



## Reforço das fundações de um tanque no litoral paulista com estacas prensadas metálicas instrumentadas

Gustavo Prado Guerra

Engenheiro civil, Damasco Penna, São Paulo, Brasil, [gustavo.guerra@damascopenna.com.br](mailto:gustavo.guerra@damascopenna.com.br)

Anderson Diego Dardis de Macedo

Engenheiro civil, Damasco Penna, São Paulo, Brasil, [anderson@damascopenna.com.br](mailto:anderson@damascopenna.com.br)

Antônio Sérgio De Pietro Damasco Penna

Doutor em Engenharia Civil, Damasco Penna, São Paulo, Brasil, [penna@damascopenna.com.br](mailto:penna@damascopenna.com.br)

**RESUMO:** Caso especial de obra no litoral paulista onde um tanque de armazenamento de granéis líquidos, com capacidade de 3.200 m<sup>3</sup>, apresentou recalques da ordem de 15 cm, após permanecer carregado com água durante 20 dias. Esses deslocamentos provocaram patologias no tanque e em algumas de suas estruturas adjacentes. Suas fundações foram executadas em estacas tipo raiz, com comprimentos variando de 12 m a 24 m e a premissa de embutimento mínimo de 3 m em rocha. Acontece que a investigação geotécnica utilizada para elaboração do projeto compreendia apenas sondagens a percussão, nas quais a profundidade do material impenetrável se mostrou bastante variável e foi ainda considerada como topo rochoso para o embutimento das estacas. Após nova campanha de investigação geotécnica, dessa vez com sondagens mistas (SPT e rotativa), constatou-se que as estacas mais curtas foram, na realidade, embutidas em rochas bastante alteradas ou em matacões, que não ofereceram resistência suficiente às estruturas de fundação. Com base nas informações expostas e devido às limitações de espaço, está sendo executado o reforço dessas fundações, com estacas prensadas metálicas, sendo algumas delas instrumentadas para verificação do seu real comportamento geotécnico *in loco*, dada a heterogeneidade do subsolo local, que dificulta as previsões de carga por meio de métodos semiempíricos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Reforço, Estaca raiz, Estaca prensada, Sondagem mista, Instrumentação.

**ABSTRACT:** Special case in São Paulo coast of a liquid bulk storage tank (3,200 m<sup>3</sup>), that experienced settlements of approximately 15 cm, after being loaded with water during 20 days. These displacements caused structural issues in the tank and some of its adjacent structures. The foundations were constructed by root-piles, with lengths ranging from 12 m to 24 m and the premise of a minimum embedment of 3 m into the rock. The geotechnical investigation used for the design consisted only of SPT (Standard Penetration Test), in which the depth of impenetrable material was found to be highly variable and was considered as the rock surface for pile embedment. However, after a new geotechnical investigation campaign, this time using rotary drilling, it was discovered that the shorter piles were actually embedded in poor rocks, or boulders, which did not provide enough resistance for the foundation structures. Based on the information exposed and due to space limitations, the foundation is being reinforced with pressed steel piles, and some of them will be instrumented to monitor their actual geotechnical behavior on-site. This is necessary because the heterogeneity of the local subsurface makes it challenging to predict the loads through semi-empirical methods.

**KEYWORDS:** Reinforcement, Root-pile, Pressed pile, Rotary drilling, Instrumentation.

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



## 1 Introdução

Este trabalho apresenta um caso de obra no litoral Paulista, de reforço das fundações de um tanque de armazenamento de granéis líquidos com capacidade de 3.200 m<sup>3</sup>, que apresentou recalques da ordem de 15 cm ao permanecer carregado com água por 20 dias, após a realização do seu teste de estanqueidade.

O tanque em questão tem diâmetro de 13,5 m e altura de 22,4 m. Ele está inserido em uma bacia com outros quatro tanques, de diferentes volumes.

Para atender às especificações do terminal portuário, existe uma condição de que essa bacia apresente espaço disponível para reter 100% do líquido proveniente de um eventual vazamento do seu tanque de maior volume, de modo a evitar o escoamento de produto químico para o mar.

Dessa forma, por uma questão de capacidade volumétrica da bacia, os tanques estão apoiados em bases de concreto elevadas que, por sua vez, encontram-se apoiadas em “pilaretes” com cerca de 1,6 m de altura.

No nível do piso, os pilaretes se prolongam por quase 50 cm no subsolo e transferem suas cargas para as fundações em estacas tipo raiz.

Os recalques citados anteriormente foram observados em uma das extremidades do tanque e seus valores, da ordem de 15 cm, foram lidos por topografia, na face inferior da base de concreto, conforme desenho esquemático representado na figura 1:

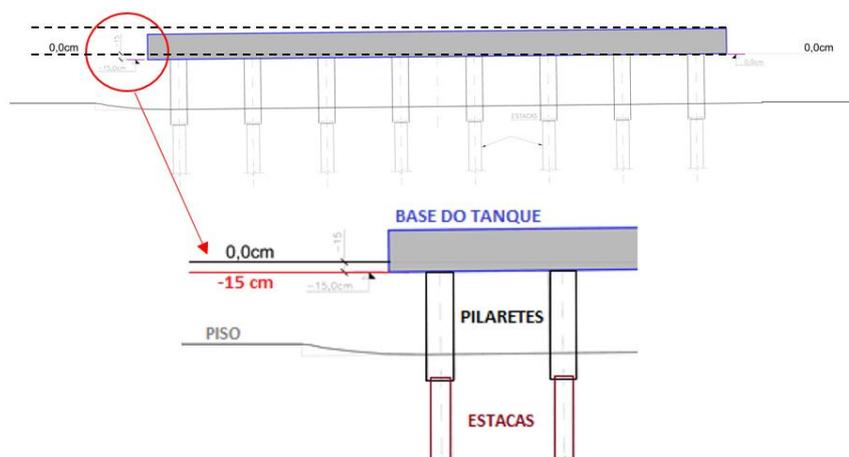


Figura 1. Desenho esquemático da base do tanque sobre pilaretes e dos recalques ocorridos

## 2 Aspectos geotécnicos iniciais

### 2.1 Contexto geológico

O contexto geológico da região envolve a presença de argilas sedimentares, divididas em dois principais tipos de sedimentos: (i) Pleistocênicos, depositados há 100.000 – 120.000 anos,

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



dando origem às argilas transicionais, que foram submetidas a grandes pressões de peso de terra; (ii) Holocênicos, depositados há 7.000 anos, que correspondem aos Sedimentos Flúvio-Lagunares (SFL), formados a partir do retrabalho das areias e argilas da Formação Cananéia.

Segundo Massad F. (1999), as argilas marinhas do litoral paulista são classificadas da seguinte forma: (i) Argilas de Manguezais, que são deposições recentes com valores de SPT praticamente nulos; (ii) Argilas de Sedimentos Flúvio-Lagunares (SFL), que foram depositadas no Holoceno, com valores de SPT entre 0 e 2 golpes, sendo, em geral, solos levemente sobre-adensados; (iii) Argilas Transicionais (AT), compostas por uma mistura de solos continentais e marinhos, que foram depositados no Pleistoceno e, por sua vez, são solos muito sobre-adensados, com valores de SPT entre 5 e 25 golpes (ou mais).

## 2.2 Sondagens a percussão

Para caracterização geotécnica da área de implantação da bacia e seus cinco tanques, foram inicialmente executados 35 furos de sondagens a percussão, que confirmaram as expectativas em relação ao contexto geológico local. Por meio dessa investigação, foi possível observar variações importantes nas espessuras das camadas das argilas SFL e nas profundidades de ocorrência do eventual topo rochoso (material impenetrável à ferramenta de percussão).

Além desses condicionantes geotécnicos principais, vale destacar as expressivas camadas de aterro que foram lançadas sobre o depósito de argilas marinhas, com espessuras variando na ordem de 3 a 6 m. Na sequência do aterro, têm-se as camadas de solo mole (argilas SFL), que avançam até profundidades de 6 a 15 m.

Por fim, encontram-se as camadas de solo residual (solo de alteração), até atingirem os materiais impenetráveis à ferramenta percussiva, cujas profundidades variam de 8 a 20 m. A figura 2 a seguir ilustra o perfil geotécnico do subsolo local, especificamente na área do tanque aqui estudado, aquele que sofreu recalques e terá suas fundações reforçadas:

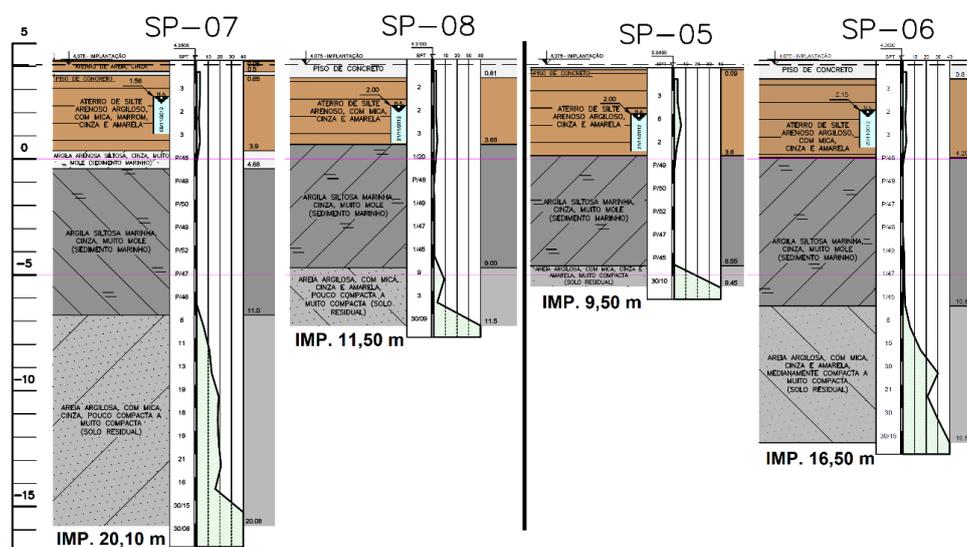


Figura 2. Perfil geotécnico do subsolo na área do tanque (sondagens a percussão)

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.





Verifica-se pelas sondagens a percussão que, na área do tanque a ser reforçado, a camada de aterro possui espessura aproximada de 4 a 5 m. Na sequência, a camada de argila marinha atinge profundidades de 9 a 11 m, quando começa então a camada de solo residual. Por fim, para esse tanque, a grande variabilidade está na profundidade de ocorrência do material impenetrável, ora com valores da ordem de 9,5 a 11,5 m, ora com valores da ordem de 16,5 a 20,1 m.

### 3 Fundações existentes – estacas tipo raiz

Para as fundações do tanque em questão, foram executadas 56 estacas do tipo raiz, com diâmetro de 31 cm e carga admissível de 90 tf. Seus comprimentos variam entre 12 e 24 m, com a premissa de embutimento mínimo de 3 m em rocha.

Vale destacar que, na ocasião do projeto das fundações existentes, os comprimentos dessas estacas foram determinados somente com base nas sondagens a percussão, sendo a profundidade do material impenetrável adotada como topo rochoso para embutimento.

Consequentemente, as estacas de menor comprimento foram predominantes no canto superior esquerdo do tanque, na mesma região da sondagem SP-05, cujo material impenetrável foi atingido na profundidade de 9,50 m. Além disso, foi justamente nessa região em que os recalques e patologias foram registrados.

Outro ponto importante de se destacar é o tempo de perfuração das estacas a partir do momento em que precisou ser utilizado “o martelo de fundo”, ferramenta da estaca raiz utilizada para sua execução em terreno rochoso. A princípio, esse índice pode estar diretamente relacionado à resistência da rocha de embutimento das fundações.

Ainda conforme os dados dos boletins de execução, as estacas que tiveram menor tempo de perfuração em rocha também são predominantes no canto superior esquerdo do tanque, o que poderia indicar que foram embutidas em rocha de baixa qualidade ou até mesmo em matacão.

### 4 Aspectos geotécnicos complementares

#### 4.1 Sondagens mistas

Após as ocorrências registradas na estrutura do tanque, foi executada uma nova campanha de investigação geotécnica, dessa vez contemplando sondagens mistas (percussão e rotativa), para análise das possíveis causas dos recalques ocorridos. Seus resultados confirmaram a hipótese de que o material impenetrável à ferramenta percussiva, em alguns casos, se tratava de rocha de mais baixa resistência.

A figura 3 ilustra essa característica do subsolo descrita acima, com a representação dos comprimentos mais pertinentes obtidos na execução das fundações do tanque (estacas tipo raiz):

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



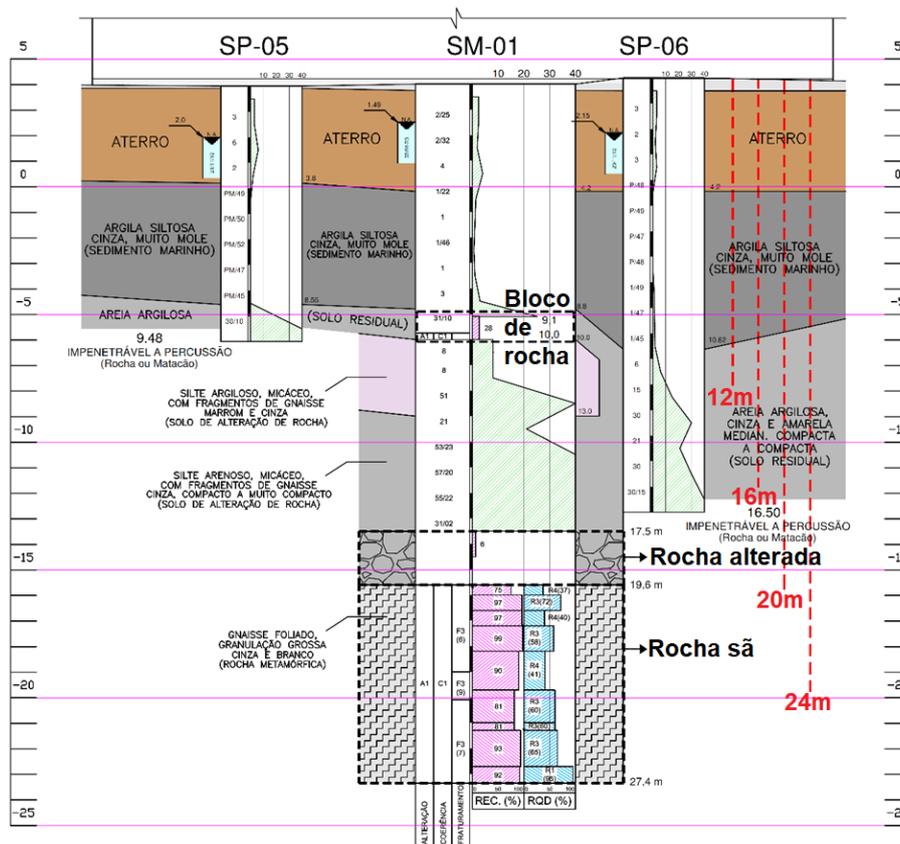


Figura 3. Perfil geotécnico do subsolo na área do tanque (sondagens a percussão e rotativa)

Conforme já apresentado no item 2, dentro da área de projeção do tanque, as sondagens à percussão SP-05 e SP-08 atingiram o material impenetrável em profundidades da ordem de 9,5 a 11,5 m. Já a SP-06 atingiu esse material com 16,5 m de profundidade e a SP-07 com 20,1 m.

A sondagem mista mais próxima ao tanque aqui estudado foi a SM-01, mostrando que na profundidade de 9,1 a 10 m (condizente com SP-05 e SP-08), encontra-se um possível bloco de rocha, bastante alterada. Abaixo desse bloco, voltam a aparecer camadas de solo residual, com resistência ainda não tão elevada.

Na profundidade de 17,5 m (condizente com SP-06), a sondagem mista SM-01 mostra uma transição de solo para rocha, na qual já foi necessária usar a ferramenta rotativa. Por fim, a rocha com maiores índices de recuperação e RQD, denominada aqui como rocha sã, só foi observada a partir da profundidade de 19,6 m (condizente com SP-07).

Nota-se então que boa parte das estacas tipo raiz está inserida em solo de baixa a média resistência (comprimentos de 12 a 16 m) ou em camada de rocha alterada (16 a 20 m). Apenas 7 das 56 estacas existentes possuem comprimentos finais de 20 a 24 m e, portanto, são as únicas que estão verdadeiramente embutidas em rocha sã.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



## 5 Fundações de reforço – estacas prensadas metálicas

### 5.1 Premissas

Lembra-se aqui que as estacas tipo raiz existentes foram projetadas com diâmetro de 31 cm e carga de trabalho de 90 tf. No entanto, ao se avançar com a perfuração auxiliada por “martelo de fundo”, o diâmetro reduziu para o correspondente a 21 cm, com significativa penalização da capacidade de carga estrutural e geotécnica do elemento de fundação, especialmente nas posições das estacas mais curtas.

Após os esclarecimentos trazidos pela investigação geotécnica complementar, foi possível verificar que o embutimento da estaca com 3 m em rocha sã teria sido alcançado apenas com comprimentos entre 20 e 24 m, que foi obtido em apenas 7 das 56 estacas do tanque.

Não por acaso, ao determinar as cargas admissíveis das estacas existentes, com os cálculos baseados no método semi-empírico de Pedro Paulo Velloso (Velloso P. P. C., 1981) e com a consideração do diâmetro reduzido para 21 cm na parcela da estaca executada com “martelo de fundo”, foi obtido prognóstico comprometedor para as estacas do tanque, com déficit de carga generalizado e incompatibilidade das fundações em relação às solicitações previstas em projeto, justificando a necessidade de reforço.

Levando em conta os aspectos dos riscos de operação do tanque, associados a danos com vidas humanas e ambientais, foi concebida a solução de reforço das fundações com estacas prensadas metálicas para a totalidade dos pilaretes.

Desse modo, para cada pilarete, foi proposta a execução de um par de estacas prensadas metálicas, tubulares, de 15 cm de diâmetro (6”), cada uma com capacidade de carga de 45 tf. Estas estacas de reforço foram projetadas para serem cravadas com macaco hidráulico reagindo contra a estrutura existente, em segmentos de 75 cm emendados por luvas roscadas, dadas as restrições de pé-direito e de uso de solda no local.

Entre o macaco e a laje, foi especificada a utilização de uma chapa metálica dimensionada por projetista estrutural, evitando possíveis danos à estrutura, proveniente da carga a ser aplicada durante à cravação. Também foi especificado o carregamento parcial do tanque com água, em volume corresponde à apenas 10% da sua capacidade total.

Ainda no projeto de reforço, foi especificada a carga de cravação de 115 tf ( $FS \cong 2,5$ ) para ser confirmada com ensaios experimentais de campo (provas de carga estáticas) e de laboratório (capacidade estrutural do segmento de tubo e do conjunto tubo mais luva de emenda), tanto em termos de desempenho, quanto de cravabilidade, com a pretensão de avanço da estaca pelo horizonte de solo residual mais competente. Além disso, também foi especificada a necessidade de acompanhamento técnico da obra com engenheiro geotécnico em regime de tempo integral.

Na figura 4 a seguir, há uma reprodução parcial da planta do projeto de reforço, com destaque para as estacas selecionadas para realização de ensaios de prova de carga estática preliminares.

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



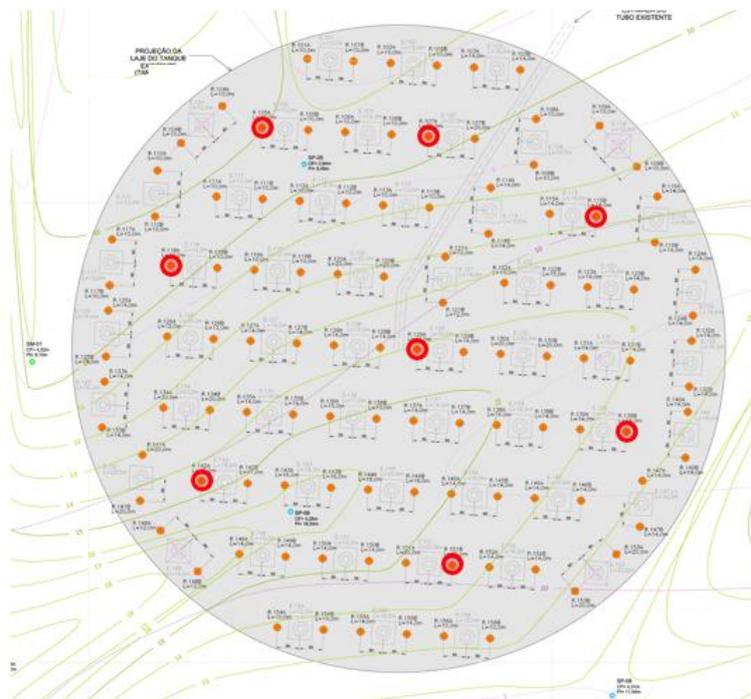


Figura 4. Projeto de reforço e estacas selecionadas para as provas de carga estáticas preliminares

## 5.2 Verificação da capacidade estrutural dos tubos metálicos

Os elementos metálicos especificados em projeto para composição das estacas de reforço do tanque foram submetidos a ensaios de compressão simples, em laboratório especializado, para determinação da resistência estrutural do material. Os tubos possuem 6” de diâmetro, schedule 80, aço ASTM A572-50, torneados com rosca nas extremidades para conexão com luvas de emenda, compostas pelo mesmo material, mas com diâmetro externo de 19 cm.

Foram ensaiados dois modelos, sendo o primeiro referente apenas ao segmento de tubo propriamente dito e o segundo referente a dois segmentos de tubos unidos pela luva roscada de emenda. Neste último, foi deixada propositalmente uma folga de 2 cm entre os tubos, de modo a verificar o comportamento do elemento no caso de uma eventual falha executiva na obra.

Os ensaios nos modelos de segmento único e de segmentos emendados por luva roscada resultaram em cargas máximas de 1.600 kN (160 tf) e 1.400 kN (140 tf), respectivamente, em regime linear, sem atingir o patamar de escoamento, com deformações residuais de 352  $\mu\epsilon$  para o primeiro modelo e de 166  $\mu\epsilon$  para o outro.

No caso do modelo com segmentos emendados com luva, vale destacar que o dispositivo de emenda suportou carga até 364 kN (36,4 tf), momento em que ocorreu a ruptura e permitiu que os dois segmentos de tubo encostassem um no outro, passando a trabalhar com comportamento de tubo único, garantindo transferência de carga até atingir os 1.400 kN (140 tf).

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.



A figura 5 abaixo ilustra um conjunto de fotografias dos modelos ensaiados em laboratório:

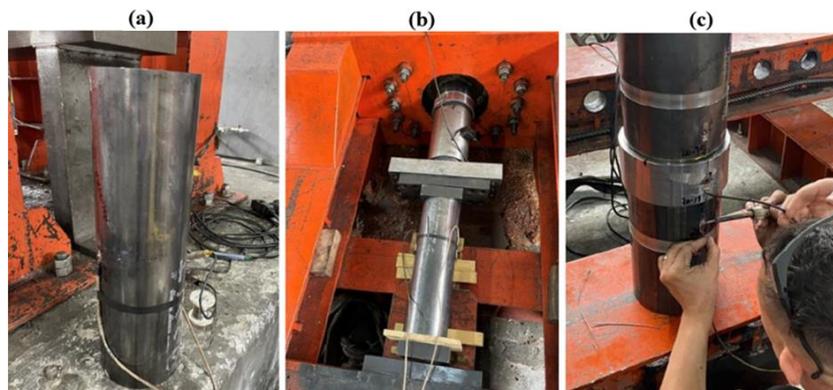


Figura 5. Ensaios feitos em laboratório: (a) detalhe do segmento de tubo com *strain gauges*; (b) segmento de tubo durante ensaio; (c) detalhe do modelo com segmentos e luva

### 5.3 Provas de carga estáticas

Conforme comentado no item 5.1, foram selecionadas oito estacas testes para verificação da sua cravabilidade no terreno e validação do projeto das fundações de reforço. Esses elementos foram executados previamente ao estaqueamento definitivo da obra e foram submetidos a provas de carga estáticas, sendo três delas com carregamento do tipo lento e cinco com carregamento do tipo rápido, conforme especificações da NBR 16903:2020.

A figura 6 ilustra as curvas carga x recalque obtidas nas provas de carga com carregamento do tipo lento, executadas nas três primeiras estacas da obra:

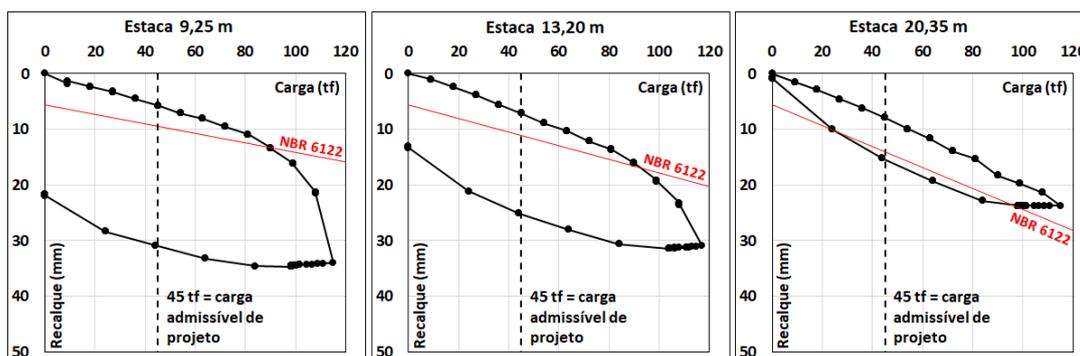


Figura 6. Curvas carga x recalque resultantes das três provas de carga com carregamento lento

As estacas testes confirmaram as expectativas sobre sua cravabilidade, atingindo a carga de cravação de projeto (115 tf) em profundidades correspondentes à ocorrência de material impenetrável indicada pelas sondagens à percussão. Tal fato resulta em estacas de reforço com comprimentos bastante variáveis, mas cujos ensaios indicam carga de ruptura de no mínimo 90 tf e, portanto, fator de segurança maior ou igual a 2,0. Além disso, na carga admissível de projeto (45 tf), os deslocamentos em todas as provas de carga correspondem às deformações elásticas do elemento de fundação, com valores da ordem de apenas 5 a 9 mm.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



Além das oito provas de carga estáticas, as 104 estacas restantes também são submetidas a “ensaios de recebimento”, que consistem no seu carregamento em 5 etapas de carga (25, 45, 70, 90 e 115 tf), todas com medida de deslocamentos por meio de deflectômetros. Trata-se de um modelo semelhante às provas de carga, mas em estágios acelerados.

## 5.4 Encunhamento e instrumentação

Na grande maioria das obras de reforço com estacas prensadas, estes elementos são encunhados em estruturas abaixo do nível do piso acabado, que geralmente são os blocos de coroamento das fundações pré-existentes.

No caso aqui apresentado, as estacas são encunhadas na base de concreto armado de apoio do tanque, que está elevada, com pé-direito da ordem de 1,60 m. Por ficarem aparentes e sujeitos a ações corrosivas provenientes da maresia, foram desenvolvidos dispositivos de encunhamento exclusivos para as fundações de reforço dessa obra.

O dispositivo projetado por um especialista em estruturas possui altura fixa de 80 cm e consiste num segmento de tubo com duas placas metálicas soldadas em suas extremidades. Por sua vez, a placa da extremidade inferior é acoplada por meio de barras roscadas, com porcas e contraporcas, a uma outra chapa na qual está soldada uma luva calandrada, que “veste” o trecho sobressalente das estacas de reforço, também com altura da ordem de 80 cm.

Em comum acordo entre projetistas estrutural e geotécnico, foi determinado que as estacas deveriam apenas encostar na laje de apoio do tanque, sem introduzir grandes esforços a ela, evitando possíveis patologias em sua estrutura para a situação do tanque vazio. Ficou então definida a carga de encunhamento de 5 tf, aplicada nas porcas e contraporcas com auxílio de chave de boca com torquímetro de precisão.

Os tubos sobressalentes das estacas (trecho exposto acima do piso) e os dispositivos de encunhamento recebem tratamento superficial com tinta anticorrosiva. A figura 7 apresenta o detalhe de projeto desse dispositivo e uma fotografia dele instalado em obra:

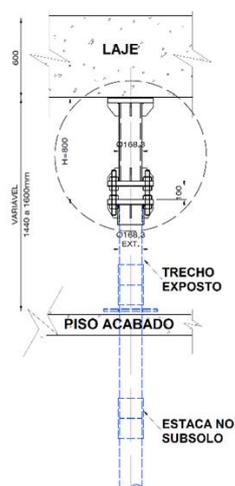


Figura 7. Detalhe de projeto e fotografia em obra do dispositivo de encunhamento das estacas

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.





Por fim, vale destacar que foram escolhidas 10 estacas de reforço para instrumentação dos seus dispositivos de encunhamento e dos seus pilaretes mais próximos, com par de *strain gauges*, para verificação da verdadeira carga solicitante em cada um desses elementos.

Essas cargas serão medidas em quatro etapas de carregamento do tanque (25%, 50%, 75% e 100% do seu volume total) e os resultados obtidos serão comparados com o modelo numérico estrutural adotado em projeto.

## 6 Conclusões

Dentre os diversos assuntos abordados neste trabalho, pode-se destacar a relevância de uma investigação geotécnica completa e exclusiva para cada tipo de obra. No caso aqui apresentado, grande parte das ocorrências poderiam ter sido evitadas ainda na fase de projeto das fundações, se já tivessem sido executadas as sondagens rotativas para verificação da rocha em que as estacas tipo raiz seriam embutidas.

Devido às limitações de espaço e de equipamentos para execução das fundações de reforço, foram adotadas estacas prensadas metálicas (segmentos de tubo com 75 cm de comprimento, rosqueados entre si), cuja cravação é feita com auxílio de macaco hidráulico reagindo contra a laje de apoio do tanque.

Existiam muitas incertezas sobre os modelos numéricos utilizados para o dimensionamento desse reforço, cujo real comportamento estrutural e geotécnico precisou então ser confirmado por meio dos ensaios e instrumentação descritos no decorrer deste artigo.

Por fim, acabou-se por criar um expressivo banco de dados que, no futuro, será utilizado em trabalhos acadêmicos de pós-graduação, contribuindo para a comunidade científica.

Além disso, esses dados poderão ser utilizados para o dimensionamento do reforço dos demais tanques da bacia aqui estudada. Embora não tenham apresentado nenhuma ocorrência visível, também foram constatadas deficiências no projeto e execução das fundações desses tanques, que hoje operam com sua capacidade reduzida em relação ao volume total disponível.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16903. *Solo – Prova de carga estática em fundação profunda*. Rio de Janeiro.
- Massad, F. (1999). Solos e Rochas: revista latino-americana de geotecnia, 22 (1), 3-49. *Baixada Santista: implicações da história geológica no projeto de fundações*.
- Velloso, P. P. C. (1981). Fundações: aspectos geotécnicos. 3ª ed. PUC-RJ, v.3, 467-469. Rio de Janeiro.

Aponte a câmera do seu  
smartphone para o  
QR Code ao lado e salve o  
evento na sua agenda.

