

# Determinação do Dano Estrutural em Estacas Metálicas Através do Ensaio de Carregamento Dinâmico

Sérgio C. Paraíso

Geomec Engenheiros Consultores, Belo Horizonte, Brasil, sergioparaíso@geomec.com.br

Cláudia Maria Cunha da Costa

Geomec Engenheiros Consultores, Belo Horizonte, Brasil, claudia@geomec.com.br

Cássia Maria Dinelli de Azevedo

Geomec Engenheiros Consultores, Belo Horizonte, Brasil, cassiaazevedo@geomec.com.br

**RESUMO:** Estacas metálicas na instalação no solo são submetidas a elevadas tensões dinâmicas de cravação que eventualmente levam à ruptura e ou ao escoamento do aço que as constituem, e consequentemente resultando em perdas significativas de tempo e custos envolvidos. Nos procedimentos de cravação deve-se, portanto, observar os limites de tensões dinâmicas aplicadas com a finalidade de preservar o elemento estrutural de fundação cravado. Ensaio de carregamento dinâmico utilizando a tecnologia PDA (Pile Driving Analyser) rotineiramente são utilizados durante a cravação e no pós cravação com a finalidade da verificação do desempenho e compatibilidade do trinômio solo-estaca-sistema de cravação. Durante os procedimentos de cravação e ou na recravação, utilizando tecnologia de instrumentação associada ao PDA, torna-se possível verificar através dos traços dos sinais de força x velocidade a identificação do dano estrutural com obtenção do fator  $\beta$  que caracteriza a extensão do dano detectado. Apresenta-se neste trabalho casos de obra, com a identificação de dano estrutural em estacas de aço, respectivos procedimentos de análise e a comprovação das anomalias observadas com o arrancamento das estacas danificadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estacas Metálicas, Cravação, Dano Estrutural, PDA, Tensões de Cravação, Fator  $\beta$ .

## 1 INTRODUÇÃO

Estacas cravadas, sejam na concepção de pré-fabricadas em concreto armado convencional, centrifugadas, protendidas e estacas de aço em perfis laminados ou soldados e tubulares de aço são de emprego frequente na solução de fundações em obras de pequeno e grande porte.

A monitoração dinâmica com a utilização de sensores de deformação específica e de aceleração instalados no fuste das estacas em cravação e conectados ao PDA permite a análise dos dados adquiridos utilizando a solução proposta pelo Método de Case e calibrada através da análise numérica CAPWAP que

considera o melhor ajuste (matching) entre os traços de força, de velocidade ou de wave up (onda ascendente) originados das instrumentações realizadas.

O método  $\beta$ , que permite avaliar a extensão do dano, inicialmente foi validado por Rausche e Goble (1979).

Determinou-se uma equação derivada do Método de Case que se baseia na propagação da onda de choque unidimensional que considera a magnitude da reflexão de velocidade na profundidade do dano, resistência de atrito ativada acima do ponto de dano e a força de impacto que realiza o evento dinâmico.

Uma vez verificados nos traços de força x velocidade os eventos supracitados, determina-

se o fator  $\beta$  que representa o percentual de variação da impedância de uma determinada estaca.

O fator  $\beta$  apresenta variações de 100% a 0%, sendo 100% referente a estaca totalmente íntegra e 0% estaca totalmente comprometida estruturalmente. A tabela 1 caracteriza as variações do fator  $\beta$  e os condicionantes de dano estrutural.

Tabela 1. Valores de  $\beta$ .

| $\beta$  | Condição de integridade |
|----------|-------------------------|
| 100      | Uniforme                |
| 80 a 100 | Dano Leve               |
| 60 a 80  | Dano Significativo      |
| < 60     | Quebrada                |

## 2 MÉTODO DE CASE

O método de Case se aplica em função das medidas de deformação específica e aceleração advindas do sistema PDA e aquisitados através de sensores reutilizáveis instalados nos fustes das estacas.

As medidas de deformação específica são convertidas em força  $F(t)$  em um determinado tempo do evento dinâmico, pela multiplicação do módulo dinâmico ( $E$ ) e da seção transversal da estaca ( $A$ ).

A velocidade das partículas  $v(t)$  em um tempo específico é obtida pela integração das medidas de aceleração.

Até que reflexões geradas pela resistência do solo que confina a estaca, e ou mudanças de seção transversal ocorram, os traços de força e velocidade, são proporcionais à impedância ( $Z$ ), sendo  $Z=EA/C$  e  $C$  a velocidade média de propagação da onda de choque ao longo da estaca.

Ondas de tensão geradas do impacto do martelo podem ser separadas em ondas descendentes ( $F_d(t)$ ) e refletidas ( $F_u(t)$ ).

A força na onda descendente é obtida conforme a equação 1 e a força na onda refletida conforme equação 2.

$$F_d(t) = \frac{1}{2} [F(t) + Zv(t)] \quad (WD) \quad (1)$$

$$F_u(t) = \frac{1}{2} [F(t) - Zv(t)] \quad (WU) \quad (2)$$

## 3 LOCALIZAÇÃO E EXTENSÃO DO DANO ESTRUTURAL

### 3.1 Localização do Dano

A figura 1 mostra o procedimento de cálculo para determinação da profundidade em relação ao ponto de instalação dos sensores onde o dano estrutural se manifesta.

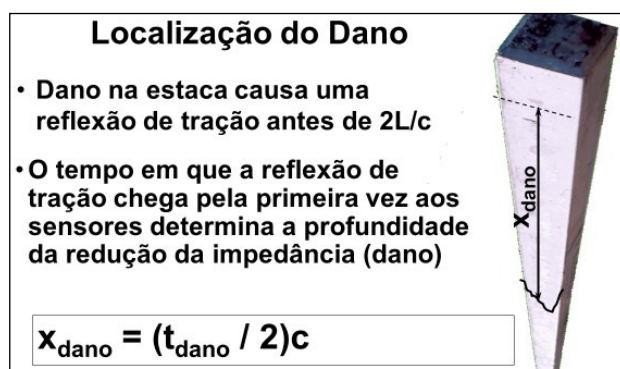


Figura 1. Determinação da Localização do Dano.

Conforme a figura 1, especifica-se:

$X_{\text{dano}}$  - Profundidade do dano;

$t_{\text{dano}}$  - Tempo decorrido do impacto até reflexão no ponto do dano.

$L$  – comprimento da estaca abaixo da linha de instalação dos sensores.

### 3.2 Determinação do Fator $\beta$ (Extensão do Dano)

O fator  $\beta$  é determinado pela equação 3 a seguir:

$$\beta = \frac{[F_d(t_1) - R_{(x)} + F_u(t_4)]}{[F_d(t_1) - F_u(t_4)]} \quad (3)$$

Sendo:

$R_{(x)}$  - Resistência por atrito lateral acima do ponto do dano;

$t_1$  - Tempo do impacto;

$t_4$  - Tempo na reflexão.

A figura 2 a seguir exemplifica a metodologia de cálculo para determinação do fator  $\beta$ .

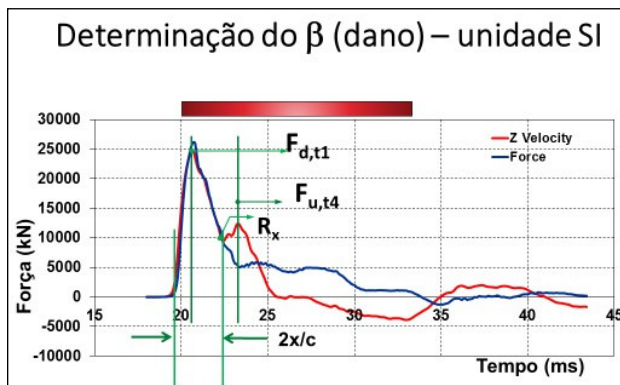


Figura 2. Determinação do fator  $\beta$ .

Da figura 2 obtém-se:

$$F_{d,t1} = 25000 \text{ kN} \quad (4)$$

$$F_{u,t4} = -7500/2 = -3750 \text{ kN} \quad (5)$$

$$R_x = 0 \text{ kN} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{[25000 - 0 - 3750]}{[25000 + 3750]} = 74\% \quad (7)$$

$$2x/c = 3,2 \text{ ms} \quad (8)$$

$$x_{\text{dano}} = \frac{3,2 \times 5,12}{2} = 8,2 \text{ m} \quad (9)$$

#### 4 CASOS PRÁTICOS DE OBRA

Apresenta-se a seguir três cenários de casos de obra em que danos estruturais foram identificados em estacas metálicas utilizando-se a tecnologia de ensaio de carregamento dinâmico.

##### 4.1 Caso 1

Identificação de dano estrutural em estacas metálicas perfil laminado W310x97, fabricação Gerdau-Açomomas,  $F_y$  350 Mpa.

Na cravação das estacas utilizou-se martelo hidráulico Junttan, peso do pistão 70 kN.

As estacas ensaiadas apresentaram dano

estrutural nas patologias de sanfonamento de ponta, rasgos de seção e dobras ao longo da profundidade. As figuras 3, 4, 5, 6, 7 e 8 apresentam os traços dos sinais de força x velocidade e WU x WD obtidos no momento da instrumentação e as fotos das estacas extraídas para comprovação das anomalias detectadas.

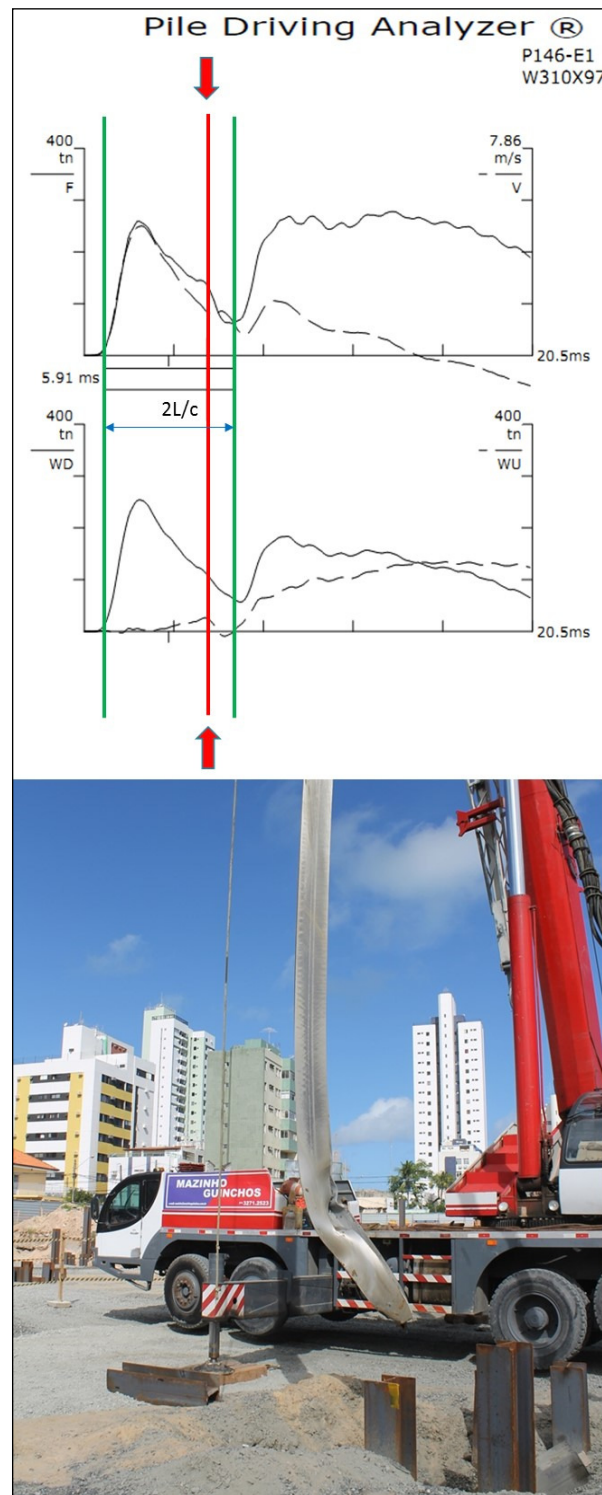


Figura 3. Sinais (Fvx), (WDxWU) e foto estaca P146 –E1

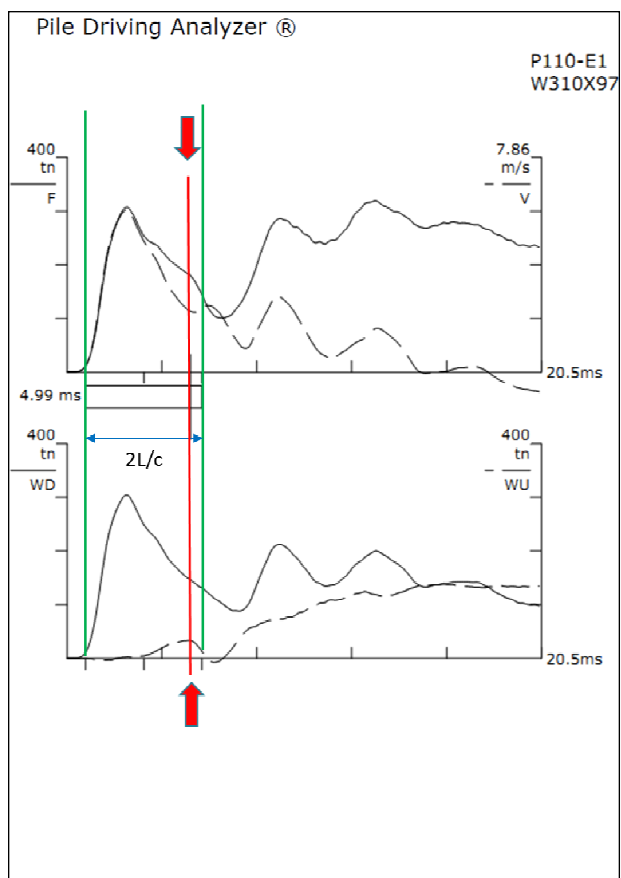


Figura 4. Sinais (F<sub>xv</sub>), (WD<sub>x</sub>WU) e foto estaca P110 –E1

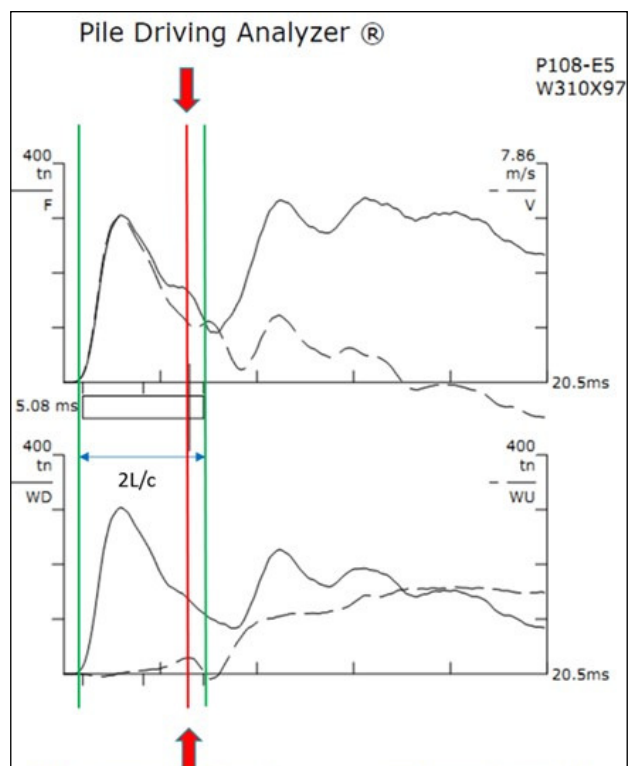


Figura 5. Sinais (F<sub>xv</sub>), (WD<sub>x</sub>WU) e foto estaca P108 –E5

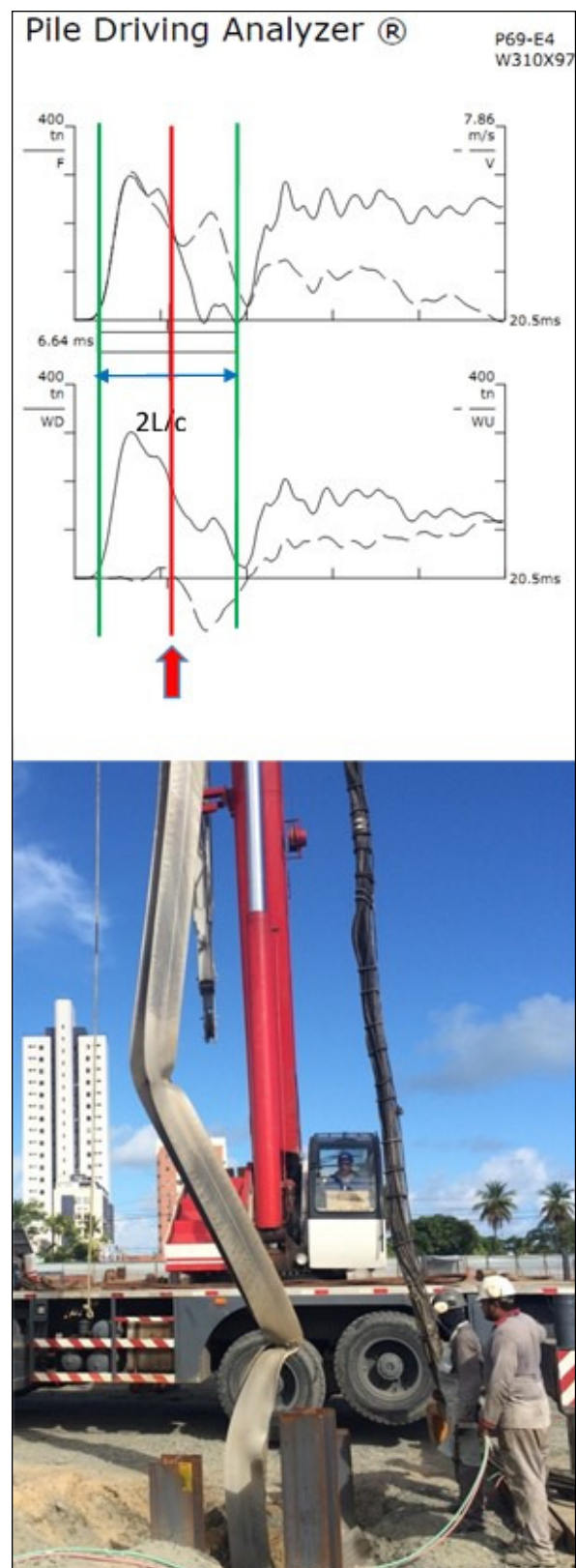
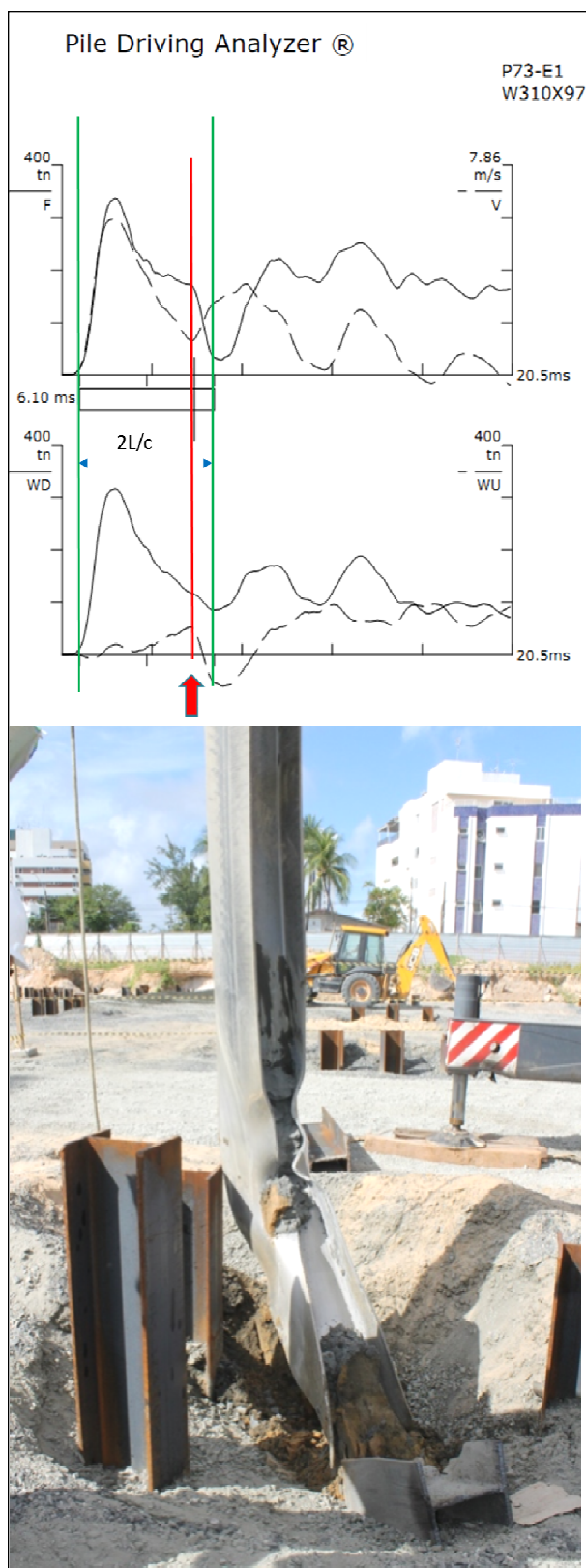


Figura 6. Sinais (F<sub>xv</sub>), (WD<sub>x</sub>WU) e foto estaca P73 –E1.

Figura 7. Sinais (F<sub>xv</sub>), (WD<sub>x</sub>WU) e foto estaca P69 –E4.

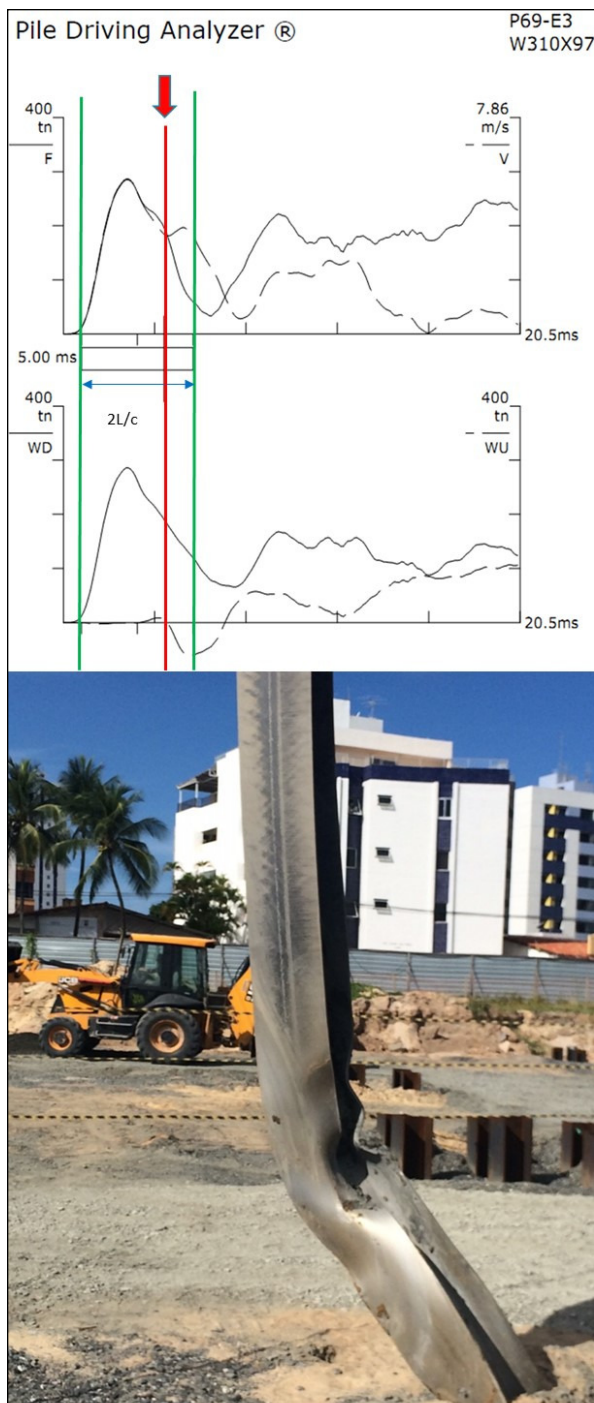


Figura 8. Sinais (Fvx), (WDxWU) e foto estaca P69 –E3.

A tabela 2 a seguir resume as interpretações realizadas para obtenção do fator  $\beta$ .

Tabela 2. Resultados Obtidos

| Estacas | $X_{\text{dano}}$<br>(m) | $F_{d(t1)}$<br>(kN) | $F_{u(t4)}$<br>(kN) | $R_x$<br>(kN) | $\beta$<br>(%) |
|---------|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------|----------------|
| P146-E1 | 12,10                    | 2625                | -146                | 583           | 69             |
| P110-E1 | 11,50                    | 3083                | -8,5                | 583           | 80             |
| P108-E5 | 11,50                    | 3083                | -104                | 500           | 79             |
| P73-E1  | 13,30                    | 3433                | -583                | 1336          | 37             |
| P69-E4  | 8,50                     | 3000                | -960                | 614           | 36             |
| P69-E3  | 9,40                     | 2833                | -625                | 167           | 59             |

## 4.2 Caso 2

Fellenius (2016) apresenta caso específico de sanfonamento de ponta em estaca tubular de aço cravada com ponta aberta.

Observa-se na figura 9 redução significativa de WU próxima da ponta da estaca, indicando fator  $\beta$  de 66% e dano em 80 pés de profundidade.

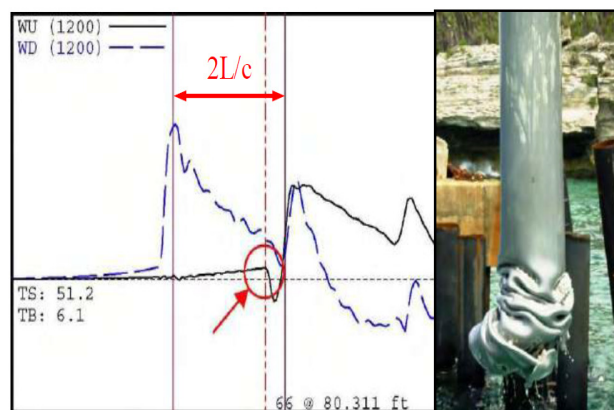


Figura 9. Fellenius (2016).

## 4.3 Caso 3

Hussein (2004) apresentou um caso peculiar de patologia estrutural em estaca tubular de aço, cravada com ponta aberta, no diâmetro de 24 polegadas, espessura da parede 0,5 polegadas e cravada com martelo MKT – 110.

O dano identificado se caracterizou a partir de 13,30 metros indicando fator  $\beta$  de 79%. Interessante observar que o dano identificado se materializou no “achatamento” da circunferência da estaca na conformação de uma chapa metálica.

Observa-se nos traços de força x velocidade e de wave up (WU) e wave down (WD), na figura 10, indicações de desproporcionalidade de (v) em relação a (F) com decrescimos sucessivos de (v) antes e próximo de  $2L/C$  (tempo na ponta da estaca), o que confere a patologia supracitada.

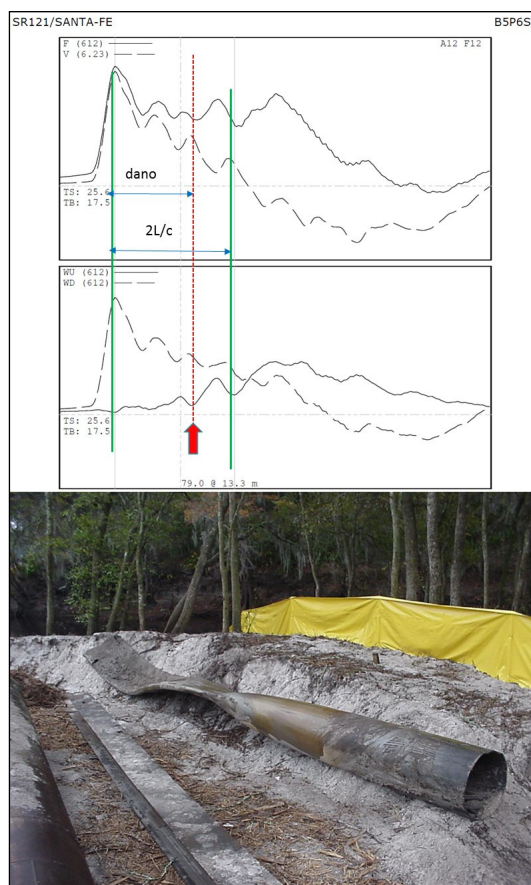


Figura 10. Hussein (2004).

## 5 CONCLUSÕES

As estacas metálicas apresentam características peculiares que favorecem as interpretações dos dados obtidos através do ensaio de carregamento dinâmico. O material que as constitui, sendo aço, apresenta condições físicas homogêneas resultando em uma constante para o peso específico, densidade específica, velocidade de propagação da onda de choque em 5123m/seg e resultando em módulo dinâmico também constante. Portanto esta condição de invariabilidade resulta em margem elevada de sucesso na interpretação dos resultados de ensaios de carregamento dinâmico e diagnóstico de dano estrutural.

Nos procedimentos de cravação há que considerar as limitações das tensões dinâmicas transmitidas às estacas, tendo em conta principalmente que na atualidade utiliza-se martelos de elevado desempenho, na sua maioria hidráulicos, que apresentam elevada frequência de cravação e energia líquida

transferida às estacas de eficiência acima de 80%. As tensões dinâmicas em estacas de aço estão limitadas a 0,9 Fy (tensão de escoamento do aço) em conformidade com a norma ABNT NBR 6122 (2010).

Goble *et al*, 1977, postula com evidência que pequenos acréscimos no traço de velocidade em relação ao traço de força em um tempo muito próximo de  $2L/C$ , indicam inexoravelmente, dano na ponta de uma determinada estaca. Acrescenta-se ainda que o traço de WU (onda de reflexão) confirma e mostra com evidência o ponto de dano estrutural próximo a região da ponta.

No caso específico das estacas metálicas a obtenção de um fator  $\beta$  elevado não significa que o dano estrutural seja de baixa magnitude uma vez que as patologias estruturais verificadas se manifestam em mudança de forma, entretanto, mantendo as propriedades geométricas e de resistência quase inalteradas quando não há seccionamentos de seção.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa GEOMEC pelo fornecimento de todos os dados referentes ao Caso 1 constante deste artigo.

## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 6122 (2010) – Projeto e Execução de Fundações.
- ABNT NBR 13208 (2007) – Estacas – ensaio de Carreamento Dinâmico..
- Fellenius, B.H. (2016). Integrity Determined from High – strain Test, item 9.9.1, *Basics of Foundation Design*.
- Goble, G. G., Linkins, G. e Teferra, W. (1977). Piles and Pile Driving Hammer Performance for H-Piles Driven to Bedrock, *Ohio Department of Transportation and Federal Highway Administration*. Cleveland, OH.
- Hussein, M. Bixler M. E Mondello, B. (2004). Dynamic Pile Test Records with Unusual Characteristics, *Proceedings of the Seventh International Conference on the Application of Stresswave Theory to Piles*.
- Linkins, G. e Rausche, F. (2014). Pile Damage Prevention and Assessment using Dynamic Monitoring and the Beta Method, *From soil Behavior Fundamentals to Innovations in Geotechnical Engineering*, ASCE, GSP 233, Edited by Magued Iskander, John E. Garlanger e Mohamad H. Hussein.

Rausche, F. e Goble, G. G. (1979). Determination of Pile Damage by Top Measurements, *Behavior of Deep Foundations*, ASTM STP 670, Editor Raymond Lundgren.