dificuldades em estimar o comprimento da estaca com múltiplos defeitos;
- O ensaio não fornece dados quanto à capacidade de carga da estaca;
- Os resultados obtidos nas modelagens condizem com a literatura, permitindo identificar possíveis danos ao longo do fuste;
- A estimativa da profundidade dos danos no fuste da estaca e a estimativa do comprimento da estaca foram alterados devido à interferência da filtragem no reflectograma, pois à medida que muda a frequência de corte a ser utilizada,

os picos e vales sofrem um leve deslocamento interferindo assim nos cálculos, sendo assim uma limitação;

- Para a modelagem numérica das camadas de solo, necessitou-se simplificarmente adotar apenas uma camada pois o *software* utilizado trabalha com modelos constitutivos elástico linear, o que não representa o solo de maneira real, concluindo assim uma limitação quanto a uma modelagem mais realista do solo.
- Nas três estacas simuladas com defeitos, o ensaio apontou as variações ao longo do fuste e, embora não tenha detectado a posição exata dos defeitos ou o comprimento da estaca, tendo uma variação entre 13% e 16%, esse percentual de erro nas estimativas já foram observadas por outros autores variando aproximadamente 12,5%.

Além disso, outros trabalhos devem ser realizados a fim de verificar qual a melhor maneira de modelar o solo, e até mesmo verificar a simulação de estacas com outros tipos de variações ao longo do fuste para comparar com os resultados fornecidos pela literatura. Também instiga-se a realização de outros trabalhos que identifiquem melhor a interferência da filtragem, bem como de uma possível calibração do ensaio, no processo de determinação do comprimento da estaca e na determinação da profundidade de um defeito.

7. REFERÊNCIAS

ACIP Piles. Disponível em: < <http://www.augercastpile.com/ACIPPILING.htm> > Acesso em 13 de maio de 2017.

Albrecht, F.; Cannon, J. **Pile Integrity Testing.** Australian Geomechanics, 1993.

Alves, A.M.L.; Lopes, F.R.; Danziger, B.R. **Dimensional Analysis of the wave equation applied to pile driving.** 8th International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. Lisboa, Portugal, 2008.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5882:** Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations. United States, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122:** Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.

Belincanta, A.; Costra Branco, C.J.M. **Resultado de investigações geotécnicas no norte e noroeste do Paraná.** 1º Encontro Geotécnico do Terceiro Planalto Paranaense, Maringá, Brasil, 2003.

Bungenstab, F.C.; Beim, J.W. **Continuous Flight Auger (CFA) Piles - A Review of the Execution Process and Integrity Evaluation by Low Strain Test.** From Fundamentals to Applications in Geotechnics, IOS Press, 2015. 414-421 p.

Cai, L.B. **Analysis of bearing capacity of rock-socketed piles based on wave equation theory.** Application of Stress-Wave Theory to Piles. Balkema, Rotterdam, Holanda, 2000. 11-15 p.

Cintra, J.C.A.; Aoki, N. **Fundações por estacas: projeto geotécnico.** 1.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010

Cintra, J.C.A.; Aoki, N.; Albiero, J.H. **Tensão Admissível em Fundações Diretas.** São Carlos/SP. Rima Editora, 2003. 134 p.

Cosic, Mladen; Folic, Boris; Folic, Radomir. **Numerical Simulation of the Pile Integrity Test on Defected Piles.** Acta Geotechnica Slovenica, 2014. 5-19 p.

Cunha, R.P.; Camapum de Carvalho, J.; Silva, C.M. **Controle de qualidade e aceitação de estacas moldadas *in loco* via utilização de ensaios de integridade de estacas (PIT).** Brasília, Brasil, 2002.

Décourt, L. **Fundações: Teoria e Prática.** 2.ed. São Paulo: Pini, 1998. 265-280 p.

Estacas Cravadas. Disponível em: < <http://serki.com.br/servicos/estavas-cravadas/> > Acesso em 05 de abril de 2017.

Gonçalves, H.H.S.; Marinho, F.A.M.; Futai, M.M. **Mecânica dos Solos e Fundações**: Notas de aula revisadas, 2014.

Hertlein, B.H.; Davis, A.G. **Nondestructive Testing of Deep Foundation**. Chinchester ,Inglaterra, 2006.

Hussein, M.; Morgano, M. **Structural integrity evaluation of concrete piles from stress wave measurements**. Cleveland, Ohio, Estados Unidos, 1993.

Hussein, M. Likins, G. **Deep foundations quality control and quality assurance testing methods**. Florida Engineering Society, March, 2005.

Integrity Testing of Concrete Piles for Proper Functioning. Disponível em: <<https://theconstructor.org/geotechnical/integrity-testing-of-concrete-piles/8832/>> Acesso em 09 de dezembro de 2017.

Junior, A.D.C. **A impedância e sua importância na manipulação de sinais sonoros**. Disponível em: <<http://compmus.ime.usp.br/sites/ime.usp.br.compmus/files/imped%C3%A2ncia%20%281%29.pdf>> Acesso em 09 de dezembro de 2017.

Likins, G. **The Need for Quality Testing**. Pile Driver, 2011. 59-62 p.

Likins, G.; Rausche, F.; Miner, R, Hussein, M. **Verification of Deep Foundarion by NDT Methods**. ASCE Anual Meeting, Washington, D.C., 1993.

Likins,G.; Rausche, F. **Recent advances and proper use of PDI low strain pile integrity testing**. Application of Stress-Wave Theory to Piles. Balkema, Rotterdam, Holanda, 2000. 211-218 p.

Lugovtsova, Y.D.; Soldatov, A.I. **Comparison of Three Different Methods for Pile Integrity Testing on a Cylindrical Homogeneous Polyamide Specimen**. Jornal of Physics: Conference Series 671. Russia, 2016. 1-6 p.

Medeiros, H. **Estacas à toda prova**. Disponível em: <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/95/artigo287359-1.aspx?fb_comment_id=1417483871798476_1517091571837705#f265a1163> Acesso em 15 de maio de 2017.

Nakamura, J. **Profundidade Técnica**. Disponível em: <<http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/146/artigo299192-1.aspx>> Acesso em 17 de abril de 2017.

Ni, S.H.; Lehmann, L.; Charng, J.J.; Lo, K.F. **Low-strain integrity testing of drilled piles with high slenderness ratio**. Computers and Geotechnics 33, 2006. 283-293 p.

Prakash, S. **Soil Dynamics**. McGraw-Hill Book, 1981. 254-267 p.

Rao, S.S. **Mechanical Vibrations**. 5 ed. Pearson, Miami, Estados Unidos, 2011.

Rausche, F.; Globe, G.G. **Determination of Pile Damage by Top Measurements**. Filadélfia, Estados Unidos, 1979.

Rausche, F.; Likins, G.; Kung, R.K. **Pile integrity testing and analysis**. Application of Stress-Wave Theory to Piles. Balkema, Rotterdam, Holanda, 1992. 613-617 p.

Rausche, F.; Likins, G.E.; Hussein, M.H. **Pile Integrity Testing By Low and High Strain Impacts**. Third Internacional Conference on the Application of Stress-Theory to Piles. Ottawa, Canada, 1988. 44-55 p.

Valinho, Rennan F. et al. **Avaliação da Integridade de estacas cravadas assentes em argila mole da cidade de Campos dos Goytacazes**. II Geojovem, Nova Friburgo, Brasil, 2006.

Velloso, D.; Lopes, F.R. **Fundações: Teoria e Prática**. 2.ed. São Paulo: Pini, 1998. 211-215 p.

Souza, T.J.; Aoki, P.C.; Valverde, R.M.; Valverde, S. **Utilização do PIT para mapeamento de fundações em estruturas de telecomunicações**. São Paulo, 2015.

Wang, S.; Wu, Y.; Xiao, Z. **Numerical Assessment of Factors Affecting Waverform Based on Low Strain Testing of Piles**. The Open Civil Engineering Journal, 2014. 64-70 p.