

OBRA DE REFORÇO DAS FUNDAÇÕES DO PÍER DO ESPAÇO CULTURAL DA MARINHA



Docas da Alfândega e Mercado do Peixe, em segundo plano; ao fundo, à direita, morro do Castelo e, à esquerda, ilha de Villegaignon. Fonte: Brasiliana Fotográfica, autor Marc Ferrez (1843-1923)

A divulgação do patrimônio histórico e cultural da Marinha contribui para a conservação de sua memória e para o desenvolvimento da consciência marítima brasileira. Situado na Orla Conde, no Centro da cidade do Rio de Janeiro, o Espaço Cultural da Marinha (ECM) abriga parte importante do acervo da Marinha do Brasil (MB) e da história da navegação, e está inserido em um circuito cultural por sua localização e importância histórica na missão de divulgação das práticas marinheiras.

O Museu do ECM esteve fechado, em virtude das condições estruturais do píer sobre o qual

foi erguido, que é uma estrutura construída na segunda metade do século XIX, quando era formalmente conhecido como “Cais da Doca d’Alfândega”. Para solucionar os problemas de recalque apresentados, inicialmente em metade do píer, foi concluída, no ano de 2007, uma obra de reforço das fundações afetadas e, quando os mesmos problemas surgiram no restante da estrutura, uma nova intervenção foi necessária, tendo a respectiva obra sido fiscalizada tecnicamente pela Diretoria de Obras Civas da Marinha (DOCM), com conclusão em janeiro de 2021.





Vista aérea do píer do Espaço Cultural da Marinha.

ESTRUTURA DO PÍER DO ECM

O píer possui, aproximadamente, 300 m de comprimento por 17,5 m de largura. Sua estrutura é constituída de duas linhas de 24 pilares em blocos de granito, sobrepostos em estrados de madeira, sustentados por estacas de madeira cravadas no solo, e a superestrutura é amarrada com arcos transversais e longitudinais, sobre os quais foram contruídas lajes que formam o piso.

Problemas estruturais durante a construção causaram um colapso parcial da estrutura, fazendo com que o píer tivesse dois sistemas estruturais distintos: o primeiro, desde o Pilar 1 até o Pilar 8 (aproximadamente 90 m), com os arcos abertos de forma que o mar fluísse

sob eles; e o segundo, entre o Pilar 8 e o Pilar 24 (da sua extremidade com o continente até uma distância de 210 m), tendo sido construídos paramentos transversais e longitudinais ao píer, formando câmaras fechadas que foram aterradas.

Ao longo do tempo, e em função dos distintos sistemas estruturais adotados, a interface entre os dois sistemas sofreu recalques diferenciais, levando a deformações excessivas na estrutura do píer e causando danos na edificação sobre ele. Quando o segundo trecho começou a apresentar problemas de recalque, foi elaborado o projeto básico baseado na solução técnica adotada anteriormente.

Modelagem tridimensional do píer em estudo, vista do mar para o continente.



INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA PRELIMINAR

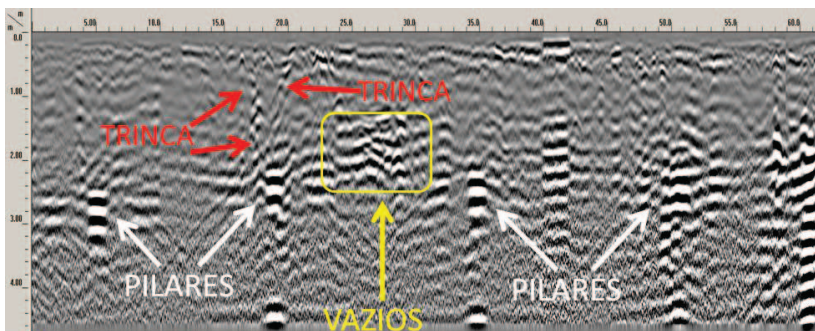
Em função das peculiaridades da estrutura do píer, utilizou-se levantamento Geofísico, com Georadar (GPR) e Pipe Locator, mapeando as estruturas e interferências subterrâneas presentes no cais, como a existência de tubulações, galerias de água, esgoto, elétrica (média e baixa tensão), vazios, nível d'água e estruturas existentes.

O método georadar baseia-se na medição das reflexões de um pulso eletromagnético direcionado para o subsolo, e o método pipe locator, empregado como método complementar ao georadar, utiliza a captação de campos eletromagnéticos para a detecção de interferências presentes no subsolo.

Essa investigação permitiu a identificação de trincas e vazios na estrutura e localização de dutos elétricos. Após os resultados apresentados no relatório Geofísico, foram realizados novos furos de sondagem, para determinar a altura e declividade das estruturas transversais do cais, confrontando com o perfil transversal típico do píer encontrado em relatos históricos.



Execução de levantamento geofísico com Georadar (GPR). Fonte: ScanGEO



Perfil de resultados típico com GPR para o píer. Fonte: ScanGEO

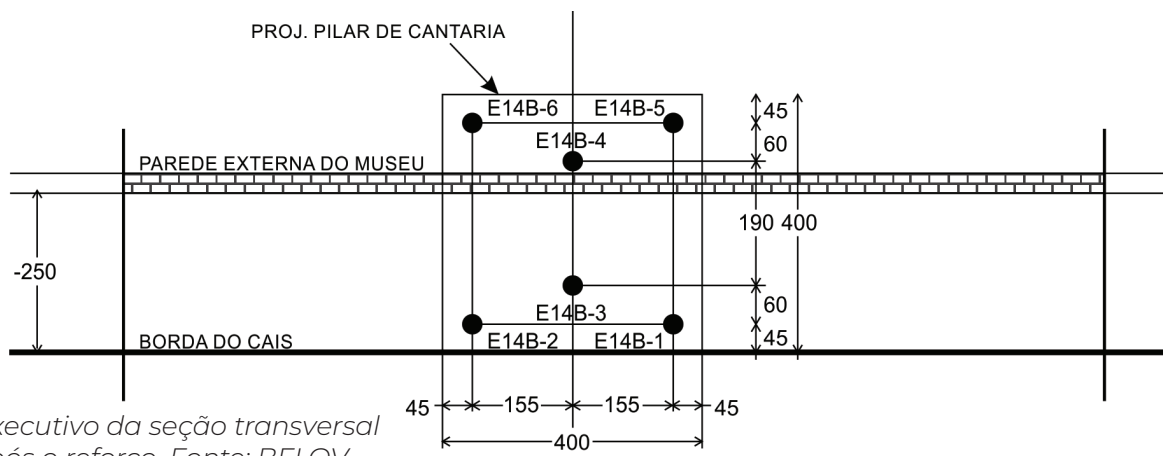
SOLUÇÃO TÉCNICA DO PROJETO BÁSICO

Dentre as diversas metodologias de fundações profundas, optou-se pela execução de estacas raiz, no trecho entre a laje de piso do píer até o limite inferior das pedras de cantaria, e estaca metálica, cravada no trecho abaixo desta seção até atingir a nega de projeto. Além disso, foi previsto utilizar seis estacas por pilar da estrutura, transferindo toda a carga vertical para a região com adequada capacidade de suporte.

Para o trecho em solo, abaixo do limite inferior do pilar de cantaria, foram utilizadas

estacas de aço tubulares, tipo VMB-350 COR, de dimensões idênticas ao revestimento metálico da estaca-raiz que perfurou o granito, garantindo a compatibilidade dimensional no lançamento do material de reforço, além de facilitar a garantia da verticalidade das estacas e a aderência do novo material à estrutura antiga.

A solução proposta pelo Projeto Básico foi a mesma solução executada na etapa anterior do reforço, sendo três estacas calculadas para resistir apenas aos esforços do novo pavimento de concreto e três estacas para reforço da estrutura existente.



Detalhe executivo da seção transversal do pilar após o reforço. Fonte: BELOV

**A****B**

PROCEDIMENTO EXECUTIVO DAS ESTACAS

A metodologia e a logística para a perfuração e cravação das estacas variaram de acordo com a localização de cada pilar e de cada estaca, influenciando no tipo de equipamento de perfuração em solo, madeira ou pedra, e também no posicionamento do mesmo, devido a limitações de mobilidade pela presença da edificação.

O procedimento padrão para a execução de cada estaca foi realizar a perfuração da camada de pedra e/ou solo do pilar, variando de 8,00 m a 11,00 m de comprimento; inserir o tubo interno, realizando a conexão de elementos metálicos por solda contínua em toda a seção; e iniciar a cravação da estaca com martelo de 2 toneladas (peso mínimo), com capacete adequado e cepo de madeira protegendo o topo da estaca.

O comprimento projetado das estacas foi baseado nas sondagens, podendo-se interromper a sua cravação apenas ao ser atingido o critério de parada, ou seja, alcançando a rocha de natureza granítica identificada nas sondagens ou atingindo a nega de cravação de 3 mm. Ao ser atingida a nega especificada, realizou-se a limpeza do interior da estaca metálica e injetou-se argamassa de preenchimento.

As recomendações da norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 6122/2020 – Projeto e execução de fundações, referentes à execução e controle de estacas raiz e metálicas, foram obedecidas. Os dados referentes à execução, como controle de cravação no trecho abaixo do atual píer, negas obtidas, comprimento cravado, cota de arrasamento e excentricidade, dentre outros, foram anotados em planilha de controle, individual para cada estaca, e enviados para o projetista imediatamente após a sua execução.

Execução de perfurações no maciço do píer (cantaria) na parte interna do prédio (A) e na área externa (B).

DIFICULDADES NA EXECUÇÃO DAS ESTACAS

Ao longo da realização efetiva dos serviços, foram encontradas algumas dificuldades, que variaram, predominantemente, devido à proximidade da edificação do museu (interferência com as paredes e cobertura da edificação) e da posição da estaca em relação ao mar (estacas externas ou internas do píer). Tais dificuldades eram, usualmente, observadas no início da execução de cada nova frente de obra.

As estacas externas são aquelas que compõem o conjunto de três estacas situadas mais próximas à face do píer em contato com o mar, em ambos os seus bordos. As estacas internas, por sua vez, formam o conjunto de três estacas restantes, espaçadas, aproximadamente, 2 m das estacas externas.

Plataformas Suspensas

Em função da proximidade dos furos com a face externa dos pilares do píer, não era possível o posicionamento adequado do equipamento de perfuração das estacas externas, tendo sido utilizadas plataformas metálicas suspensas, fixadas na edificação existente, para o posicionamento adequado das sondas durante a perfuração dos dois furos mais próximos à interface do pilar com o mar.

Balsa

A altura da cobertura da edificação do museu foi um fator limitante para a compatibilização do equipamento de cravação das estacas, pois não era possível a retirada das tesouras de cobertura da edificação, que garantiam a estabilidade das paredes de alvenaria. Um bate-estacas de menor porte foi disponibilizado no canteiro, porém, não possuía mobilidade adequada para a cravação, nem energia de cravação suficiente para a obtenção da nega das estacas.



Realização de perfuração com equipamento apoiado em plataforma suspensa.



Balsa apoiando na realização de cravações.



Balsa mobilizada no canteiro.

Assim, foi mobilizada uma balsa para apoiar o equipamento de cravação das estacas internas, sob a projeção da cobertura da edificação existente, com um martelo de 2 toneladas. Após a conclusão deste serviço, a balsa também foi utilizada para a cravação das estacas próximas à interface do píer com a terra, contribuindo para o aumento de produtividade.

Variabilidade do substrato

Durante a execução das estacas externas, a sonda de perfuração identificou, essencialmente, três substratos: rocha granítica, com veios de concreto; estrado de madeira; e solo compactado (conforme previsão do Projeto Executivo). No entanto, na execução das estacas internas, após o contrapiso da edificação do museu, havia uma camada de 2 a 4 m de solo desagregado, existente imediatamente acima da projeção do pilar de cantaria. A descoberta dessa nova camada de solo alterou o processo executivo previsto, sendo necessária a mobilização de escavadeiras para a abertura de valas e, nos trechos mais profundos, de encamisamento das perfurações até o topo da cantaria em granito.

Falsa nega e processo de limpeza

A cravação de estacas pode ser considerada concluída quando, por critérios geotécnicos bem definidos, a capacidade de carga do elemento estrutural é maior que a solicitação exigida de projeto. Tais critérios são definidos em Projeto Executivo e consistem em atingir determinada profundidade mínima ou índices de cravação que comprovem a capacidade de carga, como a nega da estaca.

Na etapa de cravações, a empresa contratada para a execução da obra encontrou solo mais resistente do que o previsto inicialmente, obtendo nega da estaca em profundidades médias de 35 m, consideravelmente inferior ao comprimento estimado em projeto, de 60 m. Devido a essa discrepância, houve a execução de sondagens de reconhecimento nos furos e mobilização de um equipamento de cravação com martelo de 3,3 toneladas (maior do que o previsto e utilizado até aquele momento, de 2 toneladas).

A conclusão obtida dos estudos foi que, devido ao formato circular vazado da estaca, parte do solo cravado acabava mobilizado por atrito dentro da estaca, aumentando



Realização de limpeza por circulação de água na extremidade de cravação da estaca, permitindo a ultrapassagem da cota de falsa nega.

virtualmente a resistência de ponta da cravação, sem aumentar a capacidade de carga real da estaca, num efeito conhecido como “embuchamento”. Assim, durante a cravação, ao ser atingido o resultado inicial impenetrável, com nega de 3 mm, era realizada a limpeza por circulação de água, ou “desembuchamento”, permitindo a continuidade da cravação, ultrapassando a falsa nega, até o atingimento de uma camada mais profunda e com a capacidade necessária.

Concretagem

Todas as estacas foram injetadas internamente até a cota de topo do píer, com argamassa de $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ ($2,5 \text{ kN/cm}^2$), com controle tecnológico normativo e pressão mínima de injeção de $2,0 \text{ kg/cm}^2$.

Para o trecho da estaca raiz nas estacas externas, além da argamassa no interior da estaca, também houve a injeção de calda de cimento no trecho entre a cantaria dos pilares e a face externa da estaca, a fim de garantir a aderência entre as estruturas. Porém, devido à interface entre a cantaria e a madeira e a existência de descontinuidades pontuais na matriz



Execução de concretagem com argamassa na parte interna de estaca.

da cantaria, além da necessidade de lançamento pressurizado, foram registradas grandes perdas de material durante a execução, interrompida apenas com o preenchimento e cura da calda em todos os vazios existentes.

A definição do traço e das adições necessárias à calda de cimento foi realizada durante a fase de execução da obra, tendo como base a geometria obtida localmente, após a conclusão das perfurações e cravações, a fluidez necessária para o lançamento e a resistência à tração da matriz de cimento que fornecesse aderência adequada entre o aço da estaca e a cantaria. O comprimento necessário para a transferência eficaz dos esforços foi definido no Projeto Executivo, de forma semelhante ao cálculo de aderência de uma barra de aço em um pilar de concreto armado convencional.

Para as estacas internas, devido ao diferente substrato observado, não foi realizada a injeção externa de calda de cimento.

CONTROLE GEOTÉCNICO E TECNOLÓGICO DA EXECUÇÃO

Devido à complexidade técnica dos serviços executados, a aplicação de controle tecnológico, executado conforme diversas normas técnicas reguladoras, foi necessária para a

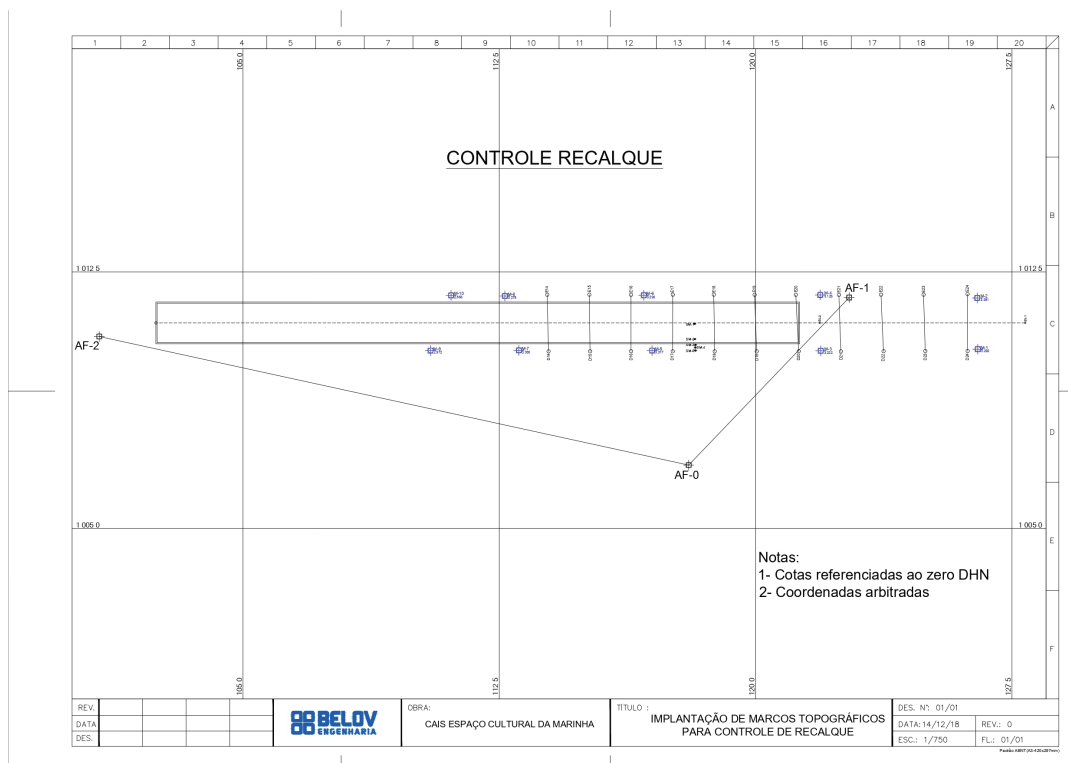
garantia da boa execução da obra e o bom funcionamento em serviço dos elementos estruturais construídos.

Controle de recalques da estrutura existente

A motivação principal para a realização das obras de reforço no píer em lide foi a promoção da interrupção do processo de recalques, que vinha sendo, claramente, observada através de danos na edificação assentada sobre ele. Soma-se a isto o histórico de colapso existente na estrutura, quando de sua construção, que reflete-se no aspecto visual do píer e aumenta o grau de preocupação técnica durante a sua utilização.

Em 2013, foi realizado um estudo detalhado das condições do píer, após a conclusão da primeira etapa de reforço, que atestou grande parcela do recalque ocorrendo por fuga de partículas do aterro sob a laje, devido aos ciclos de marés. Apesar dessa conclusão e devido à existência constante de vibrações e de cargas elevadas sobre a estrutura durante a obra de reforço, foi considerada fundamental a realização de acompanhamento topográfico das cotas de dez pontos representativos do píer.

O controle de recalques buscou identificar



Locação dos pontos de controle do píer e pontos georreferenciados para medição. Fonte: BELOV

movimentações anormais da estrutura portuária durante a obra, que pudessem sinalizar risco aos usuários. Através desse controle, realizado semanalmente, foram observadas variações de cotas totais de, no máximo, 10 mm ao longo de toda a execução da obra, mesmo em períodos críticos de execução de perfurações e de cravações.

Embora a estrutura esteja reforçada e considerando a variabilidade constante das marés na Baía de Guanabara, é recomendada a continuidade da realização de controle de recalques da estrutura, de maneira a atestar a estabilidade proporcionada pelas obras de reforço e conferir a estanqueidade dada aos aterros do píer, pelo reforço das cortinas realizado concomitantemente à execução das estacas.

Controle de execução de soldas

As estacas metálicas, depois de cravadas nos furos, chegaram a comprimentos que variaram de 28 a 42 m. Uma vez que os tubos metálicos são comercialmente fornecidos em comprimentos de 8 a 12 m, foi necessária a realização de soldas ao longo da extensão da estaca. Porém, a seção da junta soldada representa um trecho de fragilidade na estaca, o qual foi altamente solicitado por esforços compressivos e de alta energia durante o processo de cravação.

Assim, foram realizados controles de soldagem em todos os perfis cravados. Todas as soldas executadas na obra foram realizadas na presença de um inspetor de soldagem, devidamente habilitado. Cada solda realizada possui um relatório de inspeção visual, que atesta as condições da junta, antes (pre welding) e depois da soldagem (post welding), totalizando 767 juntas de soldagem. Destas, 76 (10%) foram inspecionadas utilizando equipamentos de ultrassom, de maneira a atestar a integridade das soldas executadas através de pequenos carregamentos dinâmicos (impulsos mecânicos).



Detalhe do aspecto final de uma junta de solda executada nas estacas metálicas.

Cravação e teste de carga das estacas

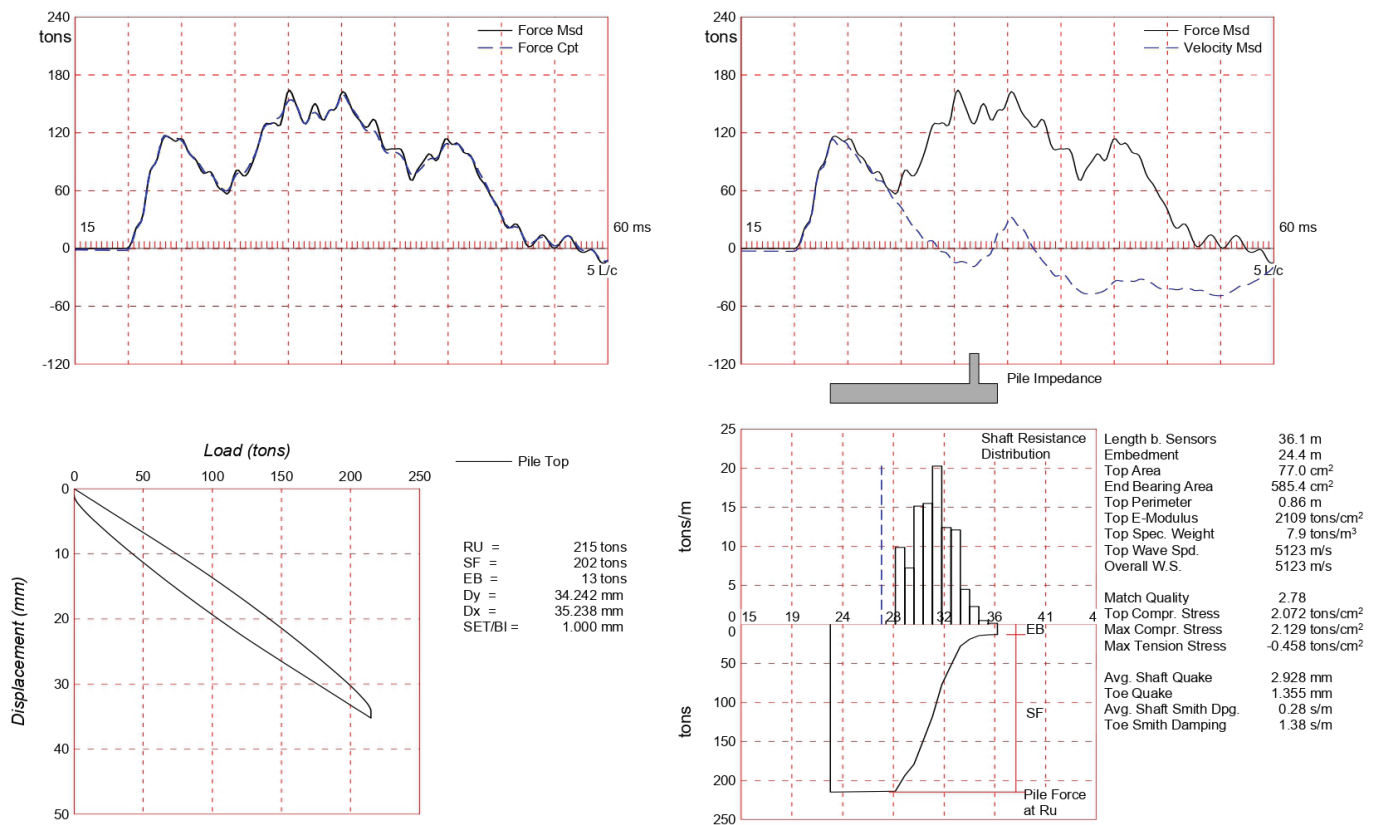
A cravação das estacas e o processo de “desembuchamento”, citado anteriormente, foram controlados a partir de documentos denominados “Boletins de Cravação”, individuais para cada estaca e indicando possíveis fragilidades, como inclinação com a vertical e excentricidade com relação ao Projeto Executivo, além da quantidade de juntas de solda.

A resistência das estacas foi atestada através de provas de carga, em quantidade definida conforme critérios normativos e variabilidade de solo existente no local.

Das 144 estacas cravadas, foram realizados onze ensaios dinâmicos do tipo “CAPWAP”, que forneciam a capacidade de carga (por atrito lateral e por resistência de ponta), com base nos sinais obtidos após a aplicação de golpes mecânicos na estaca, através de sensores localizados em seu comprimento. Adicionalmente, foi realizado um ensaio de carga estática, de carregamento tipo “lento”, obtendo uma curva do tipo “carga (tf) x deslocamento (mm)” que, através de extrapolações teóricas, fornece a capacidade de carga total do elemento cravado.

Belov Engenharia - Museu da Marinha ; Pile: E18B-3; Tubular metálica - Rec 5 dias; Blow: 5 (Test: 28-May-2020 12:23:)
PDI Engenharia

02-Jun-2020
CAPWAP(R) 2014-3



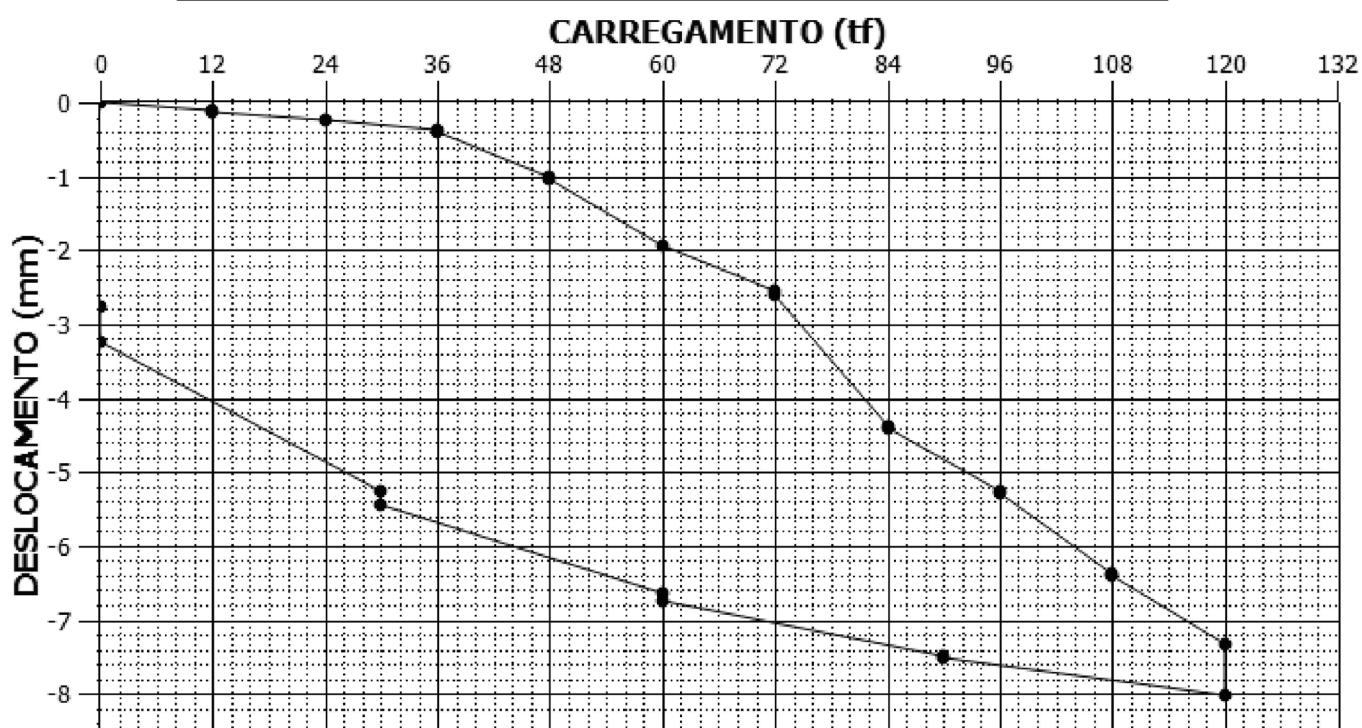
CAPWAP(R) 2014-3 Licensed to PDI Engenharia

Resultado do processamento dos sinais do ensaio CAPWAP em uma das estacas metálicas cravadas.
Fonte: PDI Engenharia



Atuador hidráulico e estrutura de reação para realização da prova de carga estática.

CURVA CARREGAMENTO x DESLOCAMENTO



Curva carga-deslocamento resultante da prova de carga estática.



Estudo Preliminar de Arquitetura vencedor para o novo Museu Marítimo do Brasil. Fonte: messina | rivas e Ben-Avid Studio

Vista aérea

CONCLUSÃO

Além do reforço dos pilares com estacas cravadas, a obra de reforço do píer do ECM abrangeu a reforma dos arcos submersos que formam o paramento do píer (recuperação da estanqueidade com uso de cortinas de concreto) e a construção de piso autoportante de concreto no trecho reforçado (acréscimo da capacidade de carga do píer sem acréscimo de esforços na estrutura antiga), assuntos não abordados neste artigo. Com as obras realizadas, o píer pôde ser colocado à disposição do Patrimônio Histórico da MB para, com segurança aos usuários, manter as exposições no ECM.

Ao realizar a manutenção de estrutura tão particular e histórica para a cidade do Rio de Janeiro, a MB contribui para a preservação do

patrimônio arquitetônico e cultural brasileiro e possibilita o planejamento de novos marcos arquitetônicos para o local, encontrando-se em andamento os estudos para a construção do futuro Museu Marítimo do Brasil (MuMa) no píer do ECM.

Após a promoção de um concurso, realizado por parceria da MB com o Instituto de Arquitetos do Brasil – RJ, para o recebimento de propostas arquitetônicas para o novo museu, o escritório de projetos vencedor encontra-se elaborando o Estudo Preliminar de Arquitetura. Em função da experiência adquirida nas obras de reforço do píer e da larga experiência de seu corpo técnico, a DOCM atuará como coautora do projeto do MuMa.

Autores

CT (EN) Analucia Meyrelles Monteiro Piovezan

Engenheira Civil formada pela Universidade Federal do Espírito Santo-UFES. Pós-Graduada em Engenharia do Meio Ambiente (UFES). Mestrada em Engenharia de Transportes pelo Instituto Militar de Engenharia (IME).

IT (EN) Franklin Marim Amate Toledo

Engenheiro Civil formado pela Universidade de São Paulo (USP). Mestrando em Engenharia de Estruturas pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).