

## Metodologia para Controle de Estaqueamento com Redução de Quebras em Estacas Pré-moldadas de Concreto

Jean Felix Cabette

Benaton Specialist, São Paulo, Brasil, [jeancabette@benaton.com.br](mailto:jeancabette@benaton.com.br)

Daniel Kina Murakami

Benaton Specialist, São Paulo, Brasil, [daniel.murakami@benaton.com.br](mailto:daniel.murakami@benaton.com.br)

Eduardo Eroico Sobrinho

Benaton Specialist, São Paulo, Brasil, [diretoria@benaton.com.br](mailto:diretoria@benaton.com.br)

Carlos José Novaes Ramires

Grupo Itajaí, São Paulo, Brasil, [ramires@grupoitajai.com.br](mailto:ramires@grupoitajai.com.br)

Roberto Racanicchi

Racanicchi Consultoria e Projetos de Engenharia Ltda., Fernandópolis, Brasil, [rracanicchi@terra.com.br](mailto:rracanicchi@terra.com.br)

**RESUMO:** A norma brasileira de fundações NBR 6122:2022 (Projeto e Execução de Fundações) estabelece a obrigatoriedade de provas de carga estática (PCE), com a possibilidade de substituição por ensaios dinâmicos (ECD) na proporção de 5 ECD para 1 PCE em algumas situações. No caso específico de estacas pré-moldadas de concreto, a realização de provas de carga é exigida quando a tensão admissível for superior a 7,0 MPa ou o número de estacas do projeto de fundações for superior a 100. Diante da obrigatoriedade de realização de provas de carga, desenvolveu-se uma metodologia específica para controle de estaqueamento com o objetivo de reduzir substancialmente o índice de quebras de estacas em obras com características complexas, como a grande variabilidade de comprimentos em função das camadas de areia. A metodologia, denominada Protocolo Benaton, foi aplicada em uma obra localizada em Cubatão, SP, onde foram estudados o comportamento de cravação de 1.331 estacas com comprimentos variando de 8 a 42 metros, com média observada de 25 metros cravados por estaca. Foram realizados 75 ECDs, 3 monitoramentos com o equipamento PDA (Pile Driving Analyzer) e 2 PCEs, resultando em um índice de quebras de 2,6% em relação ao total de estacas executadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estacas Pré-Moldadas de concreto; Ensaio de Carregamento Dinâmico; Protocolo Benaton; Quebras de Estacas; Solos Moles.

**ABSTRACT:** Brazilian standard NBR 6122:2022 (Foundation Design and Execution) mandates static load tests (SLTs), allowing for substitution by dynamic load tests (DLTs) at a ratio of 5 DLTs to 1 SLT under certain conditions. Specifically, for precast concrete piles, load testing is obligatory when the allowable stress exceeds 7.0 MPa or the foundation design incorporates more than 100 piles. Given this requirement for load tests, a specific pile driving control methodology was developed to substantially mitigate pile breakage rates in projects exhibiting complex characteristics, such as significant length variability due to sand strata. This methodology, termed the Benaton Protocol, was implemented in a construction project in Cubatão, SP, where the driving performance of 1.331 piles, ranging in length from 8 to 42 meters with an observed average driven length of 25 meters per pile, was investigated. A total of 75 DLTs and 3 monitoring events using Pile Driving Analyzer (PDA) equipment were conducted. In addition, 2 SLT were performed, resulting in a pile breakage rate of 2.6% relative to the total number of piles installed.

**KEYWORDS:** Precast Concrete Piles; Dynamic Load Test (DLT); Benaton Protocol; Pile Breakage; Soft Soils.



## 1 INTRODUÇÃO

A metodologia de campo adotada, em consonância com as recomendações de Cabette e Murakami (2023), possibilitou um controle rigoroso da cravação das estacas e a definição precisa dos critérios de cravação. Isso garantiu o atendimento das cargas de projeto e a segurança da fundação. As etapas do procedimento de campo serão detalhadas nas seções subsequentes, juntamente com os resultados obtidos nos ensaios de carregamento dinâmico (ECD), que comprovaram a eficácia da solução otimizada proposta. A análise dos resultados demonstrará a viabilidade técnica e econômica da solução implementada.

## 2 OBJETIVOS

Este artigo tem como objetivo mostrar uma nova metodologia de controle de estaqueamento em estacas pré-moldadas de concreto, intitulada de Protocolo Benaton, para garantir que as estacas possuam um padrão de qualidade elevado, pré estabelecido no início da obra até a sua finalização com redução do índice de quebras de estacas e que satisfaça as premissas do projeto de fundações;

## 3 METODOLOGIA

O Protocolo Benaton consiste nas seguintes etapas:

- 1. Monitoramento da Cravabilidade:** No início da obra, foi realizado o monitoramento da cravabilidade com o equipamento PDA para definir os critérios de cravação, visando atingir a profundidade de projeto e minimizar as quebras de estacas para atendimento das premissas de projeto.
- 2. Definição da Altura de Queda:** Durante a realização da cravabilidade, foi verificada a altura de queda ideal para execução das estacas, de forma que as tensões de tração e compressão não fossem ultrapassadas. Essa verificação foi realizada em três situações, denominadas de estacas curtas, médias e longas, devido à variabilidade de comprimentos cravados no empreendimento. Cada região de execução adotou um determinado processo de execução, o que permitiu calibrar os critérios de cravação.
- 3. Análise dos Boletins de Cravação:** Após a definição do procedimento de trabalho, foram analisados os boletins de cravação de todas as estacas para garantir que as estacas executadas sem o monitoramento com o PDA tivessem comportamentos semelhantes. Em casos que fugiam à expectativa, as estacas eram separadas para realizar o ECD. Além do ensaio dinâmico, foram realizadas duas provas de carga estáticas (PCE).
- 4. Ensaios Dinâmicos e Provas de Carga Estáticas:** Os resultados dos Ensaios Dinâmicos e Provas de Carga Estáticas atenderam às premissas da NBR6122, com fatores de segurança superiores a 2,0.

## 4 CASO DE OBRA

### 4.1 Descrição da obra

O caso de obra se refere à construção de um conjunto residencial, localizado na cidade de Cubatão, SP. O projeto de fundações foi desenvolvido através de 1.300 estacas pré-moldadas de concreto, com seções quadradas de lados 265mm e 295mm para carga de trabalho de variando de 30tf até 80 tf

Para realização do ensaio de monitoramento da estaca “cravabilidade”, devem ser conhecidos os parâmetros limítrofes do produto “Estaca de concreto protendida” para que o procedimento possa ser bem sucedido. Nesse caso seriam as tensões de trabalho recomendáveis, segundo a NBR6122, a saber, conforme (Cabette e Murakami, 2023):

Para uma estaca de concreto protendido com fck de 40MPa, tem-se:



Tensão de Compressão máxima de 31MPa podendo chegar até 34MPa quando monitorada  
Tensão de Tração máxima de 3,9MPa podendo chegar até 4,3MPa quando monitorada

A nomenclatura dos parâmetros indicados na cravabilidade das Figuras 1 e 2 estão listadas abaixo:

Legenda – Gráficos: Método Case – Reprocessamento dos Sinais: Programa PDI PLOT

LP: Comprimento abaixo do Solo

RMX: Carga mobilizada calculada pelo método CASE

DMX: Deslocamento máximo durante a aplicação do golpe

CSX: Tensão média de compressão na região dos sensores (média das leituras dos sensores)

CSI: Tensão máxima de compressão na região dos sensores (leitura máxima dos sensores)

TSX: Máxima tensão de tração ao longo do fuste da estaca

EMX: Energia máxima transferida pelo golpe na seção dos sensores

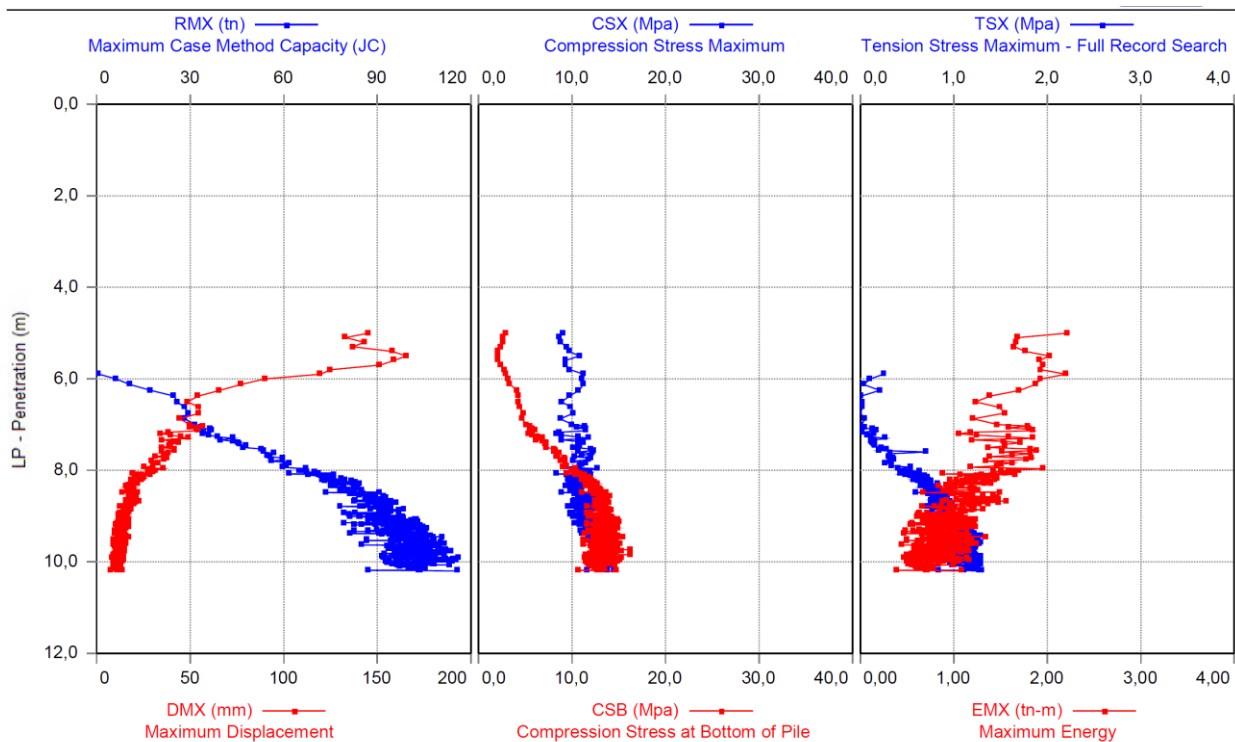


Figura 1. Cravabilidade – Monitoramento com PDA (Seção 265x265mm)



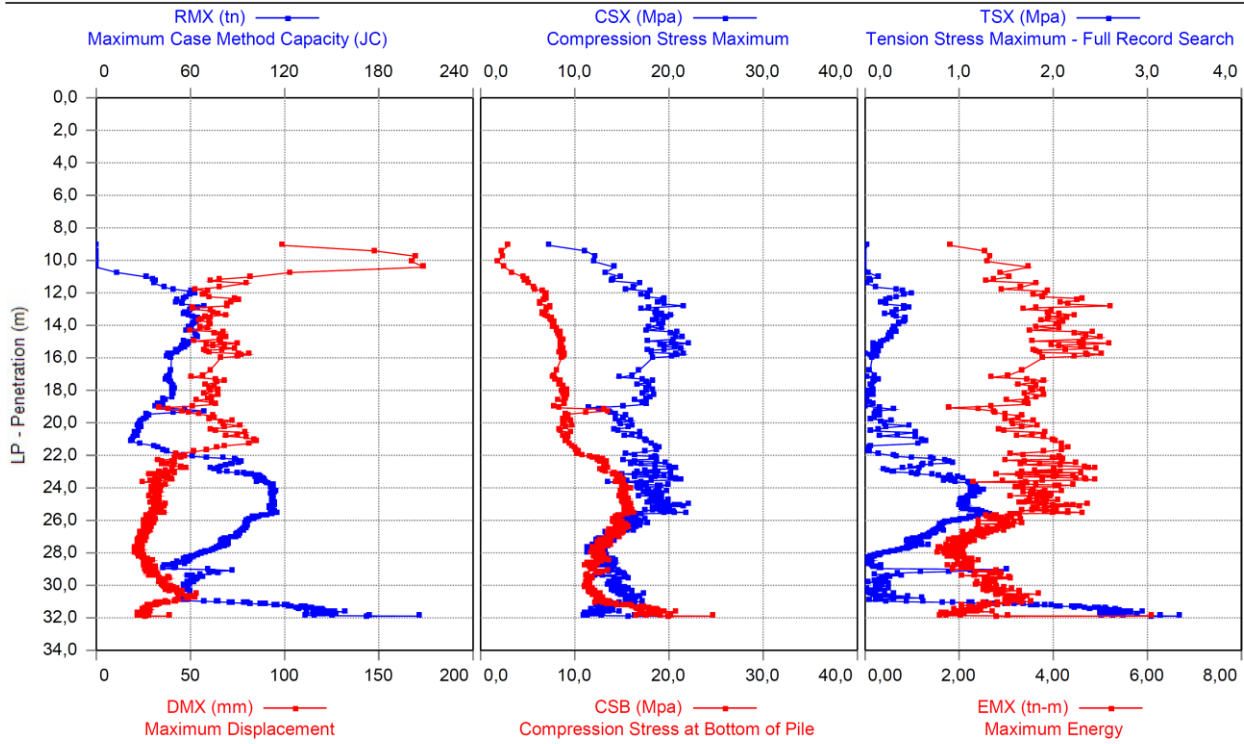


Figura 2. Cravabilidade – Monitoramento com PDA (Seção 295x295mm)

Após a realização das cravabilidades descritas nas Figura 1 e 2, observa-se que as tensões de compressão e tração ficaram abaixo do limite pré-estabelecido pela NBR6122, e dessa forma foram realizadas as definições dos critérios de cravação das estacas para cada tipo de estaca, sendo altura de queda do martelo queda livre com massa de 6.000kg de 0,3 a 0,4 metros para a seção 265x265mm e 0,4 a 0,5m para a seção 295x295mm com 3 negas p/ 10 golpes inferiores a 15mm.

De acordo com o gráfico da Figura 3, é possível verificar a variação estatística dos comprimentos cravados executados na obra.

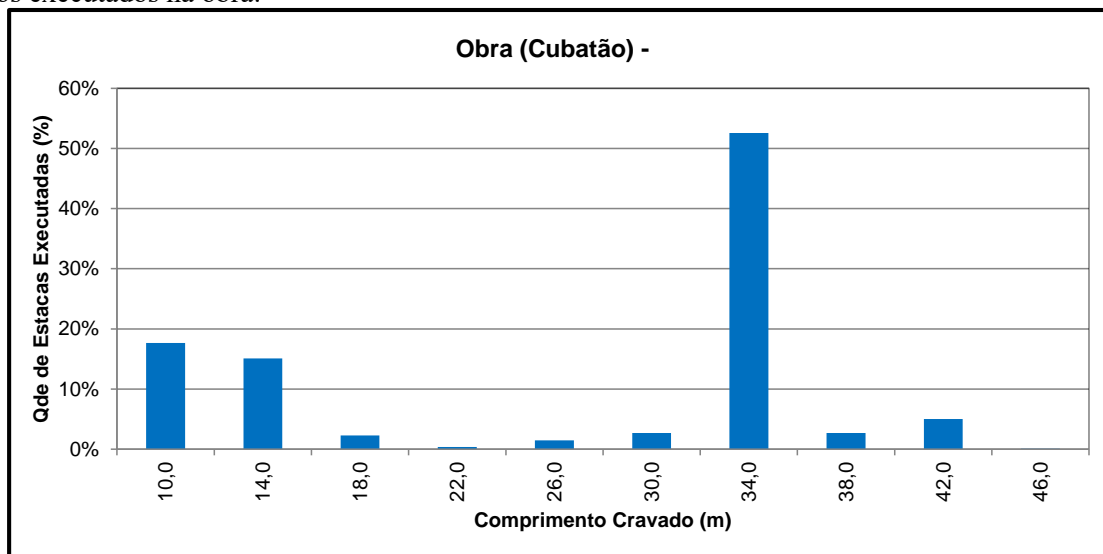


Figura 3. Variação estatística dos comprimentos cravados na obra



No gráfico da Figura 4, pode-se observar a variação estatística das negas p/ 10 golpes obtidas na obra.

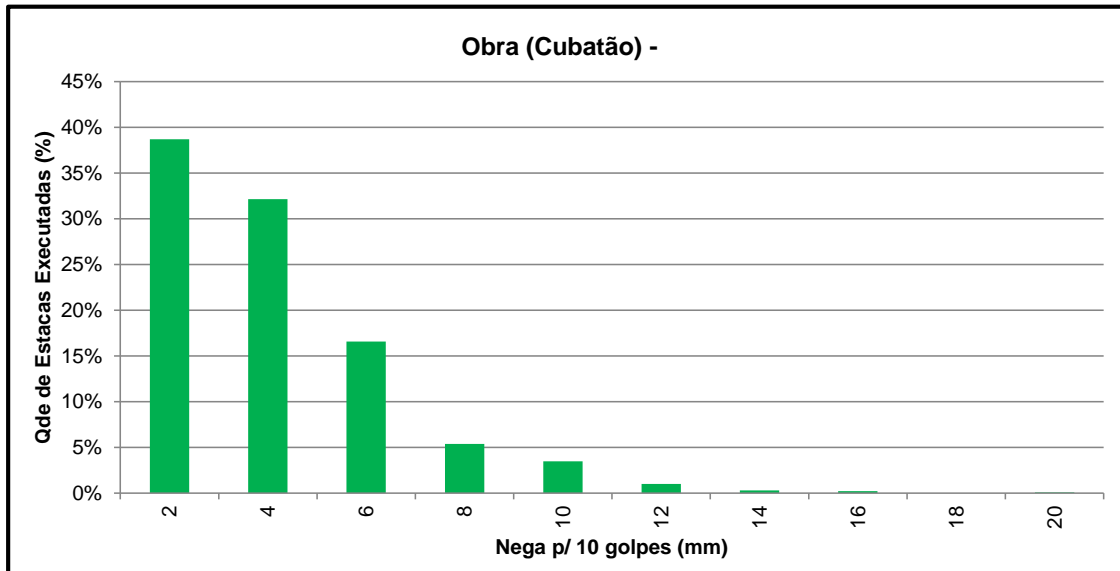


Figura 4. Variação estatística das negas p/ 10 golpes obtidas na obra.

Com auxílio do gráfico da Figura 5, é possível verificar a variação estatística dos repiques obtidos na obra.

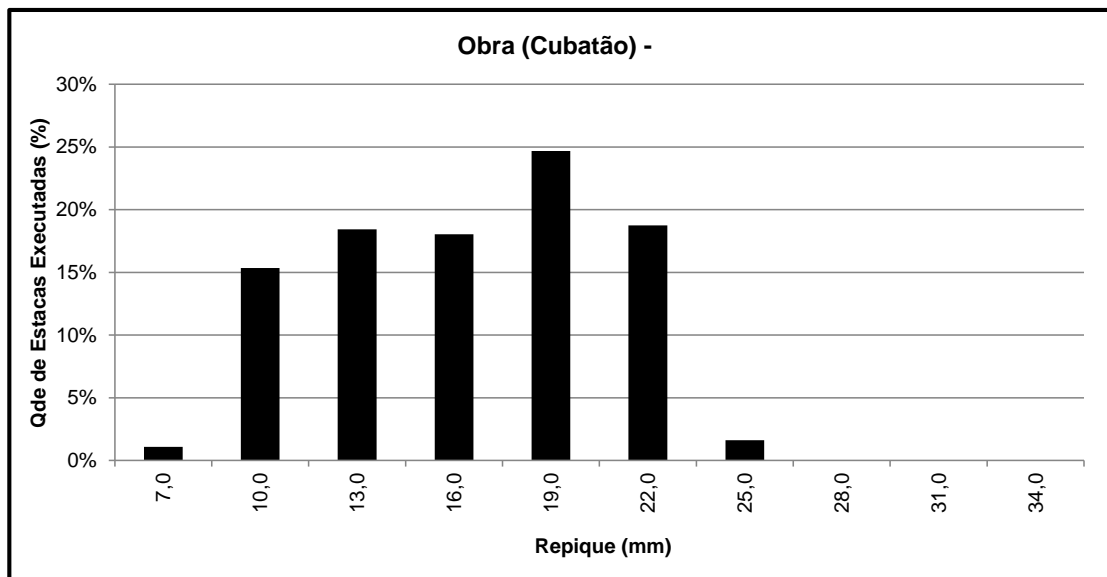


Figura 5. Variação estatística dos repiques obtidos na obra.

No total da obra foram cravadas cerca de 1.331 estacas, totalizando aproximadamente 35.300 metros e foram observadas apenas 34 quebras de estacas o que representa cerca de 2,6%.

De acordo com o gráfico da Figura 6 é possível verificar os valores da resistência mobilizada no ensaio de carregamento dinâmico (ECD) dividido pelo fator de segurança global de 2,0 da NBR6122 em comparação com as cargas de trabalho das estacas;



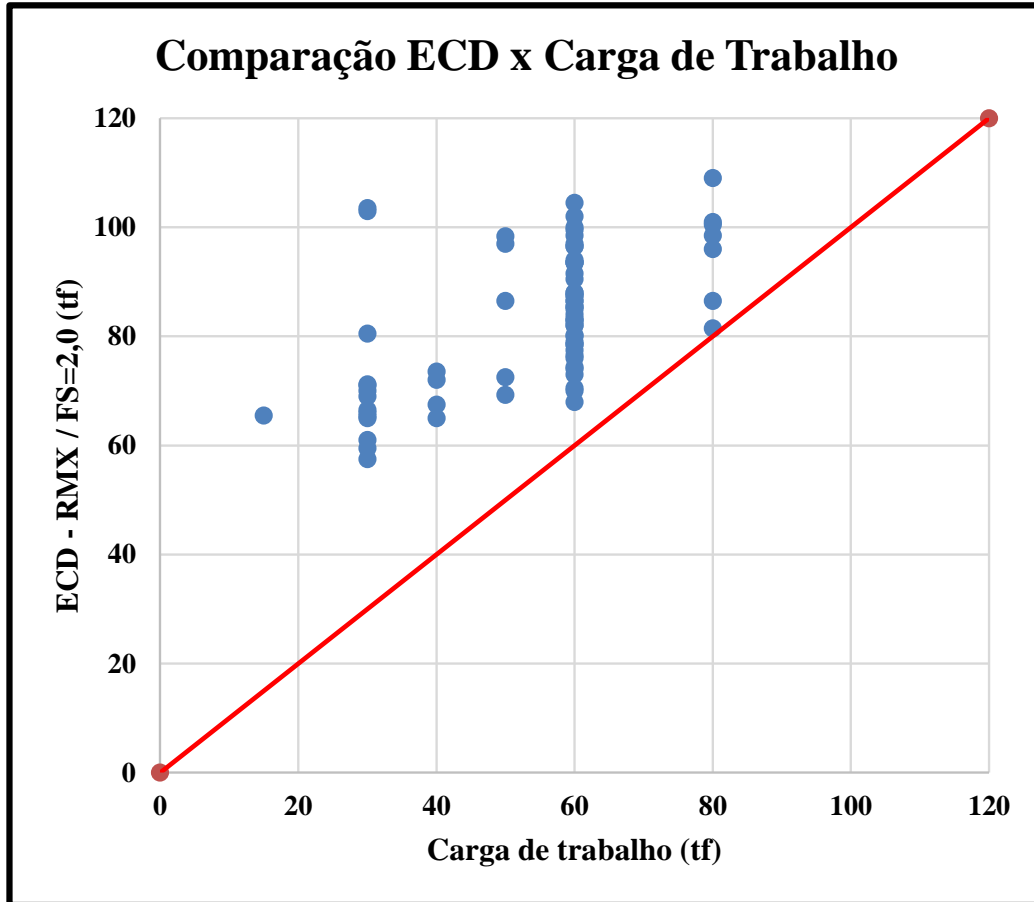


Figura 6. Gráfico ECD – RMX / FS=2,0 vs. Carga de Trabalho

Observa-se que todas as estacas ensaiadas tiveram fatores de segurança global superior a 2,0 de forma a atender as premissas da NBR6122.

#### 4.2 Corte e preparo das cabeças das estacas

Pode-se considerar um item de fundamental importância, para o bom desempenho das estacas, o corte e preparo das cabeças das mesmas, embora esses serviços não façam parte do serviço de cravação da estaca e sejam realizados, na grande maioria dos casos, quando o equipamento já foi desmobilizado da obra.

De acordo com a NBR6122, na demolição devem ser utilizados ponteiros trabalhando com pequena inclinação, para cima (Figura 7), o trecho da estaca com o bloco de coroamento devem ser observadas a cota de arrasamento e o comprimento das esperas (arranques) definidos em projeto.

Na demolição podem ser utilizados ponteiros ou martelotes leves (potência < 1000W) para seções de até 900cm<sup>2</sup>. O uso de martelotes maiores fica limitado às estacas cuja área seja superior a 900cm<sup>2</sup>. O acerto final do topo das estacas demolidas deve ser sempre efetuado com o uso de ponteiros ou ferramenta de corte apropriada.



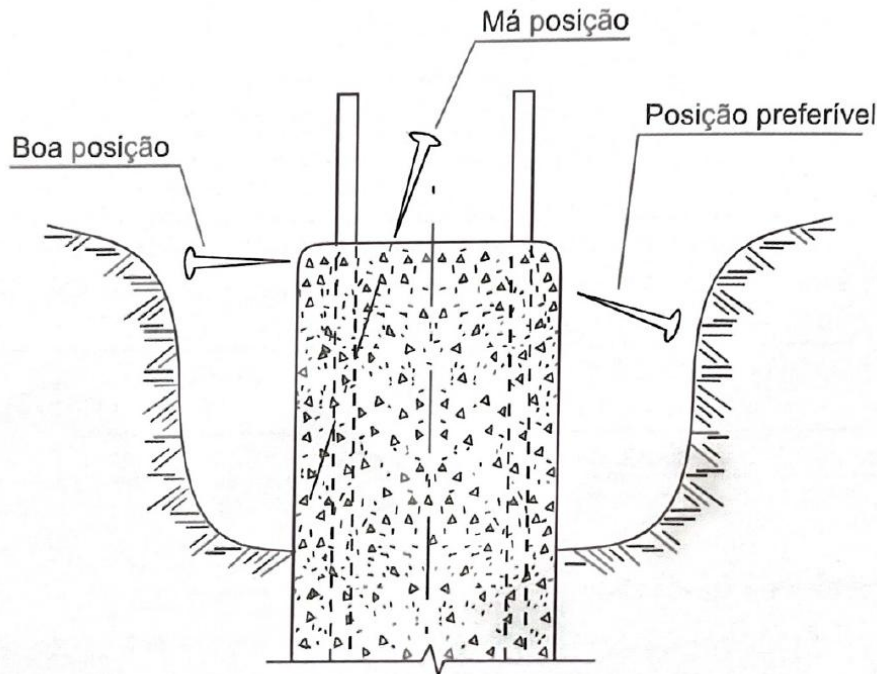


Figura 7 – Esquema de corte e preparo de cabeça de estaca. (ABEF, 2012)

Segundo a NBR6122, o preparo das cabeças das estacas e ligação com o bloco de coroamento, para cada estaca devem ser atendidos os seguintes critérios:

- deve-se garantir a integridade da cabeça da estaca, conforme especificado nos Anexos para cada tipo de estaca;
- a recomposição das estacas até a cota de arrasamento deve garantir a sua continuidade estrutural;
- a seção resultante do preparo da cabeça da estaca deve ser plana e perpendicular ao seu eixo;
- a ligação estaca-bloco de coroamento deve ser especificada em projeto, de modo a assegurar a transferência dos esforços;
- para execução do bloco de coroamento, é obrigatório o uso de lastro de concreto magro com espessura não inferior a 5cm. A cabeça da estaca deve ficar pelo menos 5cm acima do lastro.

O comprimento de ancoragem da estaca da armadura, assim como o embutimento da estaca dentro do bloco de coroamento, deve ser definido pelo projetista estrutural de modo a garantir a transmissão dos esforços solicitantes da estrutura para as fundações;

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia proposta de acordo com o Protocolo Benaton, mostrou-se eficaz no controle de estaqueamento de estacas pré-moldadas de concreto, permitindo a redução do índice de quebras e o atendimento às premissas de projeto, mesmo em obras com características complexas.



## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Benaton Specialist pela autorização dos dados necessários para a elaboração deste trabalho, e continuo estímulo a desenvolvimento de pesquisas científicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEF - Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia. Manual de Execução de Fundações e Geotecnia - Práticas Recomendadas. São Paulo: PINI, 2012.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6122 (2022) Projeto e execução de fundações, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 13208 (2007) Estacas Ensaio de carregamento dinâmico, Rio de Janeiro.
- Cabette, J. F. (2014). Análise dos métodos semi-empíricos utilizados para a estimativa da capacidade de carga de estacas pré-fabricadas com base em resultados de ensaios de carregamento dinâmico. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Cabette, J. F., Murakami, D. K. (2023) Estacas Pré Moldadas de Concreto Cravadas em São Vicente: Procedimentos Executivos e Desafios Superados. Seminário de Fundações Especiais SEFE 10, São Paulo.
- Murakami, D. K. (2015). Novo procedimento para a realização de análise capwap no ensaio de carregamento dinâmico em estacas pré-moldadas. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo
- Murakami, D. K., Cabette, J. F. (2014) Dificuldade de cravação de estacas em solos com quakes elevados. Seminário apresentado em "Workshop - Ensaios de Carregamento Dinâmico e Monitoração de Cravação de Estacas (Pile Driving Analyzer e CAPWAP)", Carmix do Brasil, São Paulo, pp 1-8
- Murakami, D. K., Cabette, J. F. (2023) The Benefits of Pile Driving Monitoring for Precast Concrete Piles. Seminário de Fundações Especiais SEFE 10, São Paulo.

