

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Luis Henrique Antunes Dutra

**ESTACAS PRÉ-FABRICADAS DE CONCRETO: AVALIAÇÃO
DO REFORÇO PARA TENSÕES GERADAS NA CRAVAÇÃO**

Porto Alegre

julho 2012

LUIS HENRIQUE ANTUNES DUTRA

**ESTACAS PRÉ-FABRICADAS DE CONCRETO: AVALIAÇÃO
DO REFORÇO PARA TENSÕES GERADAS NA CRAVAÇÃO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Roberto Domingo Rios

Porto Alegre
julho 2012

LUIS HENRIQUE ANTUNES DUTRA

**ESTACAS PRÉ-FABRICADAS DE CONCRETO: AVALIAÇÃO
DO REFORÇO PARA TENSÕES GERADAS NA CRAVAÇÃO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 13 de julho de 2012

Prof. Roberto Domingo Rios
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Rubem Clecio Schwingel (UFRGS)
MSc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Virgínia Maria Rosito D'Ávila (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Roberto Domingo Rios (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, José Leandro e Terezinha, minhas referências de vida, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Roberto Domingo Rios, orientador deste trabalho, pelos sábios conselhos e paciente dedicação sem os quais não teria se cumprido esta importante etapa do curso.

Agradeço ao Eng. Carlos Renê Antunes Dutra e Eng. Silvio Cesar Antunes Dutra, irmãos, mestres e futuros colegas de profissão.

Agradeço a Kátia Roos de Oliveira, pela paciência, compreensão e apoio dedicado e compartilhado na transposição dos obstáculos enfrentados durante esta difícil e valiosa etapa da vida.

Há muitas maneiras de avançar, mas só uma maneira de
ficar parado.

Franklin D. Roosevelt

RESUMO

Este trabalho versa sobre o estudo dos métodos existentes para prever as tensões produzidas no topo das estacas pré-moldadas durante o processo de cravação, assim como a influência dos parâmetros de cálculo nas tensões geradas. Estas tensões são função da energia disponível para promover a penetração da estaca no solo, sendo a intensidade desta definida pelas características do sistema martelo/estaca utilizado e a sua configuração, sendo, o peso do martelo e a altura de queda, as variáveis. O tipo de sistema de cravação utilizado como objeto do estudo apresentado foi o de percussão por martelo de queda livre, por ser este o sistema mais utilizado, atualmente, no processo de cravação de estacas. Foi apresentada a forma como é gerada a onda de tensões e como ela se propaga ao longo da estaca no instante do impacto do martelo, até dissipar-se pelo esforço resistente do solo. Partindo de formulações propostas por diversos autores para a previsão da tensão inicial gerada pelo impacto do martelo, analisou-se, inicialmente, a correspondência entre os resultados obtidos para a validação dos métodos propostos. Após verificada a correspondência entre estes resultados, foi utilizado um caso prático, de uma estaca cravada, em que se realizou monitoramento da cravação pelo método PDA (*pile driving analyser*), para verificar a validade destes métodos para casos reais. Posteriormente, selecionou-se um intervalo de variação do parâmetro altura de queda do martelo para obter a influência deste nas tensões previstas. Partindo dos resultados obtidos, aplicando as formulações propostas, foram identificados os esforços resultantes na estaca decorrentes da onda de compressão e da resistência do solo que se opõem a cravação da estaca. A resistência do solo é função do comprimento cravado de estaca e das suas características geotécnicas. A partir dos esforços obtidos avaliou-se a necessidade de armadura transversal (estribos), uma vez que o comportamento elástico do material da estaca faz com que surgem esforços de tração nesta direção, sendo que o concreto não possui resistência adequada para este tipo de solicitação. Junto a armadura transversal necessária verifica-se a necessidade de um reforço nas extremidades da estaca, conforme indicado na NBR 6122/1996, sendo a eficácia deste o objeto principal deste trabalho. Resume-se a este reforço um adensamento da armadura transversal nas regiões extremas da estaca, um menor espaçamento entre estribos por um determinado comprimento a partir do topo e ponta da mesma. A adequação do comprimento necessário de adensamento da armadura transversal foi realizada para a estaca objeto dos estudos realizados.

Palavras-chave: Estacas Pré-Moldadas. Tensões de Cravação. Energia de Cravação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas da pesquisa.....	17
Figura 2 – Sistema de amortecimento sobre a cabeça da estaca	20
Figura 3 – Sistemas de cravação de estacas com martelo de gravidade.....	24
Figura 4 – Método de determinação da nega e do repique.....	25
Figura 5 – Onda de compressão para amortecedor macio.....	32
Figura 6 – Onda de compressão para amortecedor rígido.....	34
Figura 7 – Forma da onda de compressão em função da resistência do solo.....	35
Figura 8 – Modelo proposto por Smith para o sistema dinâmico de cravação.....	36
Figura 9 – Modelo proposto por Smith para a parcela estática da reação do solo.....	37
Figura 10 – Parcela estática da reação do solo.....	38
Figura 11 – Parcela dinâmica da reação.....	38
Figura 12 – Propagação de ondas na estaca.....	41
Figura 13 – Propagação de ondas em estacas com ponta repousando sobre solos moles.	42
Figura 14 – Propagação de ondas em estacas com ponta repousando sobre solos rígidos.....	42
Figura 15 – Diagrama de impacto para um martelo de queda livre.....	43
Figura 16 – Diagrama de impacto ideal.....	43
Figura 17 – Etapas da propagação da onda na cravação da estaca.....	44
Figura 18 – Danos ocorridos no corpo da estaca.....	46
Figura 19 – Trinca ocorrida no processo de cravação da estaca.....	46
Figura 20 – Tensão de compressão no topo da estaca no instante do impacto do martelo de queda livre.....	47
Figura 21 – Análise das tensões de compressão na estaca.....	48
Figura 22 – Análise das tensões de tração na estaca.....	49
Figura 23 – Variação da resistência do sistema estaca x solo com a penetração da estaca.....	50
Figura 24 – Detalhamento da armadura transversal especificada em projeto para a estaca estudada.....	52
Figura 25 – Detalhe do comprimento não cravado das estacas na obra.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tensão de compressão no topo da estaca conforme ensaio PDA (<i>Pile driving analyser</i>).....	47
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

A_p – área da seção transversal da estaca (m^2)

A_{pe} – área da seção transversal útil da estaca (m^2)

A_c – área da seção transversal do coxim (m^2)

c – velocidade de propagação da onda no material da estaca (m/s)

e – penetração da estaca no solo (nega) (m)

e_{ce} – espessura do cepo do capacete (m)

e_{co} – espessura do coxim (m)

E – módulo de elasticidade do material da estaca (N/m^2)

E_c – módulo de elasticidade do coxim (N/m^2)

E_{ce} – módulo de elasticidade do material do cepo (N/m^2)

E_{co} – módulo de elasticidade do material do coxim (N/m^2)

f_{ck} – resistência característica à compressão do concreto (MPa)

f_{yk} – resistência característica ao escoamento do aço (MPa)

$f_{ct,m}$ – resistência média à tração do concreto (MPa)

$f_{ct,inf}$ – limite inferior da resistência à tração do concreto (MPa)

$f_{ct,sup}$ – limite superior da resistência à tração do concreto (MPa)

g – aceleração da gravidade (aproximadamente $9,8 m/s^2$)

h – altura de queda do martelo (m)

I – Inércia da seção transversal da estaca (m^4);

J – coeficiente de amortecimento do solo

J_{Smith} – coeficiente de amortecimento proposto por Smith (s/m)

K_c – coeficiente de rigidez do coxim (kN/m)

k – constante de rigidez do amortecedor (kN/m)

K – constante da mola (kN/m)

K_h – coeficiente de reação lateral do solo (kN/m³)

L_0 – comprimento elástico resultante do sistema estaca-solo (m)

m_h – massa do martelo (kg)

P_c – perda de energia devido ao tipo de choque (J)

P_e – perda de energia por deformação elástica da estaca (J)

P_i – perdas por deformação elástica do solo e outras causas (J)

Q – deslocamento no qual a resistência R_u é atingida (*quake*) (m)

R – resistência do solo a penetração (N/m)

R_{NE} – parcela não estática da reação do solo (N/m)

R_E – parcela estática da reação do solo (N/m)

R_d – resistência do solo à penetração da estaca (N/m)

R_u – parcela estática da reação do solo (N/m)

t – instante após o impacto do martelo (s)

V_0 – velocidade de queda do martelo (m/s)

v – velocidade instantânea ao longo da estaca (m/s)

W_p – peso da estaca (kg)

W_c – peso do capacete (kg)

x – deslocamento ao longo da estaca (m)

Z – impedância da estaca

$\sigma_{c \max}$ – máxima tensão compressiva (kN/m²)

γ – peso específico do material da estaca (aproximadamente 2,5 kN/m³)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	15
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	15
2.2.1 Objetivo Principal	15
2.2.2 Objetivos Secundários	15
2.3 HIPÓTESE	16
2.4 PRESSUPOSTO	16
2.5 DELIMITAÇÕES.....	16
2.6 LIMITAÇÕES	16
2.7 DELINEAMENTO	16
3 SOBRE A CRAVAÇÃO DE ESTACAS.....	19
3.1 CARACTERÍSTICA DO CONCRETO PARA ESTACAS PRÉ-FABRICADAS....	21
3.2 TENSÕES GERADAS NA CRAVAÇÃO.....	21
3.2.1 Energia de Cravação	22
3.2.2 Fórmulas Dinâmicas	23
3.2.3 Fórmula de Hirsch	27
3.2.4 Fórmula de Gambini	28
3.2.5 Fórmula Empregada nos Estados Unidos	29
3.3 SOLUÇÕES ANALÍTICAS DA ONDA INICIAL DE COMPRESSÃO	30
3.3.1 Martelo e Estaca com a Mesma Impedância	30
3.3.2 Martelo Rígido e Amortecedor Elástico no Topo da Estaca	31
3.3.3 Influência do Solo na Forma da Onda Resultante	34
3.4 EQUAÇÃO DA ONDA APLICADA À CRAVAÇÃO DE ESTACAS	35
3.5 MODELO DE PROPAGAÇÃO DA ONDA NA ESTACA.....	40
4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DESCRITOS E ESFORÇOS GERADOS PELA ONDA DE COMPRESSÃO RESULTANTE.....	45
4.1 VALIDAÇÃO DAS FORMULAÇÕES DESCRITAS.....	45
4.2 SOLICITAÇÕES GERADAS NA ESTACA PELA FORÇA DE IMPACTO DO MARTELO.....	48
4.3 AVALIAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DA ARMADURA TRANSVERSAL AOS ESFORÇOS SOLICITANTES.....	51
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

O uso de elementos estruturais pré-fabricados de concreto vem se tornando um fator bastante relevante no desenvolvimento de processos construtivos que visam à redução de tempo e consumo de materiais na construção civil. O uso destes elementos dispensa a necessidade de armazenagem de materiais e de serviços relacionados à sua fabricação e execução no canteiro de obras. Outro fator importante é o fato de serem fabricados em locais adequados, utilizando-se técnicas e mecanismos de controle mais sofisticados, garantindo um produto final com padrão de qualidade mais elevado. Um exemplo disso são as estacas pré-fabricadas.

Atualmente a indústria da construção civil dispõe de diversos tipos de estacas pré-fabricadas, tanto de concreto armado quanto protendido, vibrado ou centrifugado. Caracterizam-se também pelo tipo de seção transversal, a qual pode ser maciça ou vazada, na forma circular, quadrada, hexagonal ou octogonal. Os principais métodos de cravação dessas estacas são: percussão, prensagem ou vibração.

Dos métodos de cravação existentes, o mais utilizado, por questões de caráter econômico, é a cravação por percussão. De acordo com Gonçalves et al. (c2007, p. 105):

A cravação por percussão é feita através da aplicação de sucessivos impactos de uma massa previamente definida, denominada martelo ou pilão, que se desloca para cima e para baixo à medida que cada um desses impactos é desferido sobre o topo das estacas. Em geral podem ser usados para essa finalidade, três tipos de martelos ou pilões: tipo queda livre, a diesel e hidráulicos. Um martelo utilizado para a cravação de uma estaca pode ser considerado como uma fonte de energia, utilizado para gerar um pulso de força na estaca, capaz de vencer a resistência imposta pelo solo e, por consequência, provocar o deslocamento (penetração) da estaca no solo.

O pulso de força gerado pelo impacto do martelo produz uma onda de compressão instantânea na cabeça da estaca que se propaga ao longo do seu comprimento. Em muitos casos esta onda de compressão inicial pode comprometer a integridade física, ocasionando a ruptura da cabeça da estaca ou a fissuração ao longo do fuste, podendo, assim, gerar uma consequente falha na função. Segundo Gonçalves et al. (c2007, p. 121), o grande número de variáveis envolvidas em um processo de cravação por percussão (propriedades do martelo, altura de queda, características da estaca e do capacete de proteção da cabeça da estaca), torna complexo

analisar o fenômeno através de um conjunto de equações diferenciais que apresentam soluções fechadas.

Dentre as variáveis envolvidas no processo de cravação, e que tem importante relação com a distribuição da onda de compressão ao longo da estaca, destacam-se a altura de queda e o peso do martelo utilizado. Segundo a NBR 6122 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996, p. 18, 19), “O uso de martelos mais pesados, com menor altura de queda, é mais eficiente do que o de martelos mais leves, com grande altura de queda, mantido o mesmo conjunto de amortecedores.”. Ainda conforme a mesma Norma, “Nas duas extremidades da estaca, deve-se fazer um reforço da armação transversal, para levar em conta as tensões que surgem durante a cravação.”.

Frente a esses fenômenos, neste trabalho será analisada a influência da altura de queda e peso do martelo de cravação na intensidade e distribuição da onda de compressão ao longo da estaca. Em seguida será avaliado se o reforço aplicado às estacas estudadas, na prática de Engenharia, é suficiente para absorver as tensões geradas na cravação.

No capítulo seguinte são abordados os objetivos e limitações do trabalho bem como as etapas de desenvolvimento deste. No item subsequente são abordados e descritos métodos para prever as tensões que surgem durante a cravação da estaca, sendo posteriormente validados e aplicados para um caso prático onde ocorreram danos na estaca durante a cravação.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

Para a elaboração do presente trabalho foram definidas as seguintes diretrizes que determinaram o seu desenvolvimento.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: os reforços realizados no topo das estacas estudadas são adequados para resistir às tensões provenientes da sua cravação?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos são classificados em principal e secundários e são descritos nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal do trabalho é a verificação da adequação dos reforços realizados no topo das estacas estudadas, para resistir às tensões provenientes da sua cravação.

2.2.2 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) análise da influência da altura de queda e peso do martelo na onda de compressão resultante no topo da estaca;
- b) descrição dos métodos utilizados para determinação da intensidade e distribuição de tensões ao longo da estaca durante a cravação;
- c) apresentação da distribuição de tensões no topo das estacas durante a cravação.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que o comprimento do adensamento da armadura transversal (estribos), utilizado como reforço das extremidades da estaca, igual a um diâmetro (estacas circulares) ou a maior aresta (estacas retangulares), é adequado para absorver as tensões geradas na cravação.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que os métodos e formulações empregados nesse trabalho para o cálculo da tensão inicial de compressão na cabeça da estaca, devido ao impacto do martelo de cravação, apresentam resultados válidos.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a realização do estudo das tensões de cravação em estacas ôcas de concreto pré-moldado considerando, unicamente, o sistema de cravação por martelo de queda livre.

2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho a consideração:

- a) na análise dinâmica da cravação, de apenas os esforços normais, longitudinais e transversais, de tração e compressão ao longo da estaca;
- b) de apenas o comprimento necessário de adensamento da armadura transversal na cabeça da estaca, para avaliação da eficácia do reforço.

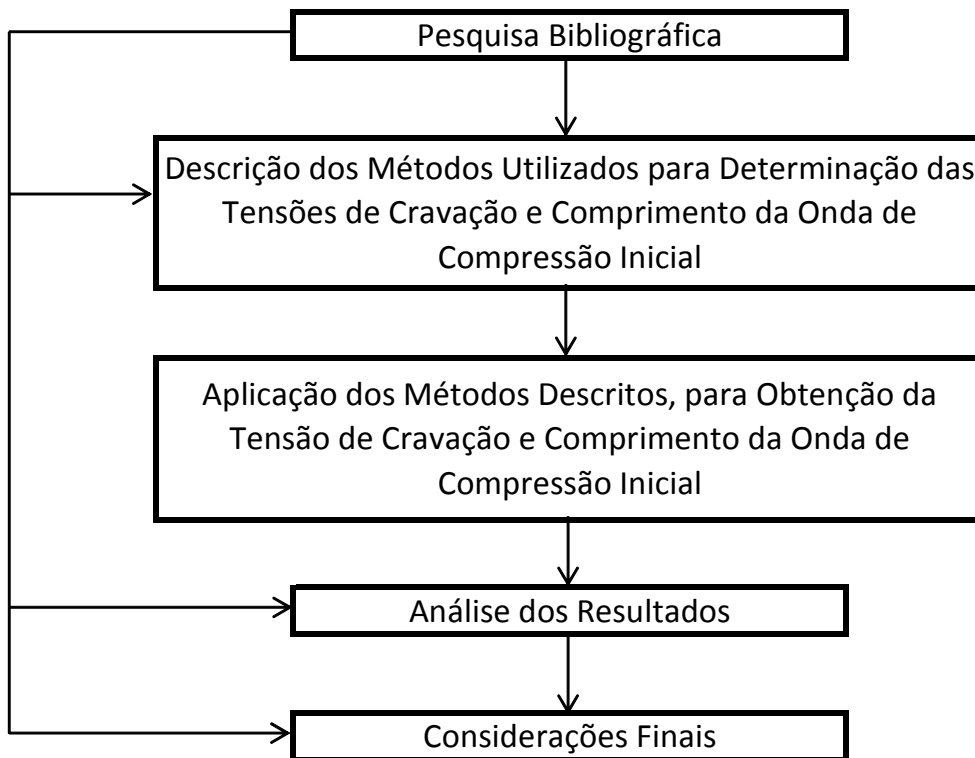
2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir que são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) descrição dos métodos utilizados para determinação das tensões de cravação e comprimento da onda de compressão inicial;

- c) aplicação dos métodos descritos, para obtenção da tensão de cravação e comprimento da onda de compressão inicial;
- d) análise dos resultados;
- e) considerações finais e conclusão.

Figura 1 – Etapas da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

Inicialmente, foi realizada a **pesquisa bibliográfica** para a determinação das variáveis dos problemas envolvidos na cravação de estacas pré-fabricadas de concreto e, por consequência, a determinação da questão de pesquisa. Nesta pesquisa, foi observada a existência de indefinições na especificação de métodos e práticas realizados no processo de dimensionamento e cravação das estacas estudadas. Estas indefinições reforçaram a necessidade de desenvolver um trabalho nesta linha de pesquisa. Tratando-se de uma etapa em que se obteve uma grande quantidade de informações para embasar e qualificar este trabalho, a pesquisa bibliográfica suplementou todas as seguintes etapas executadas.

Na etapa seguinte, denominada **descrição dos métodos utilizados para determinação das tensões de cravação e comprimento da onda de compressão inicial**, foram descritos os diferentes métodos utilizados para a determinação dos valores de tensão de cravação e

comprimento da onda de compressão inicial. Esses métodos foram a base para se obter os dados que serviram de parâmetros no desenvolvimento deste trabalho.

Após, foi realizada a etapa denominada **aplicação dos métodos descritos, para obtenção da tensão de cravação e comprimento da onda de compressão inicial**. Nessa etapa foram utilizados como ferramenta os métodos descritos na etapa anterior, variando na entrada de dados, para cada método, o peso e a altura do martelo de cravação em combinações pré-estabelecidas. Finalizando esta etapa, os resultados obtidos foram dispostos em tabelas e gráficos.

A etapa de **análise dos resultados** foi embasada na avaliação dos resultados obtidos no item anterior, sendo avaliada principalmente, a relação desses resultados para cada combinação do sistema de cravação. Na etapa final, definida como **considerações finais e conclusão**, foi determinado o nível de sucesso alcançado em relação aos objetivos a que o trabalho se propôs inicialmente.

3 SOBRE A CRAVAÇÃO DE ESTACAS

Segundo Gonçalves et al. (c2007, p. 101), “Em se tratando de cravação de estacas pré-fabricadas de concreto, há de se ter em mente que, embora se faça menção de que esse processo possa ser feito por prensagem ou por vibração, na prática isso costuma ser feito por percussão.”.

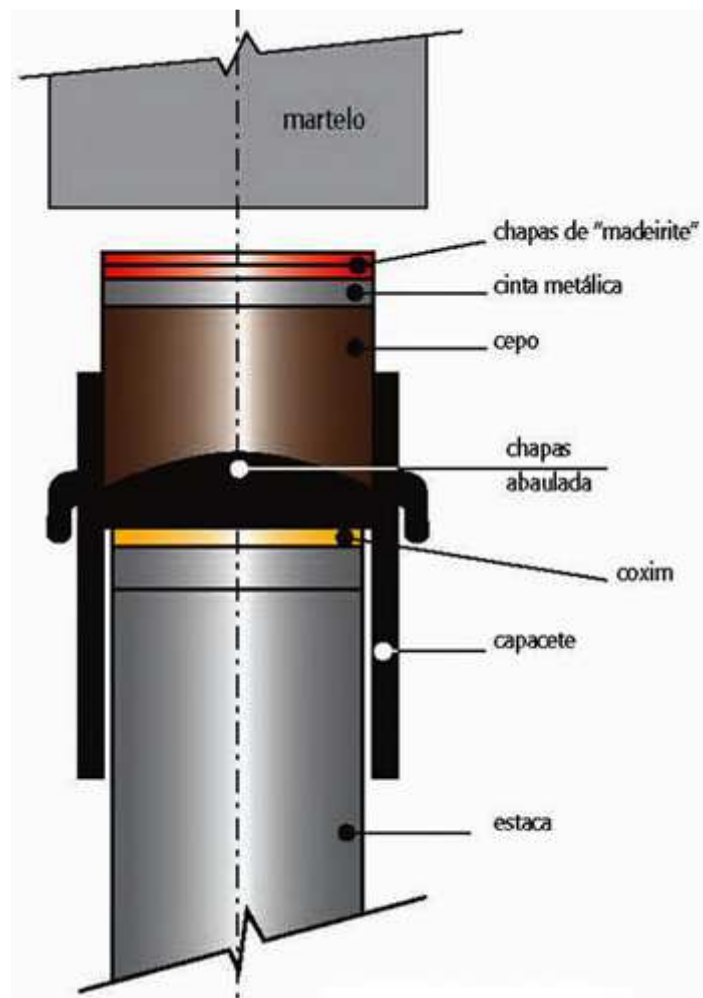
O sistema de cravação à percussão promove a penetração da estaca no solo através das sucessivas aplicações de golpes no seu topo. Estes golpes são gerados pela queda de uma massa, previamente definida para um projeto específico, conhecida como martelo ou pilão. Conforme Gonçalves et al. (c2007, p. 106), pode-se considerar um martelo para cravação de estacas “[...] como uma fonte de energia utilizada para gerar um pulso de força na estaca, capaz de vencer a resistência imposta pelo solo e, por consequência, provocar o deslocamento (penetração) da estaca no solo.”. Para o procedimento de cravação de estacas pré-fabricadas podem ser utilizados três tipos de martelos: queda livre, a diesel ou hidráulico.

Os martelos tipo queda livre são os mais utilizados no Brasil para a prática de cravação de estacas por ser um sistema mais simples. Nesse sistema, o martelo é guiado por um cabo de aço que é içado pela ação de um guincho (GONÇALVES et al., c2007, p. 106).

O martelo nunca atinge diretamente o topo da estaca durante a cravação, pois neste local é disposto um sistema de amortecimento conforme a figura 2. Este sistema é composto por uma peça metálica, denominada capacete, que se encaixa na cabeça da estaca entre duas placas de madeira (cepo e coxim respectivamente). O cepo é confeccionado em madeira dura e sobre ele são aplicados os golpes do martelo. O coxim é confeccionado em madeira mole (macia) e atua como amortecedor da carga de impacto (GONÇALVES et al., c2007, p. 136).

Junto ao projeto da estaca devem ser especificadas as características do sistema de amortecimento. Segundo Gonçalves et al. (c2007, p. 136), “As dimensões internas desses elementos devem ajustar-se à geometria das estacas que serão cravadas, de tal forma a não proporcionarem folgas excessivas, que possam provocar oscilações demasiadas nas estacas durante o processo de cravação, danificando-as.”.

Figura 2 – Sistema de amortecimento sobre a cabeça da estaca



(fonte: GONÇALVES et al., c2007, p. 137)

Conforme a NBR 6122 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996, p. 19), deve-se realizar um adensamento da armadura transversal nas duas extremidades da estaca. Este reforço servirá para que a cabeça e a ponta da estaca resistam às tensões que surgem durante a cravação. El Debs (2000, p. 394) indica o comprimento de adensamento da armadura transversal como sendo o comprimento da aresta, para estacas quadradas, ou um diâmetro da estaca, para o caso de estacas circulares.

Nos próximos itens serão descritas as características do material das estacas, do surgimento e métodos de previsão das tensões de cravação bem como a forma como a onda de compressão se propaga ao longo da estaca no processo de cravação.

3.1 CARACTERÍSTICA DO CONCRETO PARA ESTACAS PRÉ-FABRICADAS

A qualidade da estaca quanto a sua fabricação, transporte e execução é extremamente dependente das características do concreto utilizado. Para compor a estaca, um bom concreto é aquele que proporciona maior trabalhabilidade, reduzindo o trabalho de lançamento nas formas, maior velocidade de desforma, para beneficiar a alta produtividade e bom desempenho no processo de cravação por percussão. Para se obter um melhor desempenho no processo de cravação nem sempre é conveniente ter um concreto com alta resistência à compressão, pois esta não é a característica principal para este processo. Garantir as condições ideais do módulo de elasticidade e resistência à tração é muito mais importante, pois estes são fatores que influenciam diretamente no desempenho da estaca nesse processo (GONÇALVES et al., c2007, p. 2).

Em geral as estacas pré-fabricadas são confeccionadas em cimento de alta resistência inicial (ARI) para que se alcance a resistência mínima para desforma o mais breve possível. Em geral a idade de desforma não excede um dia. Para que de tenha boa trabalhabilidade do concreto são utilizados aditivos plastificantes na proporção máxima de 1% da quantidade de cimento utilizado. A quantidade de cimento utilizado na produção de concreto varia entre 350 e 420 kg/m³ e o fator água cimento encontra-se na faixa entre 0,4 e 0,5 (GONÇALVES et al., c2007). A NBR 6122 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996, p. 19) restringe a resistência característica máxima do concreto, para estacas comprimidas, calculadas como peça estrutural de concreto armado ou protendido, podendo ser considerada de até 35 MPa. Porém, conforme Gonçalves et al. (c2007, p. 5), sete dias após iniciado o processo de cura o concreto já apresenta resistência superior a 35 MPa e aos 28 dias supera a faixa de 40 MPa.

3.2 TENSÕES GERADAS NA CRAVAÇÃO

Segundo Guerrin e Lavaur (2002, p. 231), “Durante a cravação, a estaca está sujeita a tensões importantes, dependendo da estaca, da resistência do terreno e do modo de cravação.”. A NBR 6122 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996, p. 18), determina que “O sistema de cravação deve ser dimensionado de modo a levar a estaca até a profundidade prevista para sua capacidade de carga, sem danificá-la.”. Desta forma, faz-se

necessária a previsão destas tensões, para que seja possível dimensionar a estaca para as resistir, além das solicitações de projeto da obra, sem sofrer danos.

Almeida (1985, p. 50) elenca que os danos que podem ocorrer nas estacas devido às tensões excessivas de cravação podem ser:

- a) esmagamento da cabeça;
- b) esmagamento da ponta da estaca;
- c) trincas transversais ou quebra da estaca.

Nos itens a seguir serão descritas as características do sistema de cravação da estaca que influenciam na energia de cravação e as formulações que fornecem uma estimativa para a força de impacto do martelo no seu topo.

3.2.1 Energia de Cravação

Para atingirem uma profundidade desejada, que lhes garanta a capacidade de carga requerida em projeto, as estacas devem ser cravadas com determinada energia, denominada energia de cravação. Esta energia depende do tipo de equipamento utilizado e das características geotécnicas do subsolo (OLIVEIRA FILHO, 1985, p. 113).

De acordo com Oliveira Filho (1985, p. 114), a energia de cravação “[...] não é totalmente utilizada para cravar a estaca, pois ocorrem perdas devidas ao tipo de choque pilão-estaca, à deformação elástica do material que é feito a própria estaca, e ainda por deformação elástica do solo atravessado [...]”.

Segundo Gonçalves et al. (2007, p. 106), “A energia de cravação a ser utilizada é pré-estabelecida através da altura de queda a ser utilizada em cada golpe desferido e pela massa do martelo ($E_{pot} = mgh$).”. A respeito desse aspecto, a NBR 6122 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996, p. 18) indica que “O uso de martelos mais pesados, com menor altura de queda, é mais eficiente do que o de martelos mais leves, com grande altura de queda, mantido o mesmo conjunto de amortecedores.”. Uma altura de queda excessiva provoca vibrações consideráveis na estaca, as quais são responsáveis por gerar fissuras horizontais, geralmente nos pontos nos quais há armadura transversal (estribos), pois nestes pontos há descontinuidade do material da estaca (GUERRIN; LAVAU, 2002, p. 209).

Alonso (c1991, p. 126) afirma que antes do advento de soluções da Equação da Onda, as tensões nas estacas, decorrentes do golpe do pilão, eram calculadas dividindo-se a resistência de cravação, obtida através de fórmulas de controle de campo (dinâmicas), pela área da seção transversal da estaca.

Almeida (1985, p. 49) afirma que “Simulações por Equação da Onda mostram que para estacas curtas o erro é pequeno quando se considera que há uma força compressiva uniforme ao longo da estaca igual à máxima resistência à cravação.”. Segundo Alonso (c1991, p. 127), “[...] se a estaca é longa, a tensão provocada pelo golpe do pilão gera uma onda que é refletida, e, portanto, aumenta a força de compressão na estaca (superposição de ondas longitudinais de compressão) [...]”.

Podem-se estimar as tensões de compressão decorrentes dos golpes do martelo através de expressões extraídas da equação da onda ou utilizando formulações mais simples como as fórmulas dinâmicas e outras que serão descritas nos itens seguintes.

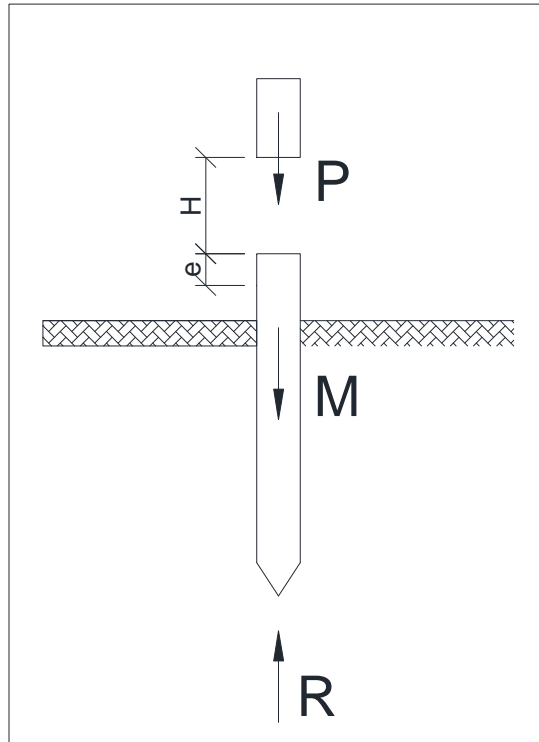
3.2.2 Fórmulas Dinâmicas

Gonçalves et al. (c2007, p. 217) afirmam que “Embora os carregamentos de trabalho aplicados às estacas sejam quase sempre estáticos [...], ao serem cravadas por percussão, os controles a serem feitos quase sempre devem estar associados a métodos dinâmicos.”. Desta forma as fórmulas dinâmicas surgiram com o objetivo de tentar correlacionar a resistência do solo à penetração de uma estaca, durante a cravação, com a sua capacidade de carga estática. Existem diversas fórmulas dinâmicas desenvolvidas para descrever este processo, a grande maioria delas foi deduzida com base na lei de Newton e a teoria de impacto entre dois corpos rígidos, levando em consideração as perdas de energia que podem ocorrer durante o processo de cravação.

Admitindo-se um sistema composto por um bate-estaca atuando com um martelo de queda-livre, conforme a figura 3, pode-se estimar a força resistente do solo, devido ao impacto do martelo, através da fórmula 1. Esta fórmula é a generalização do método de controle de cravação de estacas em campo. Todas as formulações dinâmicas utilizam a medida da nega para determinar a quantidade de energia gasta pelo martelo para promover a penetração da estaca no solo (OLIVEIRA FILHO, 1985). Conforme Alonso (c1991, p. 109), “A nega

corresponde à penetração permanente da estaca, quando sobre a mesma se aplica um golpe do pilão. Em geral é obtida como um décimo de penetração para dez golpes.”.

Figura 3 – Sistema de cravação de estacas com martelo de gravidade



(fonte: OLIVEIRA FILHO, 1985, p. 114)

A fórmula é:

$$P \times \frac{V_0^2}{2g} - P_c - P_e - P_i = R_d \times e \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

P = peso do martelo;

V_0 = velocidade de queda do martelo;

g = aceleração da gravidade;

P_c = perda de energia devido ao tipo de choque – pilão e estaca;

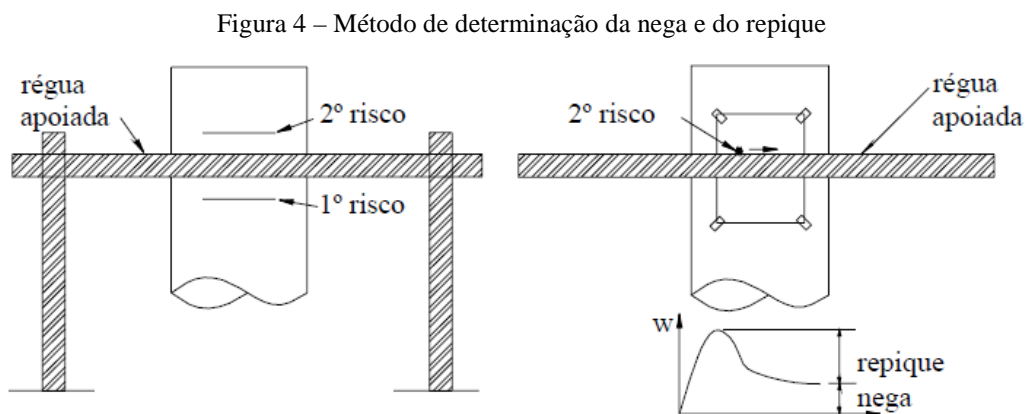
P_e = perda de energia por deformação elástica da estaca;

P_i = perdas por deformação elástica do solo e outras causas;

R_d = resistência do solo a penetração da estaca;

e = penetração da estaca no solo (nega).

Além do método de medição da nega, descrito no item anterior, costuma-se prender uma folha de papel ao fuste da estaca e, no momento do golpe, passar um lápis na horizontal com o auxílio de uma régua que se apóia em pontos fora da estaca (figura 4). Nesse caso, o lápis deixará marcado no papel o movimento da estaca ao receber o golpe do martelo. Este registro indicará a nega e o repique da estaca. O repique é o deslocamento elástico da estaca (GONÇALVES et al., c2007, p. 277).



(fonte: VIEIRA, 2006, p. 7)

Segundo Alonso (c1991, p. 110):

Essas fórmulas foram baseadas na Teoria de Choque de Corpos Rígidos, formulada por Newton, pressupondo-se que o corpo obedece a lei de Hooke e que a resistência é mobilizada inteiramente ao longo de toda a massa, em movimento, de forma instantânea. Essa hipótese pode ser aplicada, por exemplo, ao choque de bolas de bilhar, mas está longe da realidade do movimento de uma estaca sob a ação do choque do pilão.

O mesmo autor ainda aponta outras críticas sobre as fórmulas dinâmicas, como as incertezas quanto à energia real aplicada pelo martelo (uma porcentagem do peso do pilão vezes a altura de queda) e a influência do cepo e coxim, componentes do sistema de amortecimento, no processo de cravação.

Apesar das críticas existentes, as fórmulas dinâmicas continuam sendo uma ferramenta importante para o controle do comprimento de cravação e da capacidade de carga da estaca. Mesmo com o surgimento de métodos que utilizam a Teoria da Equação da Onda e com o avanço da instrumentação de campo, para análise dinâmica da cravação, os métodos mais simples de controle de campo, como as fórmulas dinâmicas, continuam sendo exigências dos engenheiros de fundações (GONÇALVES et al., c2007, p. 261).

Existem inúmeras fórmulas dinâmicas, apresentadas por diversos autores que consideram ou não as perdas de energia no sistema de cravação. As mais utilizadas são as fórmulas 2 (Fórmula de Brix) e 3 (Fórmula dos Holandeses) que dão uma estimativa para a penetração efetiva da estaca (ALONSO, c1991):

$$e = \frac{P^2 \times W_p \times h}{R_d \times (P + W_p)^2} \quad (\text{fórmula 2})$$

$$e = \frac{P^2 \times h}{R_d \times (P + W_p)} \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

P = peso do martelo;

W_p = peso da estaca;

R_d = resistência do solo a penetração da estaca;

h = altura de queda do martelo;

e = penetração da estaca no solo (nega).

A energia de cravação adotada para estas formulações é o resultado do produto entre o peso do martelo de cravação e a altura de queda. O peso do martelo de cravação deve variar na faixa de 70 a 120% do peso da estaca e a altura de queda do martelo é $0,7W/P$, onde P é o peso do martelo e W é o peso da estaca. A altura de queda do martelo deve ser determinada de forma que não ocorra excesso de tensões de cravação. Aconselha-se que esta tensão não ultrapasse o limite de 85% da resistência característica do concreto da estaca, durante a sua cravação (ALONSO, c1991, p. 111).

3.2.3 Fórmula de Hirsch

Hirsch¹ (1966 apud ALMEIDA, 1985) apresentou um conjunto de equações para o cálculo das tensões geradas na cravação baseadas em um desenvolvimento teórico para uma estaca longa com um sistema de amortecimento (cepo e coxim) no topo. O autor propões fórmulas em função da relação entre os valores de n (fórmula 4) e p (fórmula 5):

$$n = \frac{K_c}{2 \times A_p} \times \sqrt{\frac{g}{E \times \gamma}} \quad (\text{fórmula 4})$$

$$p = \sqrt{\frac{K_c \times g}{P}} \quad (\text{fórmula 5})$$

Caso 1 — $n < p$ (fórmula 6):

$$\sigma_{c \text{ máx}} = \frac{-K_c \times V_0 \times e^{-nt_1}}{A_p \sqrt{p^2 - n^2}} \times \sin (t_1 \times \sqrt{p^2 - n^2}) \quad (\text{fórmula 6})$$

Caso 2 — $n = p$ (fórmula 7):

$$\sigma_{c \text{ máx}} = \left(\frac{-K_c \times V_0}{n \times A_p} - \frac{P}{A_p} \right) \times e^{-n} \quad (\text{fórmula 7})$$

¹ HIRSCH, T. J. Fundamental design and driving considerations for concrete piles. **Highway Research Record**, Washington, n. 147, p. 24-34, 1966.

Caso 3 — $n > p$ (fórmula 8).

$$\sigma_{c \text{ máx}} = \frac{-K_c \times V_0 \times e^{-nt_2}}{A_p \sqrt{n^2 - p^2}} \times \sin [h \times (t_2 \times \sqrt{n^2 - p^2})] \quad (\text{fórmula 8})$$

Onde:

$\sigma_{c \text{ máx}}$ = máxima tensão compressiva;

K_c = coeficiente de rigidez do coxim — $\frac{A_c \times E_c}{e_{co}}$;

A_c = área da seção transversal do coxim;

E_c = módulo de elasticidade do coxim;

e_{co} = espessura do coxim;

A_p = área da seção transversal da estaca;

E = módulo de elasticidade da estaca;

g = aceleração da gravidade;

γ = peso específico do material da estaca;

P = peso do martelo;

V_0 = velocidade de queda do martelo;

$$t_1 = \frac{\tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{p^2 - n^2}}{n} \right)}{\sqrt{p^2 - n^2}};$$

$$t_2 = \frac{\tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{n^2 - p^2}}{n} \right)}{h \times \sqrt{n^2 - p^2}}.$$

3.2.4 Fórmula de Gambini

Segundo Gambini² (1982 apud GONÇALVES et al., c2007), quando a nega no final da cravação é pequena, a tensão gerada no topo da estaca, devido ao impacto do martelo pode ser obtida pela fórmula 9:

² GAMBINI, F. *Manuale dei piloti SCAC*. [S. l.]: SCAC, 1982.

$$\sigma_{c \text{ máx}} = \left(\frac{V_0 \times I_w \times C_f}{10 \times A_{pe}} \right) \quad (\text{fórmula 9})$$

Onde:

$\sigma_{c \text{ máx}}$ = máxima tensão compressiva;

V_0 = velocidade de queda do martelo = $\sqrt{2 \times g \times h_1}$;

$h_1 = h \times [P / (P + W_c)]^2$;

h = altura de queda do martelo;

P = peso do martelo do bate estacas;

W_c = peso do capacete;

g = aceleração da gravidade;

$I_w = \sqrt{10 \times P \times k}$;

$k = 0,6 \times A_p \times (1 / (e_{ce} / E_{ce} + e_{co} / E_{co}))$;

$C_f = 0,86 \times (1 - e^{-1,12 \times I_r})$;

$I_r = (\gamma \times c \times A_{pe}) / I_w$;

A_{pe} = área da seção transversal útil da estaca;

A_p = área da seção transversal da estaca;

e_{ce} = espessura do cepo do capacete;

e_{co} = espessura do coxim;

E_{ce} = módulo de elasticidade do material do cepo;

E_{co} = módulo de elasticidade do material do coxim;

c = velocidade de propagação da onda no material da estaca;

γ = peso específico do material da estaca.

3.2.5 Fórmula Empregada nos Estados Unidos

Neste método é considerada apenas a resistência de ponta da estaca. As tensões são calculadas com um pouco de excesso devido à consideração de algumas perdas de energia no processo de cravação da estaca. Assim pode-se estimar a tensão na cabeça da estaca, gerada por um golpe de pilão, através da fórmula 10 (GUERRIN; LAVAU, 2002, p. 231):

$$\sigma_{c \text{ máx}} = 2080 \times \sqrt{\frac{P \times h}{W_p}} \quad (\text{fórmula 10})$$

Onde:

$\sigma_{c \text{ máx}}$ = máxima tensão compressiva;

P = peso do martelo;

h = altura de queda do martelo;

W_p = peso da estaca.

3.3 SOLUÇÕES ANALÍTICAS DA ONDA INICIAL DE COMPRESSÃO

As características dinâmicas de intensidade e da forma da onda de compressão inicial, geradas pelo impacto do martelo na cabeça da estaca, estão diretamente ligadas às características do conjunto martelo, altura de queda, estaca e capacete (GONÇALVES et al., c2007, p. 121). Nos itens seguintes serão apresentadas formulações que determinam a energia transferida à estaca pela onda de impacto do martelo para sistema de cravação com características diferentes.

3.3.1 Martelo e Estaca com a mesma Impedância

Em um sistema de cravação no qual a estaca e o martelo possuem a mesma impedância ($Z_p = Z_h = EA/c$), considerando uma estaca longa e sem resistência lateral, pode-se determinar a energia transferida à estaca pela onda de impacto do martelo pela fórmula 11 e a força de impacto pela fórmula 12 (GONÇALVES et al., c2007).

$$E(t) = \frac{1}{2} \times m_h \times V_0^2 \left(1 - e^{-\frac{2 \times Z}{m_h} \left(t - \frac{x}{c} \right)} \right) \quad (\text{fórmula 11})$$

$$F(x,t) = V_0 \times Z \times e^{-\frac{Z}{m_h} \left(t - \frac{x}{c} \right)} \quad (\text{fórmula 12})$$

Onde:

m_h = massa do martelo;

V_0 = velocidade de queda do martelo;

Z = impedância da estaca;

t = instante após o impacto do martelo;

x = deslocamento ao longo da estaca;

c = velocidade de propagação da onda no material da estaca.

3.3.2 Martelo Rígido e Amortecedor Elástico no Topo da Estaca

Em um sistema de cravação de estacas sempre é instalado, na cabeça da estaca, um dispositivo amortecedor para reduzir a amplitude de tensões geradas pelo impacto do martelo. Outra finalidade deste dispositivo é para que não haja danos na cabeça da estaca durante o processo de cravação. O sistema de amortecimento é composto por duas peças de madeira (cepo e coxim) e por um capacete metálico (GONÇALVES et al., c2007).

O mesmo autor descreve que para a determinação da força de compressão e da energia transmitida à estaca, pelo golpe do martelo, são considerados dois casos distintos, considerando a rigidez do amortecedor. Para um amortecedor macio, com $\beta^2 > \alpha^2$, pode-se descrever a energia transmitida para a estaca pela fórmula 13 e a força de compressão, devido ao impacto do martelo, pela fórmula 14 (a forma da onda resultante para este caso é indicada na figura 5):

$$E(t) = \frac{1}{Z} \times \left(\frac{V_0}{\omega}\right)^2 \left\{ \frac{\omega^2}{4 \times \alpha \times (\alpha^2 + \omega^2)} \right. \quad \text{(fórmula 13)}$$

$$\times \left[1 - \frac{e^{-2\alpha t}}{\omega} (\alpha \times \sin(2\omega t) + \omega \times \cos(2\omega t)) \right]$$

$$\left. - \frac{1}{2\alpha} \times e^{-2\alpha t} \times \sin^2(\omega t) \right\}$$

$$F(t) = \frac{V_0 \times k}{\omega} \times e^{-\alpha t} \times \sin(\omega t) \quad (\text{fórmula 14})$$

Onde:

V_0 = velocidade de queda do martelo;

t = instante após o impacto do martelo;

m_h = massa do martelo;

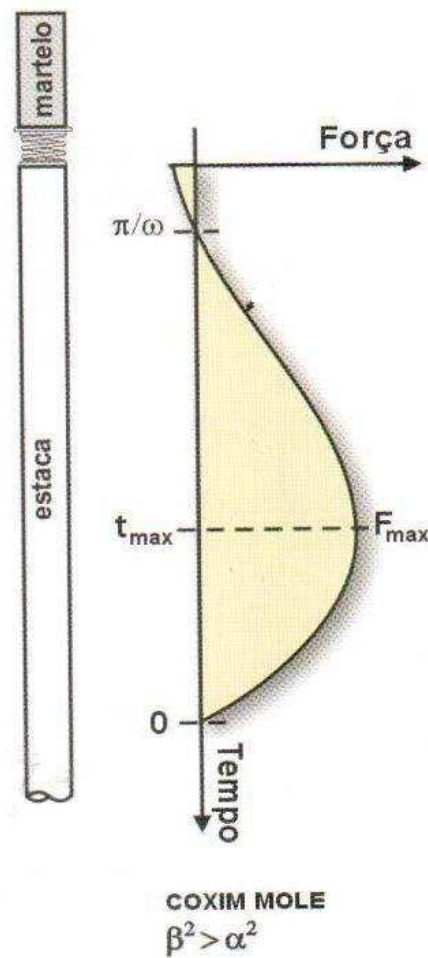
k = constante de rigidez do amortecedor;

$$\alpha = \frac{k}{2 \times Z};$$

$$\beta = \sqrt{k \times m_h};$$

$$\omega = \sqrt{\beta^2 - \alpha^2}.$$

Figura 5 – Onda de compressão para amortecedor macio



(fonte: GONÇALVES et al., c2007, p. 130)

Para o caso em que se tem um sistema de amortecimento rígido, com $\beta^2 < \alpha^2$, pode-se descrever a energia transmitida para a estaca pela fórmula 15, e a força de compressão devido ao impacto do martelo, pela fórmula 16. Pode-se observar a influência que a rigidez do amortecedor possui sobre a forma da onda de compressão através da figura 6 (GONÇALVES et al., c2007):

$$E(t) = \frac{(V_0 \times k)^2}{Z} \left\{ \frac{e^{-2\alpha t}}{2\alpha \times \omega^2} \times \sinh^2(\omega t) + \frac{1}{4\alpha(\omega^2 - \alpha^2)} \right. \\ \left. \times \left[\frac{e^{-2\alpha t}}{\omega} (\omega \times \cosh(2\omega t) + \alpha \times \sinh(2\omega t)) - 1 \right] \right\} \quad (\text{fórmula 15})$$

$$F(t) = \frac{V_0 \times k}{\omega} \times e^{-\alpha t} \times \sinh(\omega t) \quad (\text{fórmula 16})$$

Onde:

V_0 = velocidade de queda do martelo;

t = instante após o impacto do martelo;

m_h = massa do martelo;

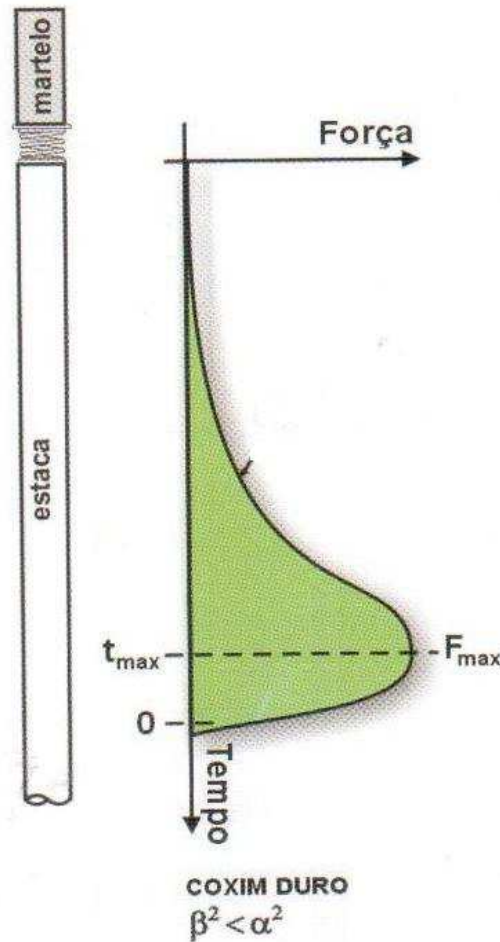
k = constante de rigidez do amortecedor;

$$\alpha = \frac{k}{2 \times Z};$$

$$\beta = \sqrt{k \times m_h};$$

$$\omega = \sqrt{\alpha^2 - \beta^2}.$$

Figura 6 – Onda de compressão para amortecedor rígido



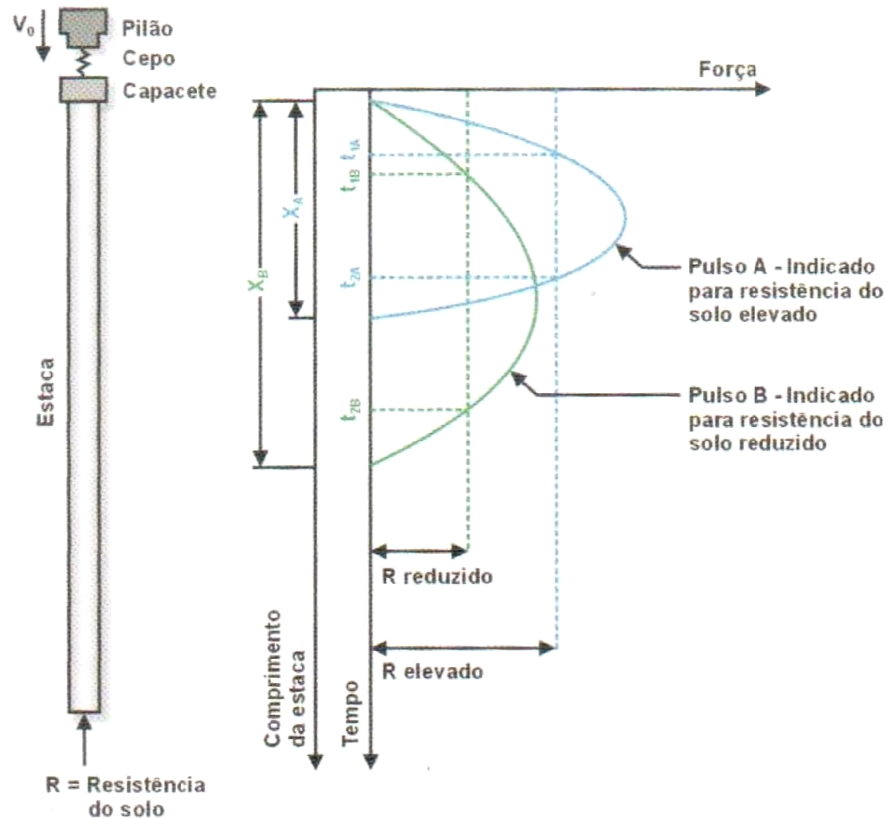
(fonte: GONÇALVES et al., c2007, p. 130)

3.3.3 Influência do Solo na Forma da Onda Resultante

Desta forma, considerando as formulações apresentadas, a forma e a intensidade da onda de compressão ao longo da estaca, promovida pelo impacto do martelo, estão diretamente associadas às características do sistema martelo, rigidez do amortecedor (capacete, cepo e coxim) e características da estaca (comprimento e impedância). Conforme Gonçalves et al. (c2007, p. 133), a eficácia da cravação também depende das características do solo. A resistência lateral tem influência direta na propagação da onda que chegará até ponta da estaca, sendo assim, para solos com compressibilidade elástica elevada, a onda de compressão necessita ser longa para que o deslocamento da ponta da estaca seja maior do que o deslocamento elástico do solo. Assim, para solos resistentes é conveniente utilizar martelo leve, com altura de queda alta e amortecedor rígido. Por outro lado, para solos com baixa

resistência, será ideal o uso de martelos pesados, com altura de queda baixa e amortecedor flexível. A figura 7 apresenta estas duas situações.

Figura 7 – Forma da onda de compressão em função da resistência do solo



(fonte: GONÇALVES et al., c2007, p. 134)

3.4 EQUAÇÃO DA ONDA APLICADA À CRAVAÇÃO DE ESTACAS

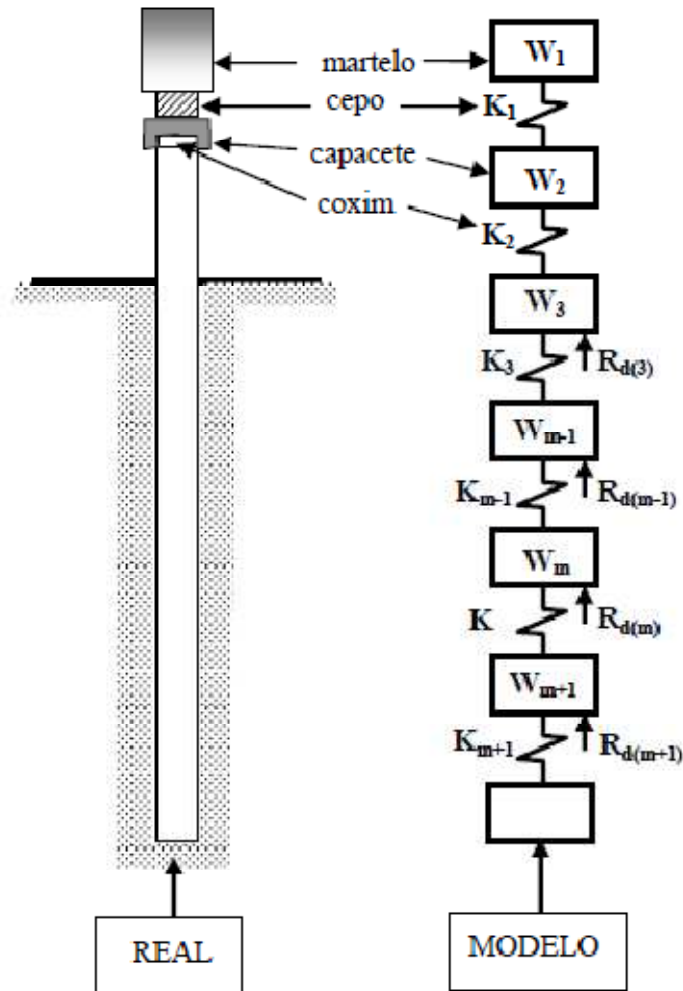
A utilização do método da equação da onda, na análise da cravação de estacas, tornou-se conhecido mundialmente a partir da publicação do trabalho clássico de Smith, quando foi proposto um algoritmo para solução numérica da equação da onda por diferenças finitas (ALVES et al., 2004, p. 15).

No modelo de Smith³ (1960 apud ALVES et al., 2004), o martelo e o capacete, por serem objetos curtos, pesados e rígidos, são, para efeito de análise, simulados por pesos individuais

³ SMITH, E. A. L. Pile driving analysis by the wave equation. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**: Proceedings of the American Society of Civil Engineers, v. 86, n. 4, p. 35-61, Ago. 1960.

sem elasticidade. O cepo e o coxim são representados por molas sem peso, podendo ter ou não um comportamento elástico. Um modelo deste sistema é representado na figura 8.

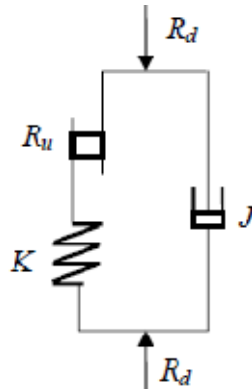
Figura 8 – Modelo proposto por Smith para o sistema dinâmico de cravação



(fonte: ALVES et al., 2004, p. 16)

A resistência do solo à penetração da estaca possui uma componente estática e outra dinâmica. O mesmo autor propôs um modelo simples para a representação da resistência R_d no processo de cravação de uma estaca representado pela figura 9. No modelo proposto, a resistência estática é dada pela mola, proporcional ao deslocamento gerado, e a resistência dinâmica é dada pelo amortecedor, proporcional à velocidade de deslocamento. A fórmula 17 descreve as considerações deste modelo.

Figura 9 – Modelo proposto por Smith para a parcela estática da reação do solo



(fonte: ALVES et al., 2004, p. 16)

A fórmula é:

$$R_d = K \times x + J \times v \quad (\text{fórmula 17})$$

Onde:

R_d = resistência do solo à penetração da estaca;

K = constante da mola;

x = deslocamento ao longo da estaca;

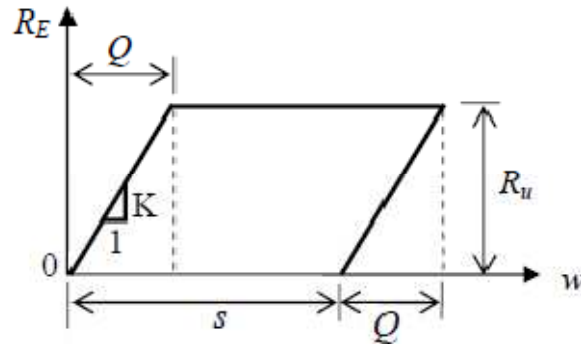
J = coeficiente de amortecimento do solo;

v = velocidade instantânea ao longo da estaca.

Smith⁴ (1960 apud ALVES et al., 2004) define que a parcela estática da reação do solo R_E é admitida como elastoplástica, e o diagrama de cravação é admitido como o da figura 10, no qual Q (*quake*) é o deslocamento no qual a resistência R_u é atingida. É importante salientar que a resistência estática que a estaca apresenta durante o processo de cravação pode não ser, necessariamente, igual a carga estática Q_{ult} . Esse fenômeno decorre das alterações que ocorrem após a cravação da estaca (relaxamento do solo, por exemplo). Por isso, é comum apresentar como notação para a resistência estática R_u , e não Q_{ult} .

⁴ SMITH, E. A. L. Pile driving analysis by the wave equation. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**: Proceedings of the American Society of Civil Engineers, v. 86, n. 4, p. 35-61, Ago. 1960.

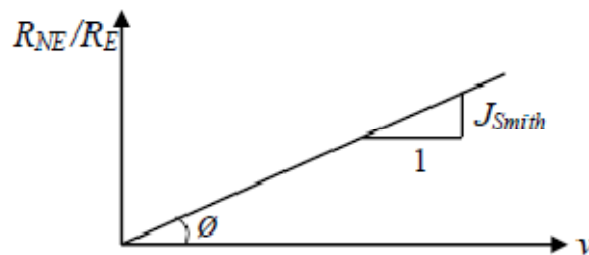
Figura 10 – Parcela estática da reação do solo



(fonte: ALVES et al., 2004, p. 16)

A parcela não estática da reação, R_{NE} , de natureza viscosa, é admitida como proporcional à velocidade do elemento da estaca e à resistência estática, conforme mostra a figura 11, sendo J_{Smith} o coeficiente de amortecimento proposto por Smith⁵ (1960 apud ALVES et al., 2004).

Figura 11 – Parcela dinâmica da reação



(fonte: ALVES et al., 2004, p. 16)

Da figura 11 obtém-se a fórmula 18:

$$\tan \phi = J_{Smith} = \frac{R_{NE}}{R_E} \cdot \frac{1}{v} \quad \therefore R_{NE} = R_E \times J_{Smith} \times v \quad (\text{fórmula 18})$$

Onde:

J_{Smith} = coeficiente de amortecimento proposto por Smith;

R_{NE} = parcela não estática da reação do solo;

R_E = parcela estática da reação do solo;

⁵ SMITH, E. A. L. Pile driving analysis by the wave equation. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**: Proceedings of the American Society of Civil Engineers, v. 86, n. 4, p. 35-61, Ago. 1960.

v = velocidade instantânea ao longo da estaca.

Tendo que $R_d = R_E + R_{NE}$ se obtém a fórmula 19:

$$R_d = K \times x \times (1 + J_{Smith} \times v) \quad (\text{fórmula 19})$$

Onde:

J_{Smith} = coeficiente de amortecimento proposto por Smith;

K = constante da mola;

x = deslocamento ao longo da estaca;

v = velocidade instantânea ao longo da estaca.

Desta forma a reação dinâmica do solo ao golpe do martelo de cravação é determinada pela fórmula 20, para $w < Q$, ou pela fórmula 21, para $w \geq Q$:

$$R_d = \frac{R_u}{Q} \times w \times (1 + J_{Smith} \times v) \quad (\text{fórmula 20})$$

$$R_d = R_u \times w \times (1 + J_{Smith} \times v) \quad (\text{fórmula 21})$$

Onde:

R_d = resistência do solo à penetração da estaca;

R_u = parcela estática da reação do solo;

w = deslocamento em certa seção da estaca;

J_{Smith} = coeficiente de amortecimento proposto por Smith;

v = velocidade instantânea ao longo da estaca;

Q = deslocamento no qual a resistência R_u é atingida (*quake*).

Smith⁶ (1960 apud ALVES et al., 2004) considera, de sua experiência pessoal e de alguns resultados de provas de carga, que a variável Q (*quake*) do solo é igual a 0,1" (2,54 mm), tanto para a ponta como para o atrito lateral, independentemente do tipo de solo e da geometria da estaca. Para o parâmetro J_{Smith} , o mesmo autor propõe os valores de 0,49 s/m para a ponta e 0,16 s/m para o atrito lateral.

Em princípio, o método proposto tem como principal objetivo a previsão das tensões de cravação nas estacas. Com o passar do tempo e o uso cada vez mais disseminado do método por parte dos engenheiros, sua aplicação foi sendo ampliada, atualmente podendo ser utilizado para a elaboração de gráficos de cravabilidade (ALVES et al., 2004, p. 17).

3.5 MODELO DE PROPAGAÇÃO DA ONDA NA ESTACA

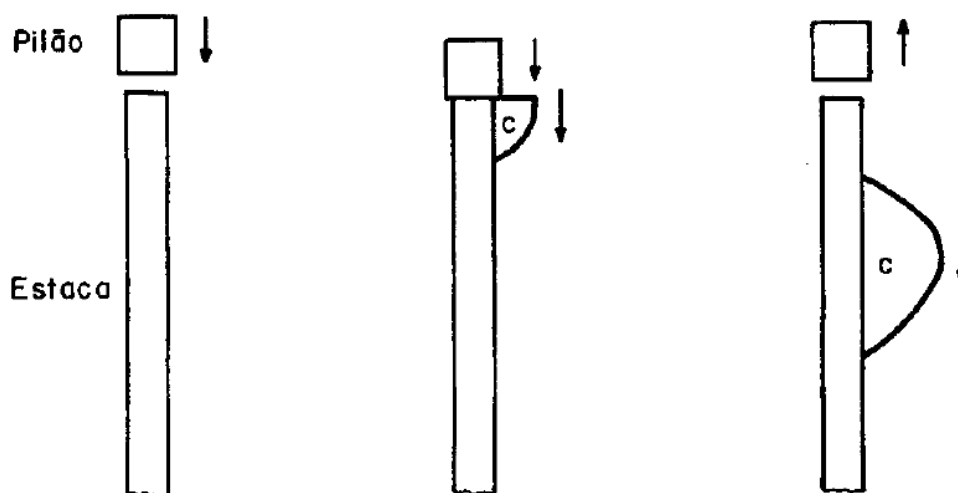
A análise da cravação de estacas, para um modelo real de propagação da onda de compressão, é um processo bastante complexo, sendo necessária a adoção de hipóteses simplificadoras para se obter um modelo compatível com o modelo real. Um modelo simples simula a interação dinâmica incluindo os elementos do martelo, a propagação de ondas ao longo da estaca e a resistência do solo associada ao movimento da estaca promovido pelo impacto do martelo. Neste modelo o comportamento dinâmico da estaca, sob impacto, pode ser descrito pela equação da onda unidimensional utilizando o princípio de superposição de ondas (NAKAO, 1981, p. 74).

De maneira simplificada, a propagação de ondas, geradas pelo impacto do martelo, ao longo da estaca, podem ser definidas como um caso particular do impacto entre duas barras uniformes de comprimento L_1 e L_2 . É suposto que a estaca encontra-se inicialmente em repouso, sem resistência lateral, quando ocorre o impacto do pilão submetido a uma velocidade V_0 . O impacto gera duas ondas de compressão que se propagam tanto na estaca quanto no martelo. A onda de compressão gerada propaga-se ao longo da estaca sem sofrer modificações, uma vez que, inicialmente, não existe resistência lateral como pode ser observado na figura 12. Quando a onda de compressão atinge a ponta da estaca o gradiente de tensão depende das condições de suporte desta extremidade; se a ponta da estaca estiver apoiada sobre argila muito mole, não há essencialmente resistência ao deslocamento e a

⁶ SMITH, E. A. L. Pile driving analysis by the wave equation. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**: Proceedings of the American Society of Civil Engineers, v. 86, n. 4, p. 35-61, Ago. 1960.

tensão na ponta da estaca é praticamente nula. O equilíbrio dinâmico só é mantido se uma onda se propagar a partir da extremidade da estaca na forma de onda refletida. No caso de uma extremidade livre, a onda refletida será de tração e a tensão resultante na estaca será a diferença entre as componentes de compressão (onda incidente) e tração (onda refletida) (NAKAO, 1981).

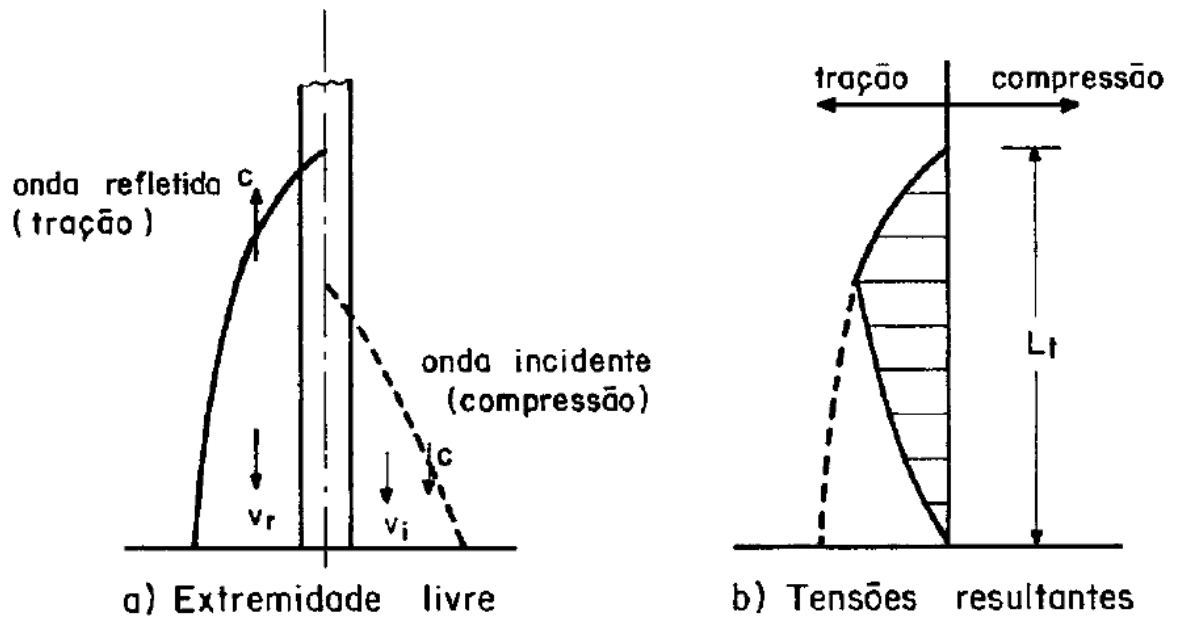
Figura 12 – Propagação de ondas na estaca



(fonte: NAKAO, 1981, p. 85)

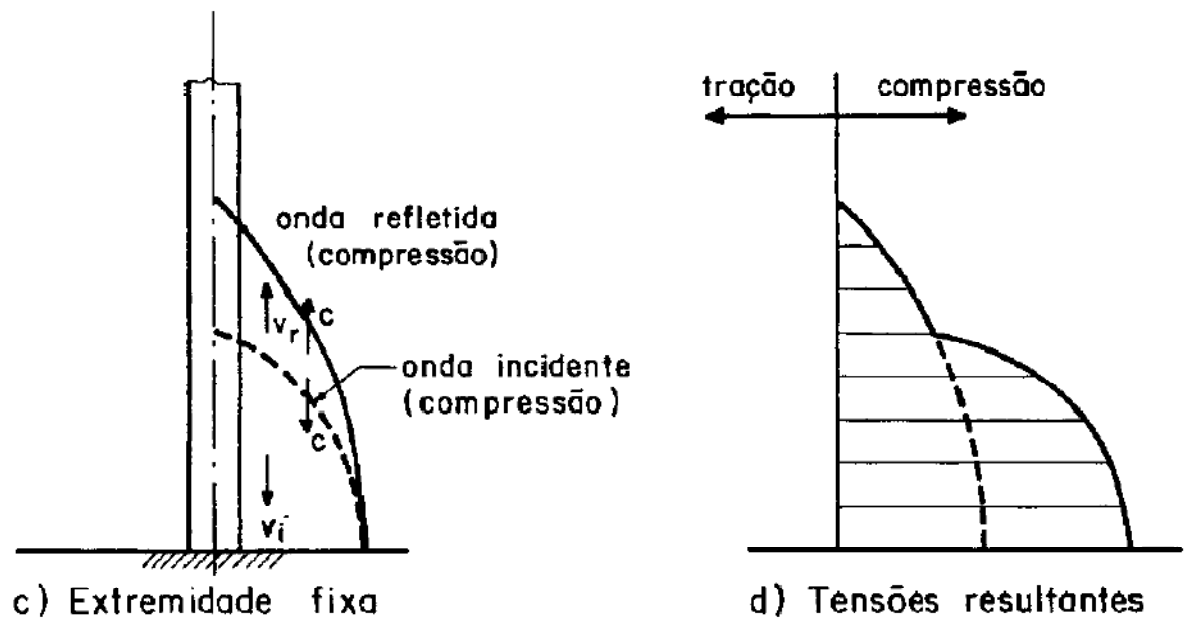
O mesmo autor afirma que se a ponta da estaca repousa sobre um solo rígido, de forma que não haja praticamente nenhum deslocamento na ponta da estaca, a onda refletida será oposta a onda incidente e de mesmo sinal. A tensão total é dada pela onda resultante da soma das componentes incidente e refletida. As duas condições expostas, para ponta repousando sobre solo mole e sobre solo resistente, podem ser observados, respectivamente, nas figuras 13 e 14. Após a superposição das ondas na ponta da estaca, estas se propagam ao longo do fuste em direção ao topo da estaca.

Figura 13 – Propagação de ondas em estacas com ponta repousando sobre solos moles



(fonte: NAKAO, 1981, p. 85)

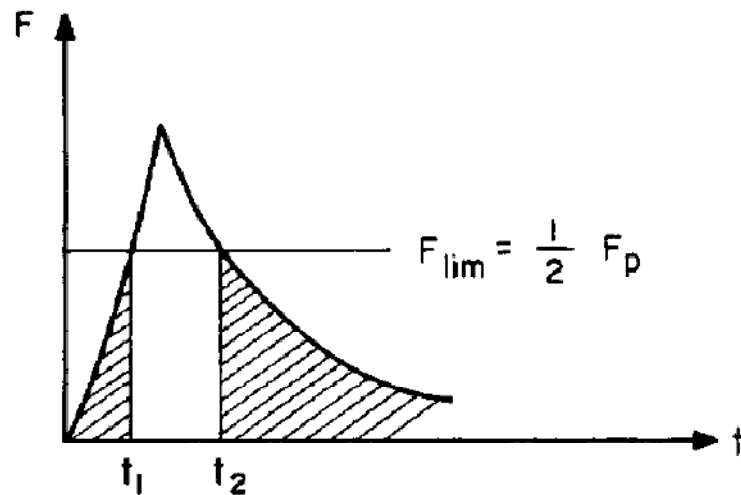
Figura 14 – Propagação de ondas em estacas com ponta repousando sobre solos rígidos



(fonte: NAKAO, 1981, p. 85)

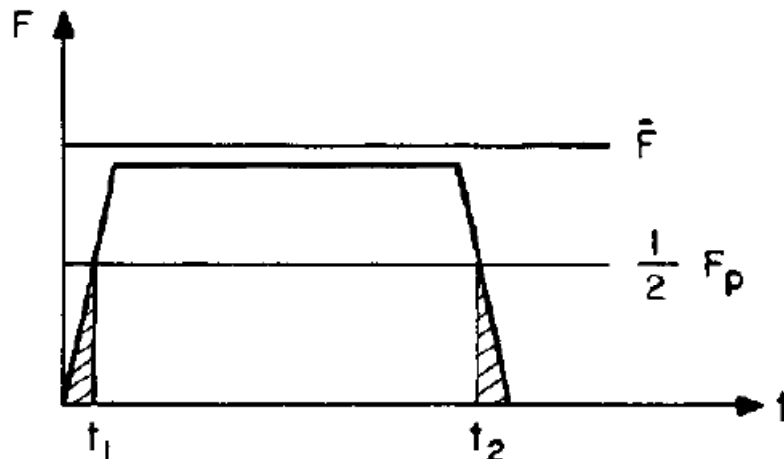
Nakao (1981, p. 90) define que a força limite para que a estaca penetre no solo é igual a metade da resistência de ponta da estaca. Um diagrama de impacto apresentado na figura 15 demonstra que apenas durante um intervalo de tempo (t_1 e t_2), quando a força gerada pela onda resultante de compressão ultrapassa a metade da resistência de ponta, ocorre a penetração da estaca no solo. Com isso pode-se concluir que um diagrama de impacto ideal é aquele em que a força de impacto exceda a força resistente do solo pelo maior intervalo de tempo possível sem, com isso, exceder a força resistente do material da estaca, como pode ser observado na figura 16. Um diagrama como o obtido na figura 16 é característico para os casos em que se procura utilizar martelos de massa mais elevada à utilizar alturas de queda elevadas, o que aumentaria o pico da força encurtando a duração da aplicação da carga.

Figura 15 – Diagrama de impacto para um martelo de queda livre



(fonte: NAKAO, 1981, p. 91)

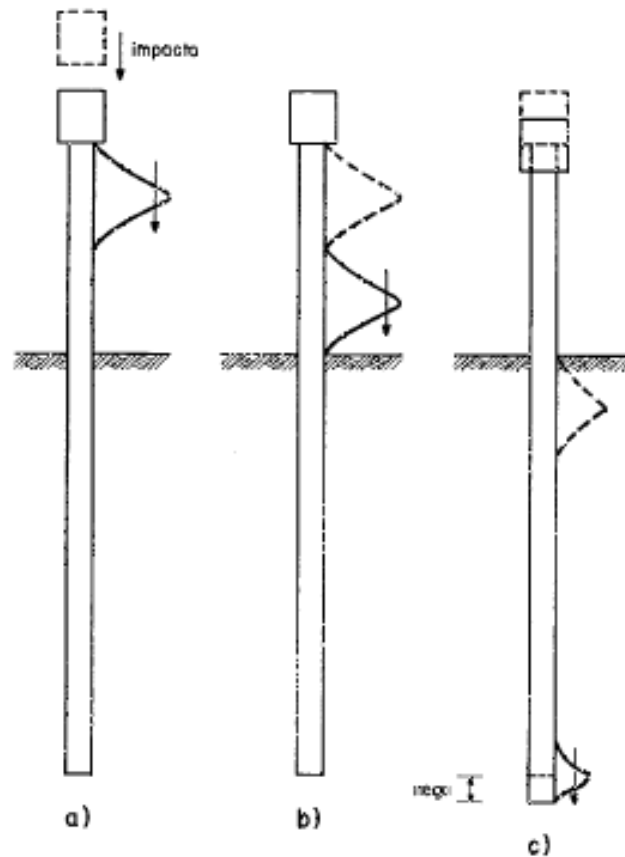
Figura 16 – Diagrama de impacto ideal



(fonte: NAKAO, 1981, p. 91)

Segundo o mesmo autor, os diagramas de impactos, produzidos por martelos de queda livre, apresentam um pico de força que ocorre somente durante um pequeno intervalo de tempo após o início do impacto; imediatamente após este pico de força ocorre um rápido decréscimo na intensidade da onda de compressão. A onda de tensão se desenvolve desta forma em todas as seções ao longo do comprimento da estaca enquanto não houver resistência contrária ao deslocamento da onda, como a resistência do solo. Assim a onda se propaga ao longo da estaca com velocidade constante, na região não cravada, sem diminuir sua amplitude. A medida que a onda se propaga na região enterrada da estaca, a amplitude da onda se reduz devido a resistência lateral do solo. Este fenômeno pode ser observado na figura 17.

Figura 17 – Etapas da propagação da onda na cravação da estaca



(fonte: NAKAO, 1981, p. 95)

4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DESCRITOS E ESFORÇOS GERADOS PELA ONDA DE COMPRESSÃO RESULTANTE

Nos itens anteriores foram descritas as formulações empregadas para estimar a tensão máxima no topo da estaca, promovida pelo impacto do martelo. Porém esta tensão nem sempre chega a ocorrer nesta intensidade durante o processo de cravação da estaca no solo, uma vez que ela resulta da resposta do solo à onda de compressão que se desloca ao longo da estaca. No item a seguir, serão empregadas as formulações descritas anteriormente para um caso prático, no qual ocorreram danos a estaca durante o processo de cravação, a fim de validar estes resultados com os obtidos na monitoração do processo de cravação da estaca em campo. Posteriormente será descrita a forma como se desenvolve a onda de compressão ao longo da estaca e como a onda provoca a cravação da estaca no solo.

4.1 VALIDAÇÃO DAS FORMULAÇÕES DESCRITAS

Para a validação das formulações já descritas foi utilizado um exemplo prático de estacas que sofreram danos no processo de cravação conforme observado nas figuras 18 e 19. Estas estacas foram produzidas pelo processo de centrifugação em concreto armado e dimensionadas para resistir às cargas de serviço bem como às solicitações provenientes do transporte e cravação da estaca. O método de cravação utilizado foi por percussão utilizando martelo de queda livre. As características das estacas, do sistema de cravação e dos seus componentes são listadas a seguir:

Diâmetro externo da estaca = 60 cm

Diâmetro interno da estaca = 40 cm

$F_{ck} = 35 \text{ MPa}$

$F_{yk} = 600 \text{ MPa}$

Peso do martelo (pilão) = 4100 kgf

Altura de queda do martelo = 1,50 m

Carga de projeto = 170 tf

$c = 3800 \text{ m/s}$

Figura 18 – Danos ocorridos no corpo da estaca



(fonte: foto do autor)

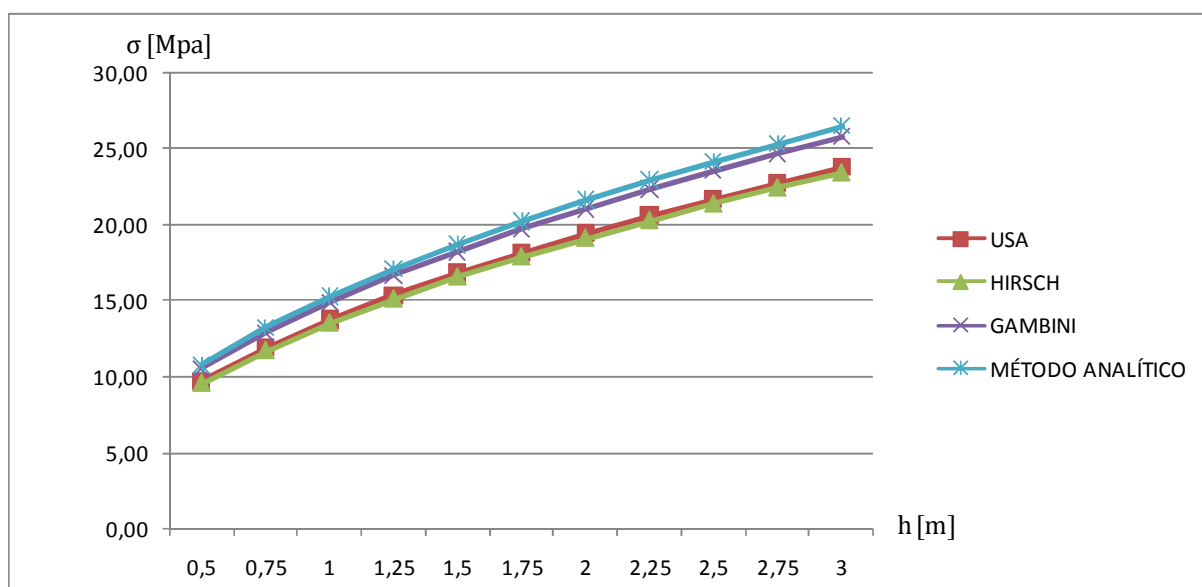
Figura 19 – Trinca ocorrida no processo de cravação da estaca



(fonte: foto do autor)

Na figura 20, é apresentada a distribuição das tensões máximas no topo da estaca, utilizando um intervalo pré-estabelecido de variação da altura de queda do martelo, para que seja possível observar a variação das tensões para diferentes alturas de queda do martelo.

Figura 20 – Tensão de compressão no topo da estaca no instante do impacto do martelo de queda livre



(fonte: elaborado pelo autor)

Partindo dos resultados obtidos na aplicação das formulações, comparam-se estes com os obtidos no processo de monitoração da cravação das estacas. Estes resultados estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Tensão de compressão no topo da estaca conforme ensaio PDA
(*Pile driving analyser*)

Estaca N°	Golpe N°	TENSÃO Média (MPa)	Maior dos 2 sensores (MPa)
E1-21A	5	17,9	25,4
E1-21B	8	23,1	23,7
E1-08B	8	21,4	22,4
E1-11B	7	22,1	23,4

(fonte: elaborado pelo autor)

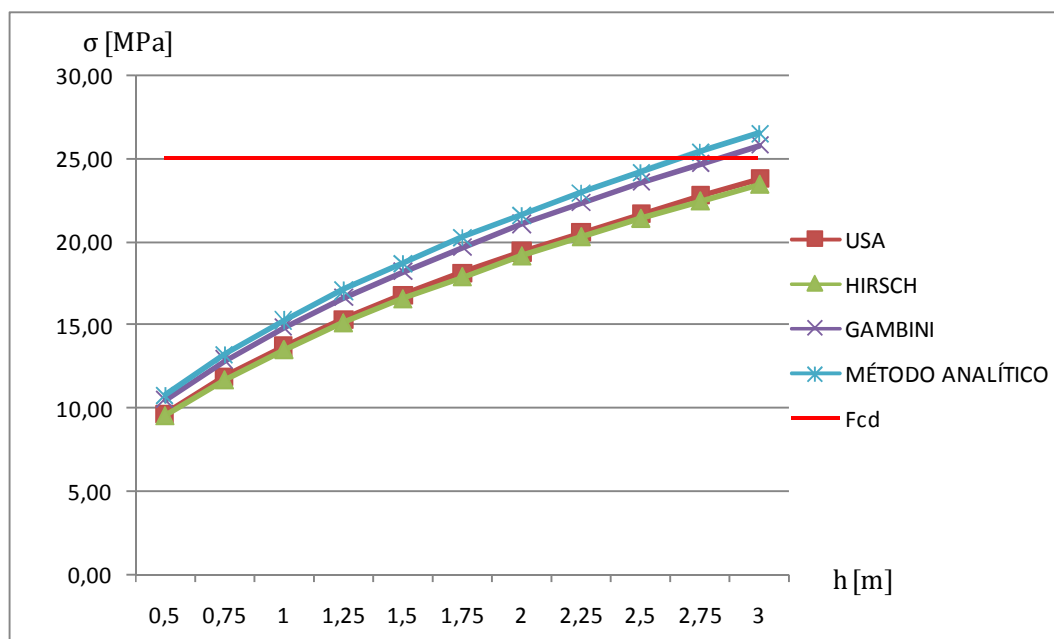
Analisando a correlação observada entre os resultados obtidos no monitoramento da cravação e aqueles obtidos por formulações, verifica-se que há uma forte correlação entre os mesmos, podendo-se utilizar estas formulações para estimar as tensões provenientes do processo de cravação ainda na etapa de projeto e dimensionamento da estaca. É importante salientar que a previsão das tensões máximas que podem ocorrer no processo de cravação é um fator muito importante para o dimensionamento das estacas, uma vez que estas tensões podem, eventualmente, superar as tensões provenientes da carga de projeto durante a cravação.

No item a seguir será descrito os esforços gerados na estaca durante a cravação, para os quais ela deverá ser dimensionada para resistir.

4.2 SOLICITAÇÕES GERADAS NA ESTACA PELA FORÇA DE IMPACTO DO MARTELO

Decorrente do impacto do martelo, são gerados dois tipos de esforços na estaca, compressão direta, e, decorrente da deformação elástica na compressão, esforços transversais de tração. Na figura 21 se pode observar que apenas para alturas de queda muito elevadas, acima de 2,5 m, as tensões de compressão ultrapassam o limite a compressão do concreto da estaca.

Figura 21 – Análise das tensões de compressão na estaca



(fonte: elaborado pelo autor)

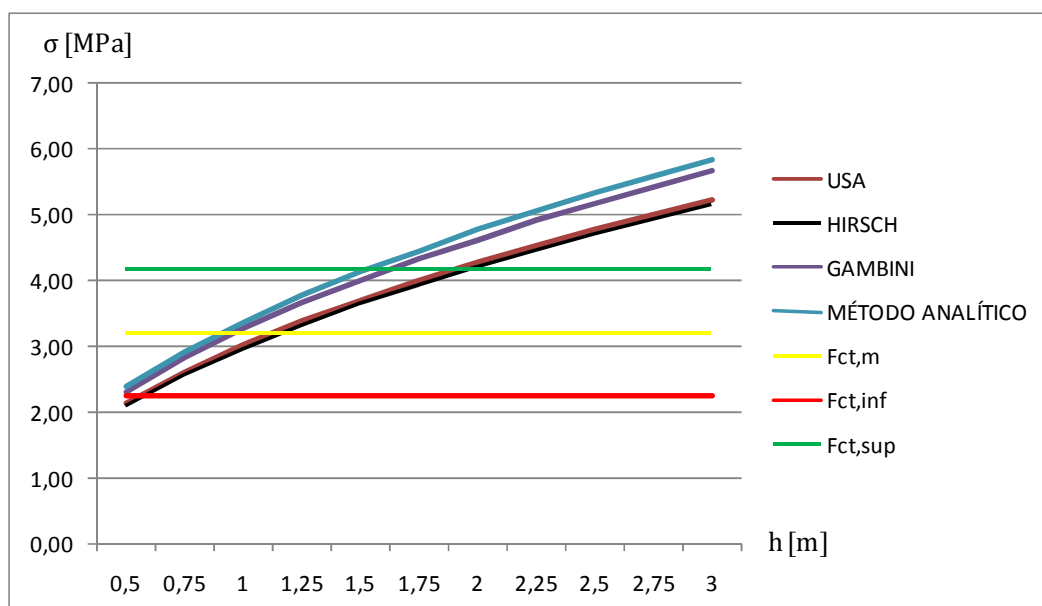
Desta forma, observa-se que as tensões de compressão não são, diretamente, a causa de danos gerados na cravação de estacas, uma vez que se encontram muito abaixo da resistência de cálculo do concreto utilizado na fabricação da estaca. Porém estas tensões de compressão geram, também, esforços transversais de tração ao longo da estaca, decorrente da deformação instantânea do concreto considerando seu comportamento elástico com coeficiente de Poisson em torno de 0,22. Desta forma a figura 22 apresenta a distribuição de tensões de tração decorrentes das tensões de compressão, tendo como referência, para a resistência a tração do concreto, os valores calculados conforme determina a norma NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 22) expressos nas fórmulas 22, 23 e 24:

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \times f_{ct,m} \quad (\text{fórmula 22})$$

$$f_{ct,m} = 0,3 \times f_{ck}^{2/3} \quad (\text{fórmula 23})$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 \times f_{ct,m} \quad (\text{fórmula 24})$$

Figura 22 – Análise das tensões de tração na estaca

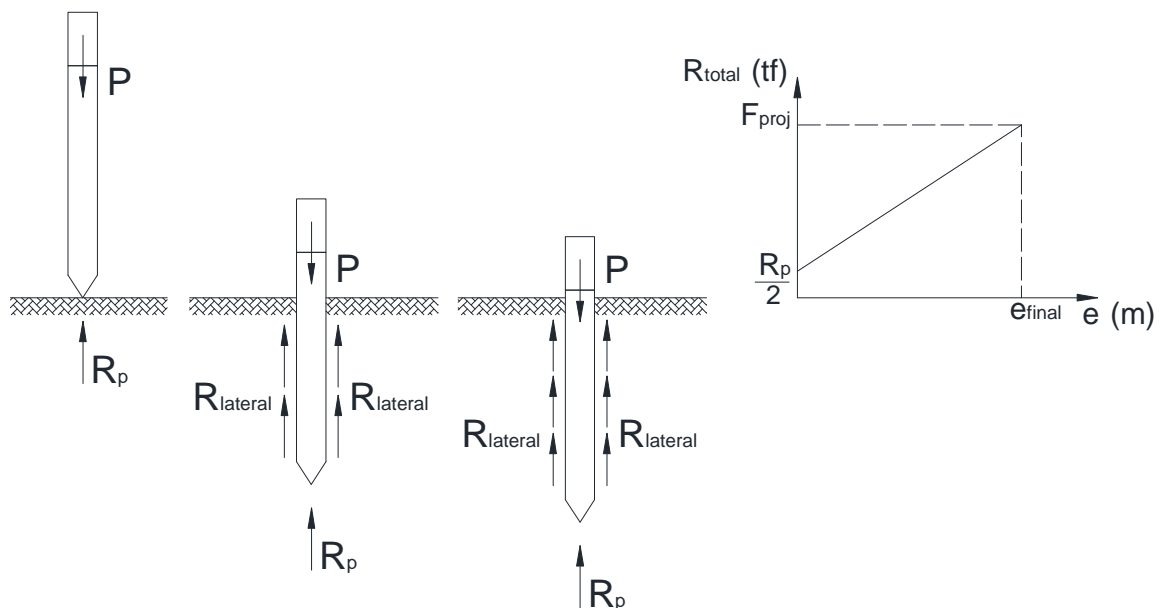


(fonte: elaborado pelo autor)

Assim tem-se que para alturas de queda pequenas, em torno de 1 m, as tensões de tração geradas na estaca excederam a resistência média do concreto, sendo, portanto, necessária a presença de armadura transversal (estribos) para que a estaca esteja apta a resistir a estes esforços.

Porém não se pode, precipitadamente, considerar que tais tensões calculadas, sejam as que se devam considerar para o cálculo da armadura transversal, uma vez que se observa que elas são as máximas que podem ocorrer para o sistema de cravação utilizado combinado às características geométricas e comportamento mecânico da estaca. Como descrito no item 3.5 a força mínima para que a estaca penetre no solo é determinada pela metade da resistência de ponta da estaca, assim como a máxima força resistente do solo é a carga solicitante da estrutura, determinada no projeto. Desta afirmação, tem-se que a resistência do sistema, composto pela estaca e solo, cresce linearmente da metade da resistência de ponta, no início da cravação, até a carga de projeto, no final da cravação. Esta variação da força resistente, com a penetração (e) da estaca no solo, pode ser observada na figura 23. Portanto, define-se que para o dimensionamento da armadura transversal (estribos), deve-se utilizar como solicitação o esforço transversal produzido pela aplicação de uma carga igual a especificada no projeto.

Figura 23 – Variação da resistência do sistema estaca x solo com a penetração da estaca



(fonte: elaborado pelo autor)

No próximo item será avaliada a armadura transversal presente na estaca estudada, para avaliação da adequação aos esforços solicitantes. Também será analisada a aplicação, adequação e eficácia do reforço exigido pela norma NBR 6122 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996) nas extremidades da estaca, o qual é objeto da pesquisa desenvolvida neste trabalho.

4.3 AVALIAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DA ARMADURA TRANSVERSAL AOS ESFORÇOS SOLICITANTES

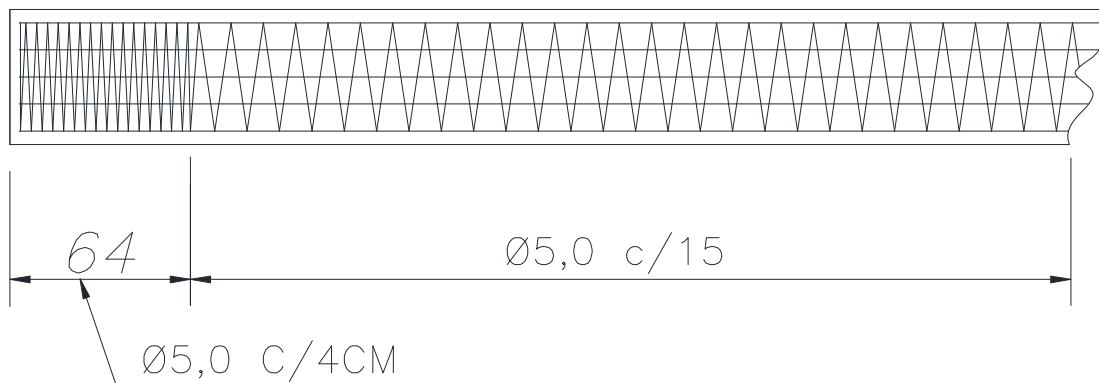
Conforme indicado no item anterior, uma armadura de estribos é necessária para resistir aos esforços transversais de tração solicitados pela carga resultante nos instantes finais da cravação, quando a carga promovida pelo impacto do martelo alcança sua intensidade máxima no topo da estaca. Desta última afirmação, deve-se salientar que a intensidade máxima da onda de compressão é válida para a região não confinada pelo solo, uma vez que no comprimento confinado os esforços sobre a estaca são absorvidos pela resistência lateral do solo. Assim pode-se concluir que o reforço exigido, na norma citada anteriormente, deve ser realizado em uma região próxima do topo da estaca, onde a carga alcançará sua intensidade máxima, para que não haja danos nesta região.

Para se definir o reforço necessário em estacas de concreto armado é preciso observar as características da armadura transversal (estribos). Para uma determinada área de aço requerida para a armadura transversal, os parâmetros envolvidos são: o diâmetro das barras dos estribos e o espaçamento entre os mesmos, resultante do diâmetro selecionado. Assim, para elevados esforços transversais de tração, o reforço necessário no topo da estaca é dado pelo adensamento da armadura transversal nesta região, com um determinado espaçamento entre estribos, suficiente para resistir às solicitações provenientes do processo de cravação. Sendo a carga máxima atingida próximo do final da cravação, onde praticamente todo o comprimento da estaca já penetrou no solo, espera-se que a armadura de estribos, suficiente para suportar os esforços transversais gerados, seja necessária apenas nesta região, sendo aplicada nas demais regiões da estaca uma menor área de aço, logo, um maior espaçamento entre estribos.

Utilizando o exemplo prático apresentado anteriormente, pode-se observar na figura 24 a distribuição, bem como o diâmetro estabelecido, da armadura transversal dimensionada para a estaca objeto da aplicação dos estudos realizados. É notável a redução do espaçamento entre

estribos na extremidade da estaca, sendo este o reforço dimensionado para suportar as solicitações impostas a esta.

Figura 24 – Detalhamento da armadura transversal especificada em projeto para a estaca estudada



(fonte: elaborado pelo autor)

Quando calculada para a situação de carregamento estático, é verificado que a armadura especificada para a estaca é adequada para resistir aos esforços. Nota-se que o comprimento de reforço aplicado à estaca é compatível com o comprimento proposto na hipótese deste trabalho. Desta forma supõe-se que os danos ocorridos nesta estaca não foram causados por insuficiência de armadura transversal ou comprimento de reforço inadequado.

Entretanto, esse critério, proposto para o comprimento de adensamento da armadura transversal, acaba desprezando o comportamento elástico da estaca até alcançar a profundidade necessária para que o sistema estaca-solo seja considerado engastado e a estaca lateralmente confinada. Este comprimento elástico pode ser calculado pela fórmula 25 proposta por Matlock e Reese (1961); para a estaca estudada foi obtido um comprimento elástico de 2,21 m. Considerando que a estaca estará confinada apenas abaixo deste comprimento cravado, a tensão transversal máxima ocorrerá até esta profundidade, sendo necessário o prolongamento do adensamento dos estribos até este ponto. Uma vez que o comprimento elástico não é considerado no dimensionamento da estaca, forma-se nesta região uma zona frágil, onde a estaca não está apta a resistir aos esforços máximos transversais. Desta forma, para a estaca tubular utilizada como aplicação prática na pesquisa, deveria ter sido considerada a armadura transversal, dimensionada para a carga de projeto de 170 tf,

distribuída em um comprimento mínimo de 2,21 m, diferente do comprimento considerado no projeto, bem como do comprimento proposto como hipótese para este trabalho.

$$L_0 = \sqrt[4]{\frac{EI}{K_h}} \quad (\text{fórmula 25})$$

Onde:

L_0 = comprimento elástico resultante do sistema estaca-solo;

E = módulo de elasticidade do material da estaca;

I = Inércia da seção transversal da estaca;

K_h = coeficiente de reação lateral do solo.

Outro ponto importante a ser avaliado vem de um critério, trazido da prática de dimensionamento de cargas geotécnicas para estacas escavadas, empregado para a previsão do comprimento necessário para que se atinja a capacidade de carga especificada em projeto; este critério utiliza a composição da capacidade total de carga do sistema estaca-solo, pelo somatório da componente da resistência de ponta e das componentes de resistência lateral, aplicando um fator de segurança de no mínimo 2 para a carga admissível. Para o caso de estacas cravadas que, diferentemente das estacas escavadas, sofrem com o efeito da carga dinâmica durante a execução, deve-se utilizar para dimensionamento a carga máxima possível de ser atingida (considerando fator de segurança ≥ 2), tanto para a estaca quanto para o sistema de cravação. Considerando, no dimensionamento do sistema de cravação, a capacidade total de carga a ser mobilizada, evitar-se-á que ocorra do sistema de cravação atingir o seu limite de mobilização da carga antes da estaca ter sido cravada completamente, como pode ser observado na figura 25, uma vez que o comprimento previsto para a estaca é em função da capacidade total de carga. Quando esse fenômeno ocorre, o comprimento de adensamento da armadura transversal torna-se completamente insuficiente, provocando, em muitos casos, a quebra da estaca por haver um comprimento livre bastante elevado gerando instabilidade lateral.

Figura 25 – Detalhe do comprimento não cravado das estacas na obra



(fonte: foto do autor)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a realização deste trabalho foi possível constatar que para desenvolver e expandir a aplicação de elementos pré-fabricados, a todos as áreas da Indústria da Construção Civil, onde sejam aplicadas fundações profundas em estacas, é necessária, inicialmente, uma reavaliação dos critérios utilizados para o dimensionamento das estacas como elemento estrutural, bem como do sistema utilizado para cravá-la. Apenas quando estes critérios forem desenvolvidos, especificamente, para serem aplicados a estacas de diferentes cargas solicitantes, se poderá garantir a eficácia do adensamento da armadura transversal e do comprimento necessário.

Tendo garantido os parâmetros citados no parágrafo anterior, foi demonstrado neste trabalho que para se garantir um reforço adequado, deve-se considerar o comprimento elástico da estaca, variável com o diâmetro da sua seção transversal e o tipo de solo, tendo neste o comprimento mínimo necessário para que a estaca resista aos esforços solicitantes. Esta afirmação invalida a hipótese proposta para o comprimento necessário para o reforço. Tendo em vista que a estaca tubular, utilizada como aplicação prática das metodologias descritas, não cumpria estes requisitos, há neste ponto um critério para julgar os danos ocorridos nelas durante o processo de cravação. Para a extremidade de ponta da estaca, propõem-se manter as dimensões indicadas na hipótese deste trabalho, uma vez que nesta região o adensamento da armadura é utilizado para garantir a rigidez desta, a fim de resistir aos esforços gerados na cravação em solos duros e transposição de camadas de elevada resistência.

Nos dados apresentados também foi possível observar que a instrução de se utilizar martelos com a maior massa disponível a utilizar altura de quedas elevadas, decorre do fato que, utilizando martelos de maior peso gera-se uma carga com menor intensidade, porém mais duradoura. Enquanto que, quando se opta por utilizar altura de queda elevada resulta um pico de força mais elevado, porém de menor duração, acarretando na necessidade de um maior número de golpes para que a estaca alcance a profundidade especificada. Tendo em vista que um elevado número de golpes pode ser prejudicial à estaca, reafirma-se a orientação de se optar por aumentar o peso do martelo mantendo uma altura de queda adequada.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, H. R. **Monitoração de estacas e o problema de tensões de cravação**. 1985. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1985.
- ALONSO, U. R. **Previsão e Controle das Fundações**: uma introdução ao controle da qualidade em fundações. São Paulo: Edgard Blücher, c1991.
- ALVES, A. M. L.; LOPES, F. R.; DANZIGER, B. R. Métodos dinâmicos para previsão e controle do comportamento de estacas cravadas. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio de Janeiro, n. 4, p. 12-21, abr. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122**: projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 1996.
- EL DEBS, M. K. **Concreto Pré-Moldado**: fundamentos e aplicações. São Carlos: EESC-USP, 2000.
- GONÇALVES, C.; BERNARDES, G. P.; NEVES, L. F. S. **Estacas Pré-Fabricadas de Concreto**: teoria e prática. São Paulo: [s. n.], c2007.
- GUERRIN, A.; LAVAUUR, R. C. **Tratado de Concreto Armado**: as fundações. São Paulo: Hemus, 2002. v. 2.
- MATLOCK, H.; REESE, L. C. Foundation analysis of offshore pile-supported structures. **Proceedings of the 5th International Conference**, International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, France, v. 2, p. 91-97, 1961.
- NAKAO, R. **Aplicação da equação da onda na análise do comportamento de estacas cravadas**. 1981. 333 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1981.
- OLIVEIRA FILHO, U. M. **Fundações Profundas**: estudos. 2. ed. Porto Alegre: D.C. Luzzatto, 1985.
- VIEIRA, S. H. A. **Controle da cravação de estacas pré-moldadas**: avaliação de diagramas de cravação e fórmulas dinâmicas. 2005. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.