

## **FUNDAÇÃO OFFSHORE COM ESTACA DE GRANDE DIÂMETRO ANCORADA EM ROCHA – CASO DA EEAB JAGUARI**

D. F. M. MELO

Engenheira Civil MSc, GeoCompany Tecnologia, Engenharia e Meio Ambiente, Barueri, Brasil.

M. A. TRASKURKEMB

Engenheira Civil, GeoCompany Tecnologia, Engenharia e Meio Ambiente, Barueri, Brasil.

T. H. LEITE

Gerente de Geotecnia, GeoCompany Tecnologia, Engenharia e Meio Ambiente, Barueri, Brasil.

H. G. JARROUGE NETO

Gerente de Projetos, GeoCompany Tecnologia, Engenharia e Meio Ambiente, Barueri, Brasil.

I. G. BASTOS

Gerente de Projetos, MSc, GeoCompany Tecnologia, Engenharia e Meio Ambiente, Barueri, Brasil.

R. KOCHEN

Professor Doutor Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Diretor Técnico, GeoCompany Tecnologia, Engenharia e Meio Ambiente, Barueri, Brasil.

### **1 INTRODUÇÃO**

Para aumentar a segurança hídrica da população da Região Metropolitana de São Paulo a SABESP em parceria com o Governo do Estado de São Paulo realizou a obra de Interligação entre as Represas Jaguari e Atibainha. Tal obra pode ser dividida em 3 elementos principais que são a EEAB Jaguari, a EEAB Atibainha e a adutora de água bruta. O presente artigo apresenta a fundação utilizada na construção da Estação Elevatória de Água Bruta Jaguari (EEAB Jaguari).

A estrutura da EEAB Jaguari apresenta dimensões externas de 30,2 x 29,7 metros. A carga total da estrutura é de 6.800 toneladas, tal carga é composta pelo peso da estrutura, incluindo fechamento e cobertura, carga móvel e ponte rolante. A fundação foi realizada através de estacas de grande diâmetro ancorada em maciço rochoso, conforme apresentado nos itens a seguir.

### **2 EEAB JAGUARI**

O sistema adutor da interligação foi concebido para operar em dois sentidos de fluxo. No sentido Jaguari Atibainha a operação se dá através de conduto forçado, enquanto que no sentido Atibainha Jaguari a adução se dá por gravidade, se aproveitando do desnível geométrico favorável. A adução da água bruta ocorre através de tubulação de aço com diâmetro nominal de 2200mm. A velocidade de transporte é de 2,2m/s no sentido Jaguari Atibainha e de 3,2m/s no sentido inverso.

A Figura 1 apresenta uma foto da EEAB durante a etapa construtiva, na qual é possível observar a locação da obra e parte da estrutura de suporte. A ligação entre a plataforma da EEAB e a margem do reservatório foi realizada por uma Ponte de Serviço, com 5,80 m de largura e 70 metros de extensão, executada através de estrutura metálica.



*Figura 1 – EEAB Jaguarí – vista durante a execução*

A EEAB Jaguarí é composta por 6 conjuntos de moto-bomba de eixo verticais de 5000cv de potência dispostas em duas linhas paralelas com 3 bombas cada, e a tubulação no formato espinha-de-peixe. No centro destas linhas existe um tubo coletor de recalque (cavalete) com DN 2200 mm que receberá a descarga das 6 bombas. O conjunto tem a capacidade de transpor uma vazão média anual de  $5,13\text{m}^3/\text{s}$  e uma vazão máxima de  $8,5\text{m}^3/\text{s}$  a um desnível geométrico de 176m no sentido Jaguarí Atibainha.

As motos bombas verticais estão instaladas em poços de captação para realizar a tomada de água. Tais poços têm dupla funcionalidade, atuam como estrutura de captação e servem também como elemento de transmissão da carga, da estrutura para a fundação.

A Figura a seguir apresenta uma perspectiva da estrutura, na qual é possível visualizar como se dá o apoio e a transmissão de cargas para a fundação. A EEAB Jaguarí possui estrutura metálica e é apoiada sobre dois blocos e os seis poços de captação. Cada um dos blocos é suportando por 4 estacas com diâmetro de 1,20 m no trecho em solo e de 1,00 m no trecho em rocha. Sob cada poço de captação a fundação se deu através de um estacão de grande diâmetro,  $\varnothing 4,20$  m, ancorado em rocha sã através de um pino de 1,80 m.

Devido ao transiente hidráulico inerente à operação do sistema de adução, a estrutura da EEAB pode ser submetida a um esforço horizontal equivalente a um esforço sísmico, portanto o prédio da EEAB Jaguarí foi concebido como um elemento dinâmico, que pode apresentar recalques horizontais sem afetar sua integridade ou segurança.

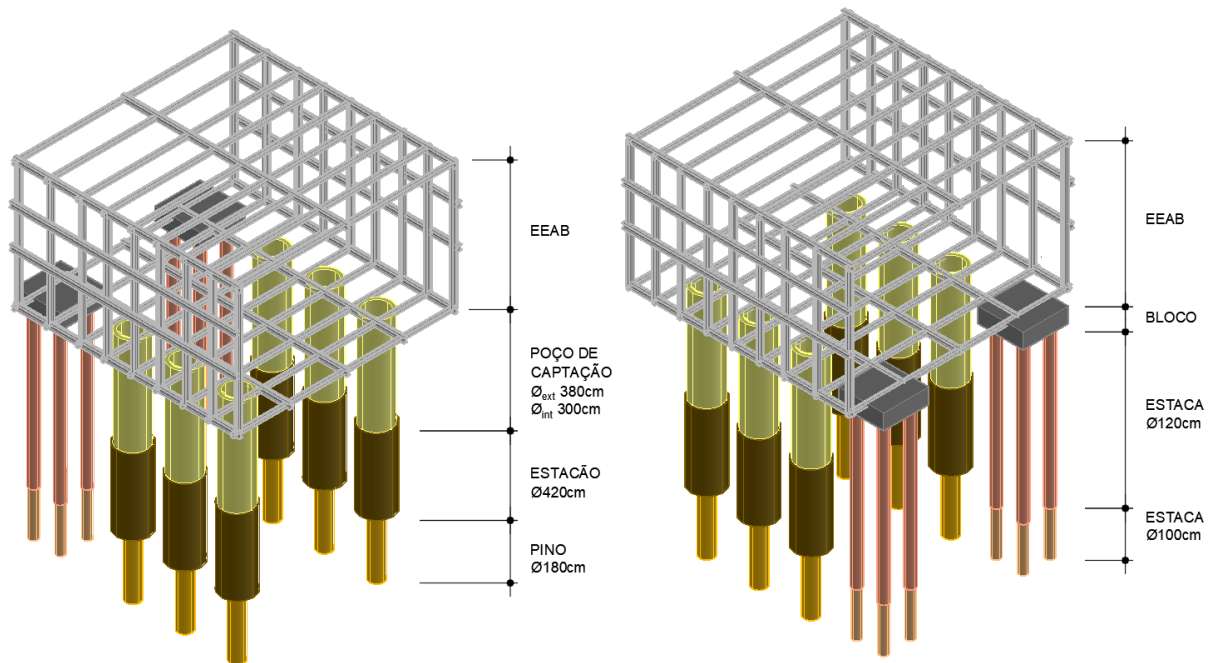


Figura 2 – Perspectivas da EEAB Jaguarí

### 3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Para atender o prazo construtivo optou-se pela execução da estrutura offshore sem a execução de uma ensecadeira. A construção dos poços e das suas fundações foi realizada completamente submersa, dentro do reservatório da barragem de Jaguarí, através do apoio de balsas, guindastes e martelo de cravação, além do constante apoio de equipe de mergulhadores profissionais para o acompanhamento dos serviços. De modo que a principal dificuldade construtiva se deu pela opção de executar a estrutura dentro do reservatório, sem o auxílio de uma barragem ensecadeira.

Na Figura 3 é apresentada uma situação de construção, na qual é possível visualizar a dificuldade inerente à construção de fundação offshore. A lâmina d'água no local da estrutura apresentava uma altura em relação ao fundo do reservatório de, aproximadamente, 20 metros de profundidade.

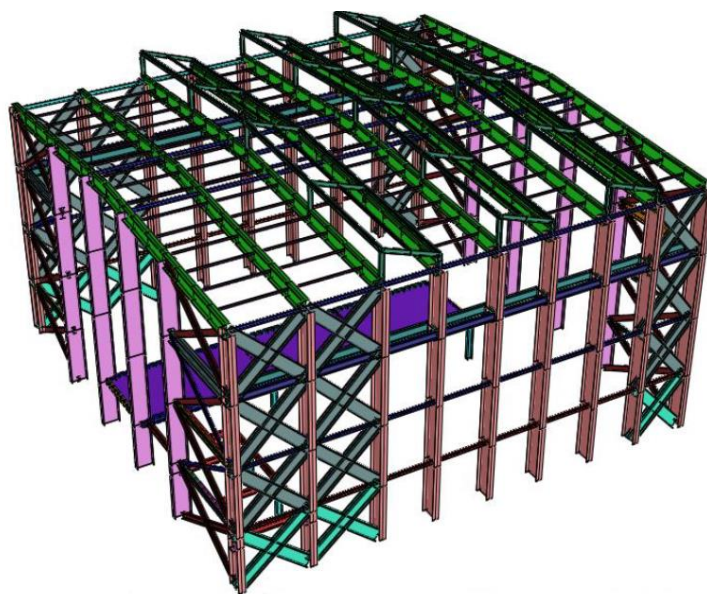


*Figura 3 – Construção através do apoio de balsas e guindastes*

A execução da estrutura offshore permitiu atender ao curto prazo de construção, tendo em vista que a obra foi uma resposta do Governo do Estado de São Paulo à crise hídrica que atingiu o Estado nos últimos anos.

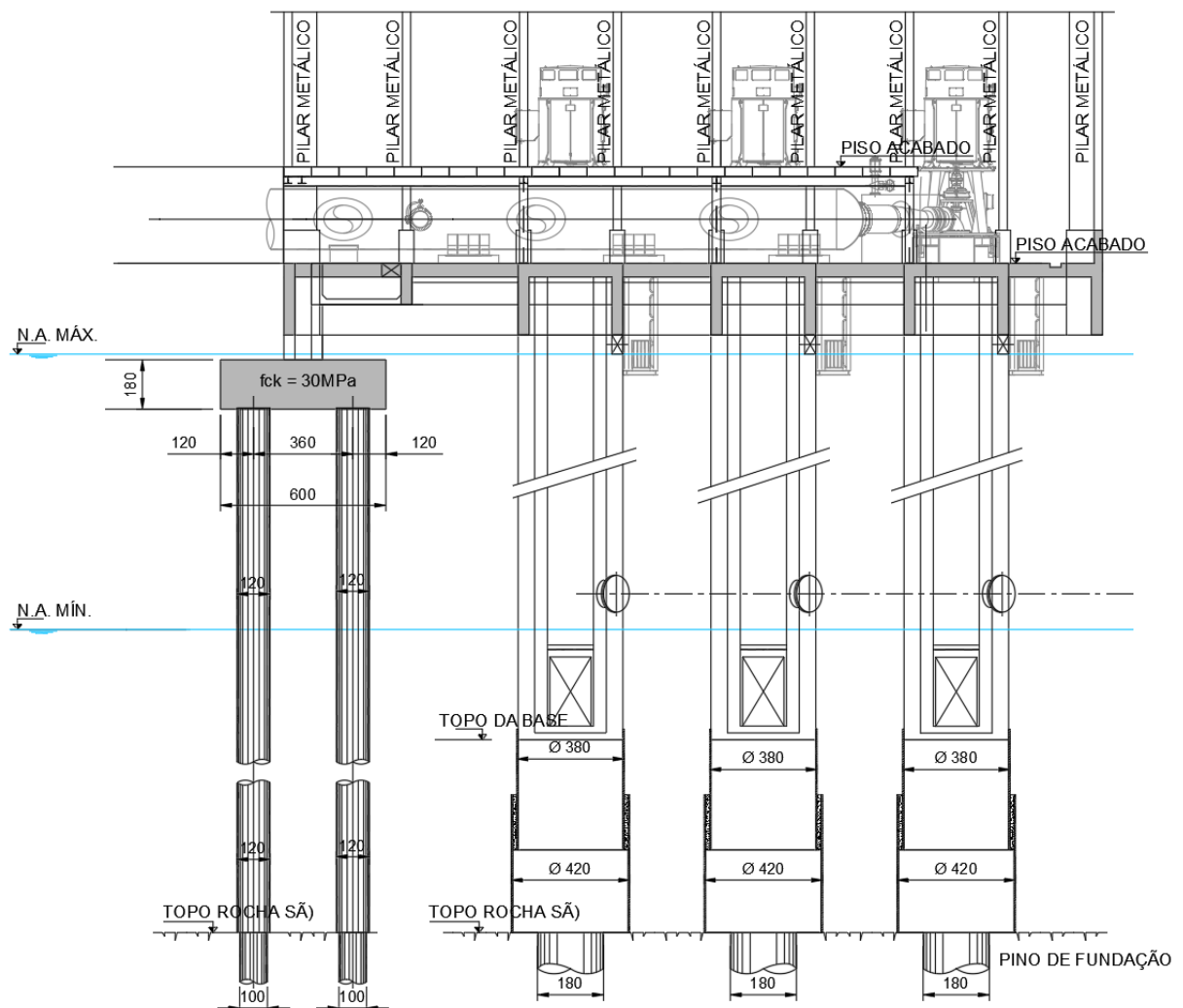
#### **4 MÉTODO CONSTRUTIVO**

A estrutura da EEAB é composta por pilares metálicos que, com as vigas principais, compõem os pórticos engastados. A cobertura foi prevista em telhas metálicas tipo sanduíche, com lanternins para exaustão de temperatura, bem como o fechamento lateral. As vigas principais são engastadas nos pilares por ligação rígida, e os pilares são engastados na estrutura de concreto. Os pilares trabalham aporticados em uma direção enquanto na outra direção existem contraventamentos para minimizar os efeitos de deslocabilidade provenientes de esforços diversos. Haverá uma ponte de serviços, destinada ao tráfego lento de veículo com carga pesada (adotado TB-450).



*Figura 4 – Modelo 3D Renderizado da estrutura da EEAB Jaguarí*

A estrutura foi dimensionada para suportar os esforços provenientes de ponte rolante com capacidade de carga de 30 tf, sendo considerado um esforço de 45 tf devido ao peso próprio da ponte rolante de 15 tf. Além dos esforços devido à ponte rolante, existem esforços devido ao TB-450, e esforços devido à equipamentos posicionados sobre a ponte de serviço. A ponte de serviço apoia-se sobre o piso da EEAB, e é composta de vigas e pilares metálicos, com piso para rolamento do veículo tipo em painéis pré-moldados de concreto.



Cada um dos poços de captação apresenta a mesma configuração, como mostrado na Figura 5, no corte típico da estrutura de fundação. Nesse corte é possível observar que a estrutura é composta pelos seguintes elementos, pino de fundação com diâmetro de 1,80 m embutido em rocha sã, base com diâmetro de 4,20 m concretado através do apoio de uma camisa metálica e o poço propriamente dito, com diâmetro externo de 3,80 m e diâmetro interno de 3,00 m que também foi concretado através da utilização de camisas metálicas. As camisas metálicas utilizadas receberam proteção mecânica através de pintura anticorrosiva.

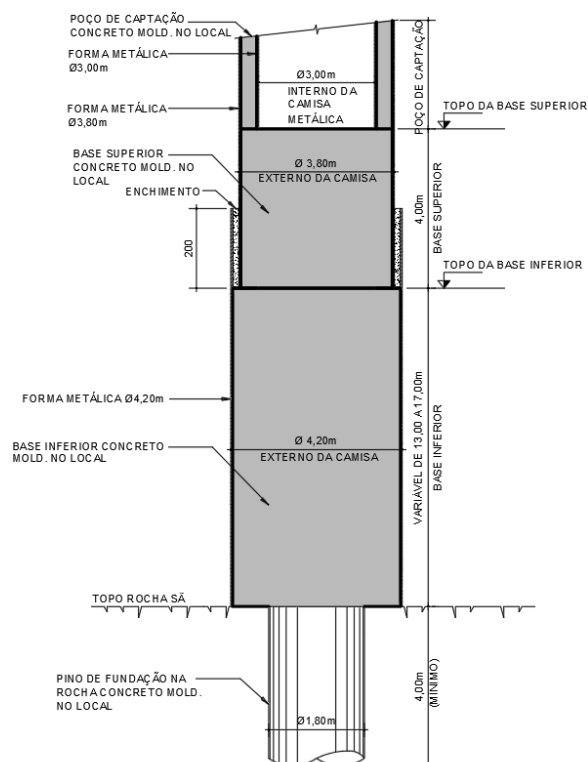


Figura 5 – Corte transversal da estrutura de fundação do poço de captação

Para a construção das fundações o primeiro passo foi a cravação de uma camisa metálica de 4,20 m de diâmetro até encontrar o topo rochoso. Esse procedimento encontrou dificuldade na execução, já que o topo rochoso é variável e a camisa metálica precisava se manter plana e com prumo. Para garantir a execução de acordo com o projetado, foi necessário um rigoroso controle de qualidade durante a cravação destas camisas. A Figura 6 representa esta etapa da construção. Após a cravação ocorria a escavação em solo e rocha com perfuratriz do tipo Wirth com diâmetro de 4,20 m até a cota especificada em projeto. O comprimento médio da perfuração com diâmetro de 4,20 m para os poços 1 a 6 foi de 10,9 m.





*Figura 6 – Escavação da base da fundação com diâmetro de 4,20m.*

Com a conclusão do trecho que se encontrava em solo e em maciço rochoso alterado, se iniciou a escavação dos pinos de fundação, com diâmetro de 1,80 m, escavado através de perfuratriz tipo Wirth com limpeza através de circulação reversa. O comprimento médio do pino de fundação para os poços 1 a 6 foi de 8,2 m.

Findada a escavação e limpeza do pino, se iniciava a descida da gaiola de armação. A armação dos pinos foi montada juntamente com a armação dos estacões de 4,20 m de diâmetro, formando uma estrutura em formato de cálice, conforme ilustrado na Figura 7. Após o posicionamento da armação ocorria a concretagem em etapas, que foi realizada submersa através de tubo tremie. O consumo médio de concreto por apoio foi de 225 m<sup>3</sup>, considerando do pino de fundação ao início da parede do poço de captação.



*Figura 7 – Estrutura de armação em forma de cálice para o pino e base da fundação*



Após a concretagem da fundação iniciou-se a execução dos poços de captação. A estrutura do poço de captação é composta por duas camisas metálicas, a camisa interna tem diâmetro de 3,00m e a externa tem diâmetro de 3,80m, de modo que a espessura da parede do poço é de 40cm.

A sequência de execução do poço de captação foi a seguinte: descida da camisa metálica de 3,80m de diâmetro, descida da armação da parede do poço e concretagem da região interna, descida de camisa metálica de 3,00m (Figura 8) e concretagem da parede do poço de captação. A parede dos poços ficou com espessura de 40cm, contendo aberturas, onde foram instaladas comportas, para permitir a captação da água.



*Figura 8 – Instalação da camisa metálica do poço de captação*

A Figura 9 apresenta a sequência executiva da construção de cada um dos poços de captação.

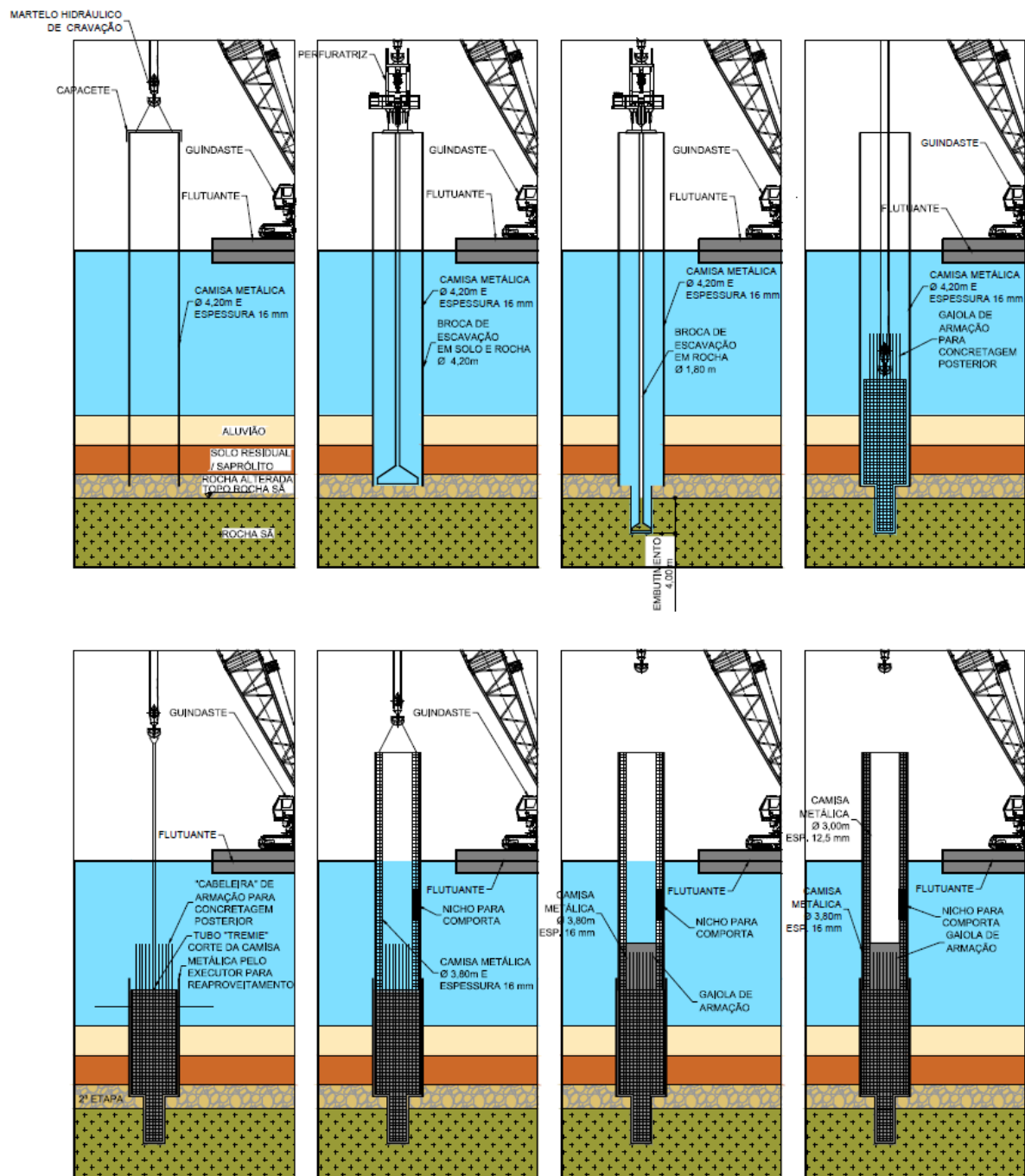


Figura 9 – Sequência executiva dos poços

## 5 SUBSOLO LOCAL

Para definição da fundação do edifício foi executada uma campanha de sondagens com uma sondagem mista no eixo de cada um dos poços de captação da EEAB, e mais duas sondagens mistas na área ao redor destes. A Figura 10 apresenta a distribuição dos elementos de fundação e a locação das sondagens mistas realizadas para caracterização do subsolo.

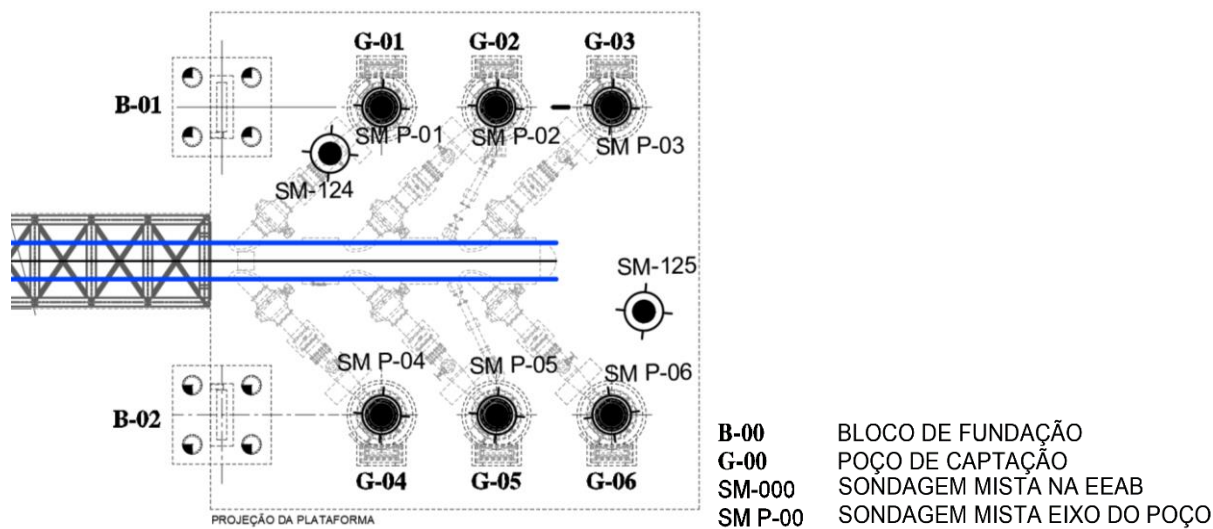


Figura 10 - Localização das Sondagens, Blocos e Poços

Com base na análise dos boletins obtidos nas sondagens, observa-se que o perfil geológico é composto por camada de aluvião (areia fina a grossa, com pedregulho fino a médio, com trechos de argila siltsosa, marrom amarelada a cinza variegada) sobre uma camada de solo residual (silte pouco arenoso, com mica, marrom escuro a marrom amarelado) sobre maciço rochoso (granito-gnaiss milonitizado pertencente ao granitóide intrusivo Santa Isabel (neoproterozoico), apresentando característica de rocha sã a pouco alterada, com trechos xistosos, com porfiroblastos de quartzo e k-feldspato, foliação inclinada, subvertical e incipiente, granolepidoblástico, fanerítico fino a médio, com trechos muito alterados, cinza escuro e branco). A Figura 11 apresenta o perfil longitudinal típico obtido.

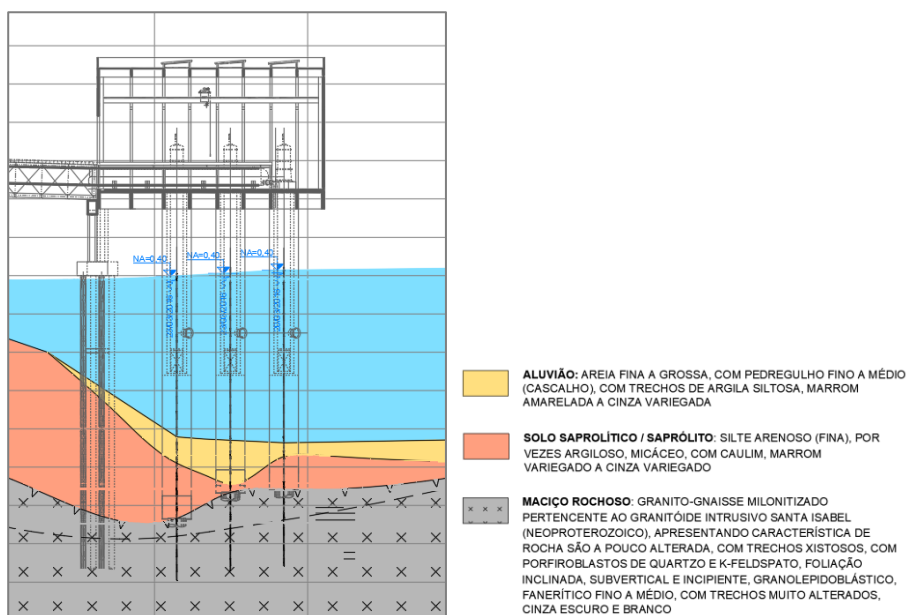


Figura 11 – Perfil longitudinal EEAB Jaguari

A definição da profundidade que ocorre o maciço rochoso e rocha sã foi realizada de acordo com análise dos boletins e dos testemunhos das sondagens mistas realizadas. Tais cotas foram utilizadas

na determinação do comprimento de embutimento das estacas, conforme será apresentado adiante. Como os blocos de fundação estarão apoiados em rocha, apresentam cotas variáveis. A Figura 12 é uma representação tridimensional da geologia encontrada no local dos poços de captação, indicando a extensão da lâmina d'água, camada de solo, de rocha alterada e de rocha sã.

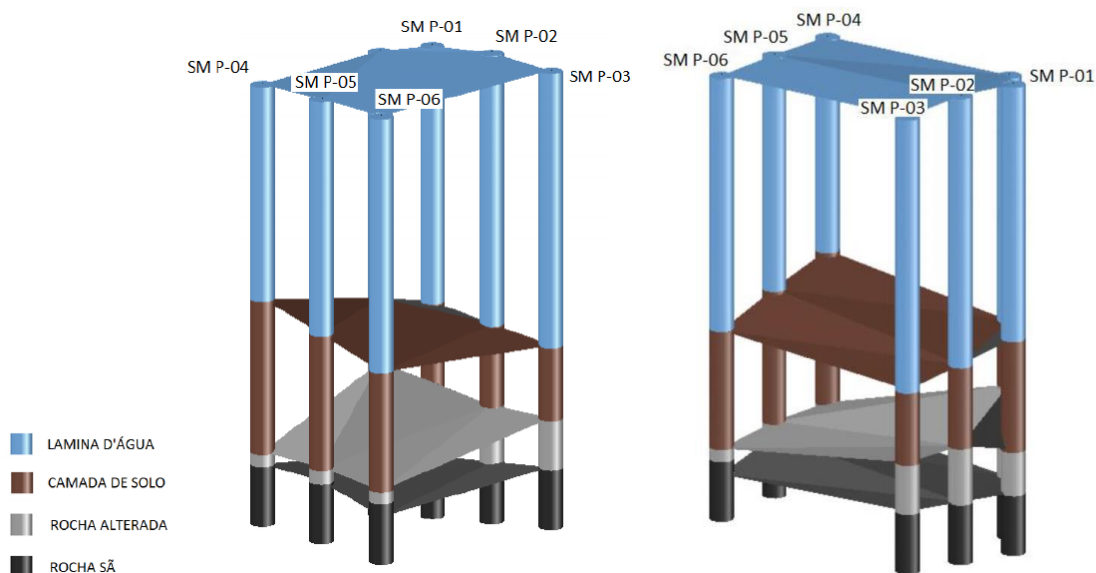


Figura 12 – Representação tridimensional das camadas existentes no local

## 6 FUNDAÇÃO DA EEAB JAGUARI

Cada uma das seis estruturas de captação foi sustentada por 1 estação de 4,20 m de diâmetro com pino de fundação de diâmetro de 1,80 m e os 2 pilares serão sustentados por um bloco apoiado em quatro estacas de diâmetro de 1,20 m no trecho em solo e 1,00 m no trecho em rocha.

Para a definição das cargas atuantes foi utilizado o programa de análise estrutural por elementos finitos STRAP 2009, sendo considerada a estrutura de fechamento e cobertura, carga móvel adotada TB-45 e a ponte rolante com capacidade para 30tf, cujo peso é de 15tf. O carregamento obtido na fundação apresentou variação entre 1081 e 1771 tf para os pinos e entre 166 e 229 tf para os pilares. Tendo em conta a elevada carga e tensão atuante nas estacas, foi definido que o apoio das estacas seria em maciço rochoso de elevada competência, ou seja, rocha sã.

Leite et al. (1998) afirmaram que a resistência à tração das estacas vale de 60 a 100% da resistência lateral à compressão. Os esforços de tração atuantes são da ordem de 5% do esforço de compressão, ou seja, o esforço que prevalece no dimensionamento é o de compressão. Portanto não serão considerados no dimensionamento/verificação das estacas e pinos o esforço de tração.

Apesar da estaca transpassar camadas de solo residual, devido a grande diferença entre os coeficientes de rigidez solo/rocha e a favor da segurança, foi considerado apenas a capacidade de carga do trecho em rocha, sendo desprezada a contribuição do solo (atrito lateral).

Para o dimensionamento da capacidade de carga das estacas foi utilizado o método proposto por Cabral-Antunes, apresentado no 4º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia

(2000). Tal método, assim como os métodos clássicos de dimensionamento de estacas (Aoki e Velloso, Decourt Quaresma) estabelece que a capacidade de carga de estacas embutidas em rocha pode ser considerada como a soma da parcela da resistência por atrito lateral com a parcela de resistência de ponta.

O método supracitado depende do fator da qualidade do maciço rochoso, que pode ser caracterizado por meio de ensaios de Resistência a Compressão Simples ( $RCS = \sigma_c$ ) e também da limpeza da ponta da estaca, onde ocorre o contato concreto-rocha, sendo empregado um coeficiente de segurança igual ou superior a 3,0 para a obtenção da tensão admissível na rocha à compressão simples. Com base nas informações das sondagens realizadas no local de implantação da EEAB Jaguari, sendo obtido que a rocha do local (Gnaiss) pertence ao Tipo 1, rochas ígneas e metamórficas.

A partir do tipo de rocha e considerando o grau de alteração do maciço, Cabral e Antunes apresentam a tensão de ruptura na ponta e a tensão de compressão simples admissível na rocha através de tabelas. Para o valor apresentado é adotado um fator de segurança mínimo de 3,0.

A metodologia recomenda que a máxima tensão admissível do contato entre o concreto da base da fundação e a rocha deve ser inferior a  $0,40 f_{ck}$ . O  $f_{ck}$  de projeto exigido para as estacas é de 30MPa, no entanto a NBR-6122 (2010) estabelece que o  $f_{ck}$  máximo a ser utilizado nos cálculos do projeto de estacas moldadas in loco é de 20MPa, sendo utilizado tal valor para limitar a tensão admissível, ou seja, tensão máxima de 8MPa.

A metodologia proposta por Cabral e Antunes prevê que o atrito lateral representa de 2,5% a 3,5% da resistência de ponta da fundação. Devido às características executivas, a metodologia recomenda ainda que a tensão do atrito lateral seja menor que  $f_{ck}/15$ ; ou seja, para o  $f_{ck}$  de cálculo de 20 MPa, a tensão admissível máxima do contato entre concreto e a rocha no atrito lateral é de 1,3 MPa.

Com relação ao comprimento mínimo de embutimento ( $L_e$ ) Cabral e Antunes recomendam a adoção de um fator de multiplicação do diâmetro da fundação ( $D$ ) que leva em conta a qualidade da rocha de apoio e o nível de confiança da limpeza da ponta, que varia entre  $0,5 D$  e  $4,0 D$ .

Considerando o poço mais carregado, com carga de trabalho de 1771 tf, foi obtido como resultado um comprimento total de embutimento da estaca em rocha de 9,0 metros, sendo 4,0 metros de embutimento em rocha sã.

Na definição dos comprimentos, foi adotado, conforme a prática atual de fundações e recomendação do método de dimensionamento utilizado, o comprimento mínimo de embutimento em maciço rochoso de elevada competência (rocha sã) de 4,0m.

## 7 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma descrição da fundação offshore em rocha com estacas de grande diâmetro realizada na estrutura de captação da EEAB Jaguari, na obra de Interligação entre as Represas Jaguari Atibainha.

Para servir de base para os poços de captação, a fundação foi feita através de estações de 4,20 m de diâmetro e pinos com diâmetro de 1,80 m. Cada um dos dois pilares foi sustentado por 1 bloco com 4 estacas, estas estacas têm diâmetro de 1,20 m no trecho em solo e de 1,00 m no trecho em rocha.

O projeto e execução dessa fundação apresentou características ímpares, como a dificuldade na logística de execução dentro da represa, com o posicionamento das camisas, gaiolas de armação e da própria concretagem, que teve que ser realizada em etapas.

Com as soluções inovadoras, empenho na elaboração do projeto e na execução da obra, o empreendimento pode ser entregue dentro do prazo estipulado, garantindo a segurança hídrica da região metropolitana de São Paulo.

## **8 AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi desenvolvido a partir dos dados de projeto executivo e acompanhamento técnico de obra. Os autores agradecem à SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo e ao Consórcio Bacias Paraíba do Sul e Cantareira pela disponibilização dos dados para publicação.

## **9 ENTIDADES PARTICIPANTES**

Empreendedor: SABESP - Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo

Construtor: Consórcio BPC (Serveng Engenharia, Engeform Construções e Comércio Ltda e PBConstruções)

## **10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**CABRAL, D. A.; ANTUNES, W. R.** Sugestão para Determinação da Capacidade de Carga de Estacas Escavadas Embutidas em Rocha. In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, n. 4, 2000, São Paulo. Anais... São Paulo: ABEF-ABMF, 2000, v. 2, p. 169-173.

**LEITE, L. E. D.; BEZERRA, R. L.; MARQUES, A. G.** Avaliação da Capacidade de Carga à Tração das Estacas Rotativas Injetadas. COBRAMSEG – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 1998.

**HACHICH, W.** et al. FUNDAÇÕES Teoria e Prática. Editora PINI, 1ª Edição, 1996.

GEOCOMPANY (2016) Dados de Projeto e Acompanhamento Técnico de Obra.