

## ESTACAS BARRETE EMBUTIDAS EM ROCHA ESCAVADAS COM HIDROFRESA

Sérgio C. Paraíso – P.E.  
Geomec Engenheiros Consultores S/C Ltda.  
sergioparaiso@geomec.com.br

Cláudia Maria Cunha da Costa – D.T.  
Geomec Engenheiros Consultores S/C Ltda.  
claudia@geomec.com.br

Danielle de P. Alvim – Projetos e Consultoria  
Geomec Engenheiros Consultores S/C Ltda.  
danielle@geomec.com.br



### RESUMO

Este artigo apresenta um caso de obra realizado em Salvador - BA cuja solução de fundações contemplou estacas Barrete escavadas em solo e embutidas em rocha. O equipamento Hidrofresa é avaliado quanto ao desempenho na escavação em rocha. O Controle de Qualidade foi materializado observando as especificações do projeto de fundações e os Ensaios de Carregamento Estático e Dinâmico bem como o monitoramento dos recalques.

### ABSTRACT

This paper presents a job carried out in the city of Salvador - BA whose solution for foundations was comprised of using Barrete piles excavated in soil and socketed into rock. The Hydromill equipment is evaluated as to its behavior in drilling rock. The Quality Control Plan was implemented by observing the foundation design specifications performing Static and Dynamic Load Tests as well as settlement control.

### INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a demanda por tecnologias mais eficientes e produtivas tem impulsionado avanços na Engenharia de Fundações no Brasil. Busca-se resolver problemas, minimizar patologias, otimizar processos e transpor limites anteriormente intransponíveis pelos processos existentes.

Neste contexto, em meados de 2009 chega ao Brasil o primeiro equipamento de Hidrofresa. Este equipamento é constituído de uma diafragmadora hidráulica de grande porte com capacidade de executar escavações em solos resistentes, solos residuais e rochas alteradas. A Hidrofresa é composta por uma estrutura de aço rígida, dois motores hidráulicos instalados na parte inferior que giram alinhados horizontalmente e em direções opostas e bomba de alta capacidade de sucção. Solos e rochas são triturados por rodas e correntes de corte equipados com Bits de Carboneto de Tungstênio, ficam em suspensão no fluido estabilizante, são aspirados pela bomba de sucção e conduzidos à central de desarenação onde ocorre a separação entre a parte rochosa e o solo conforme a granulometria.



Figura 1. Hidrofresa e Central de Desarenação

O presente trabalho objetiva avaliação técnica da execução e qualidade das fundações de uma obra predial de grande porte projetada e executada em estacas tipo Barrete com escavações em solo e rocha de Gnaise. Será dada ênfase ao processo de escavação de estacas Barrete em rocha com utilização de Hidrofresa.

As avaliações técnicas consubstanciam-se de gráficos e planilhas com demonstrativos do desempenho de execução das fundações e apresenta resultados dos ensaios estáticos e dinâmicos e monitoramento de recalques.

## DESCRIÇÃO DA OBRA

A obra em questão caracteriza-se por Torre comercial de 30 pavimentos com 107 metros de altura e mais de 92.000 m<sup>2</sup> de área construída. A estrutura do edifício é aporticada em concreto armado com vedações em alvenaria. As cargas transmitidas às fundações pelos pilares da Torre são da ordem de 110.000 toneladas.

As fundações constituem-se de estacas escavadas com fluido estabilizante tipo Barrete escavadas em solo com Diafragmaadora acrescidas de escavação em rocha, de mesmo perímetro da escavação em solo, executada com equipamento de Hidrofresa.

Para as escavações em solo utilizou-se Clam Shell (Diafragmaadora) hidráulico com força de mordida de 120 tf suspensa por haste especial tipo “Kelly Bar” acoplado a guindaste Casagrande modelo C400 com guincho de capacidade de 22 tf.

Para escavação em rocha utilizou-se Hidrofresa Casagrande modelo FD60 acoplado a guindaste Casagrande modelo C850MG com guincho de capacidade de 35 tf.

## GEOTECNIA – GEOLOGIA LOCAL

O subsolo local de implantação da obra caracteriza-se por camada superficial de solo arenoso com presença de pedregulhos, provável aterro, de baixa resistência geomecânica seguido por areia siltosa e alteração de rocha silto arenosa (solo residual de Gnaise) de resistência SPT crescente com a profundidade.

Verifica-se ainda que em média a 10,00 metros de profundidade a partir da cota de implantação do empreendimento encontra-se Rocha Granulítica de Gnaise com características erráticas de fragmentação, recuperação e RQD.

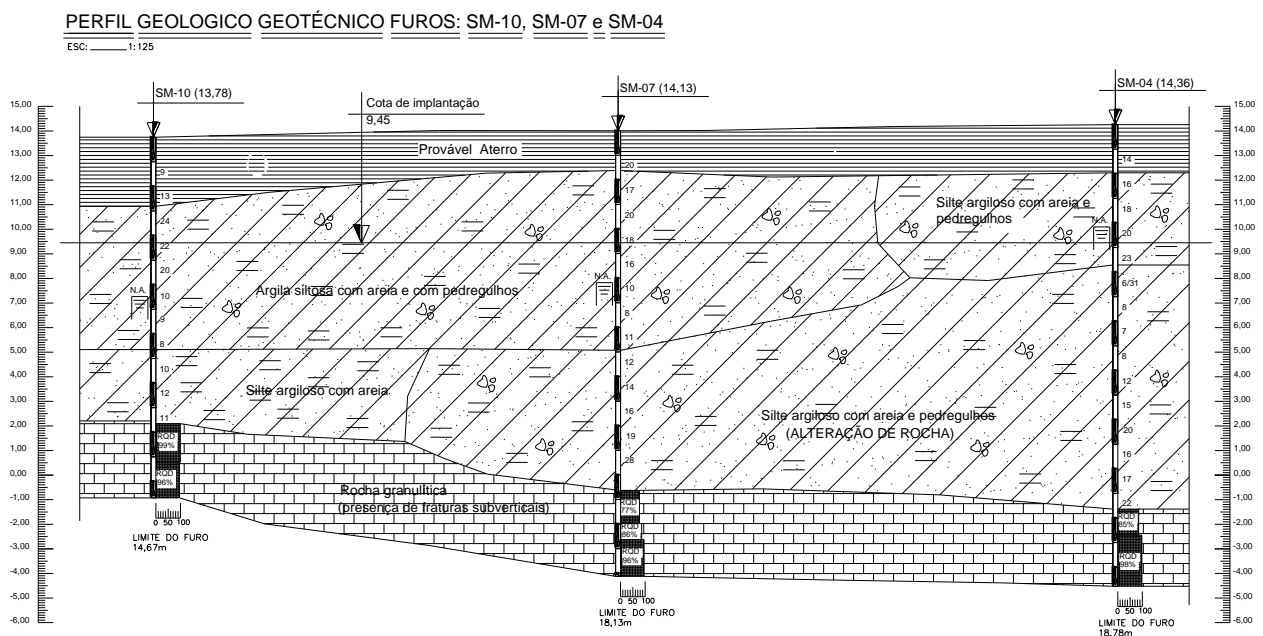


Figura 2. Perfil Geológico Geotécnico

A investigação geotécnica de subsolo foi realizada através de Sondagens a Percussão (SPT – Standard Penetration Test), Sondagens Mistas com caracterização de SPT e RQD (Rock Quality Designation), Ensaios Geofísicos de Eletroresistividade e GPR (Ground Penetrating Radar) e ensaios de resistência à compressão de testemunhos de rocha (Tabela 1). O objetivo desses ensaios é determinar o topo rochoso e a resistência

mecânica da rocha, auxiliando na tomada de decisão. A figura abaixo mostra o mapeamento do topo rochoso do empreendimento (Referência: 9,45 cota implantação de projeto = 0,00 curvas de nível de isoprofundidade).

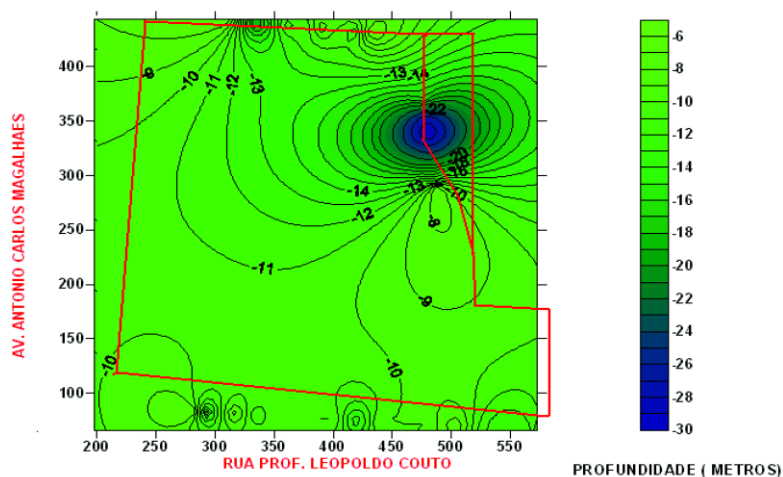


Figura 3. Curvas de nível de isoprofundidade do topo rochoso (Ensaio Geofísico)

Tabela 1. Resistência mecânica dos testemunhos de rocha

RESISTÊNCIA MECÂNICA TESTEMUNHOS DE ROCHA					
Identificação (CP)	Cota de boca de furo	Cota extração testemunho	R.Q.D. (%)	Recuperação (%)	(UCS) Resistência à Compressão (Kgf/cm <sup>2</sup> )
SM-04	14,36	-1,21 a -2,77	21	85	298
		-2,77 a -4,42	59	98	466
SM-06	14,03	0,95 a -0,73	80	95	379
		-0,73 a -2,15	76	100	371
SM-07	14,13	-0,50 a -1,85	21	77	197
		-1,85 a -2,50	25	86	305
		-2,50 a -4,00	40	96	273
SM-09	14,08	1,42 a -0,12	61	83	434
		-0,12 a -1,82	70	100	880
SM-10	13,78	2,13 a 0,56	90	99	758
		0,56 a -0,89	73	96	832

UCS: Unconfined Compressive Strength

## PROJETO DE FUNDAÇÕES

A solução de fundações considera estacas escavadas com fluido estabilizante tipo Barrete com dimensões de 315x100 cm e 315x80 cm, sendo que a primeira foi projetada para carga de trabalho de 1.575 tf e a segunda, para cargas de trabalho de 875 tf, 1.000 tf e 1.250 tf. As profundidades variam entre 12,50 e 16,50 metros a partir da cota de implantação da obra, ficando embutidas em rocha.

Adotou-se por conceito de projeto que as estacas resistiriam à carga última na interface estaca-rocha apenas por aderência (atrito lateral) na rocha, desprezando-se o atrito no trecho de solo. Para cálculo do coeficiente de aderência admissível ( $\tau_{al}$ ) utilizou-se, conforme Canadian Foundation Engineering Manual – 4<sup>th</sup> Edition (2006) e Velloso (1977):

$$\tau_{al} = 0,05 fck, \text{ sendo } fck = 25 \text{ MPa} \quad (1)$$

Desta forma calculou-se embutimento mínimo em rocha de 2,50 metros (estacas para 875 e 1000 tf), 2,80 metros (estacas para 1250 tf) e 3,30 metros (estacas para 1575 tf).

Posteriormente, foi também fixado em projeto critério de “nega de escavação em rocha”. De acordo com este critério, uma vez atingido embutimento mínimo em rocha, a escavação poderia ser considerada concluída caso a velocidade de avanço fosse inferior a 45 centímetros/hora.

Observa-se ainda que a capacidade de carga de apoio em rocha não foi considerada embora exista.

As armações foram dimensionadas ao longo de toda profundidade da estaca, admitindo-se uma diferença entre a profundidade da estaca e da armação de até 1,00 metro.

Especificação de concreto  $f_{ck} \geq 25$  MPa, slump 22 +/- 3cm e consumo de cimento não inferior a 400Kg/m<sup>3</sup>.

A figura abaixo apresenta o arranjo e locação das estacas Barrete.

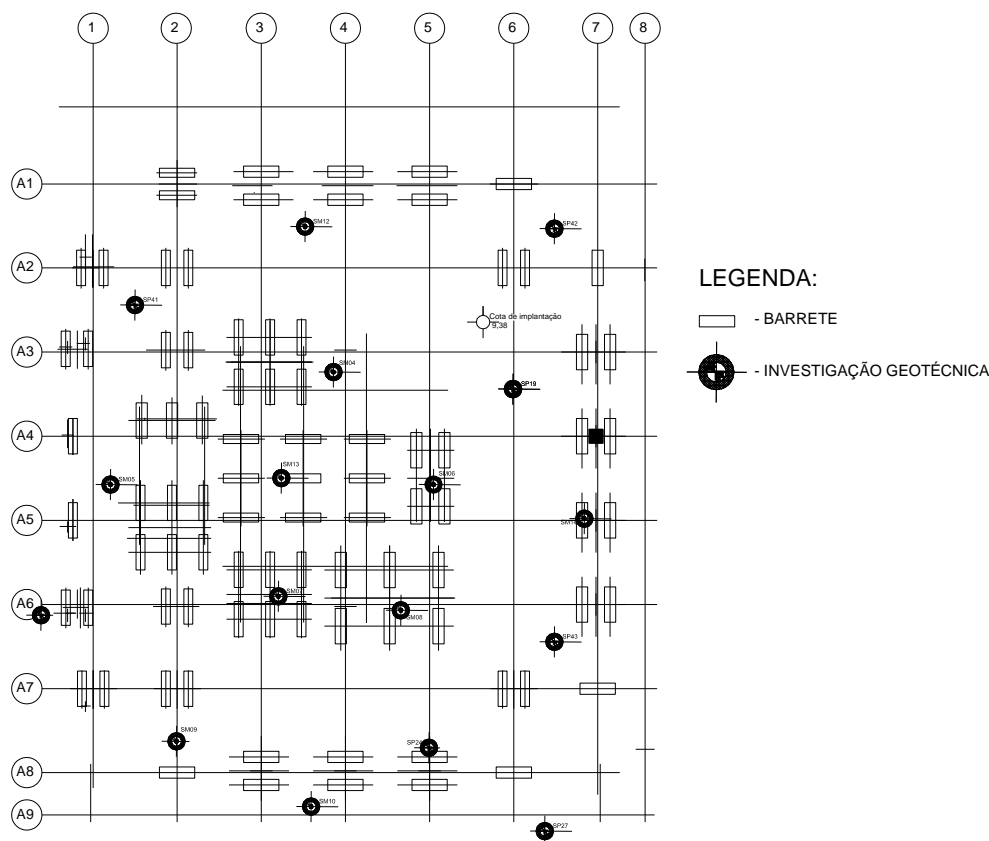


Figura 4. Planta de locação dos Barretes

## METODOLOGIA DE EXECUÇÃO

A execução das estacas tipo Barrete embutidas em rocha observou a seguinte metodologia executiva:

1. Escavação para introdução da camisa guia metálica ou de concreto armado;
2. Posicionamento da camisa guia;
3. Escavação do trecho em solo utilizando clamshell hidráulico;
4. Escavação do trecho em rocha com Hidrofresa (circulação reversa);
5. Limpeza no interior da escavação em rocha com o sistema air lift em fase final da escavação e anterior à concretagem
6. Introdução da armadura;
7. Concretagem submersa da estaca;
8. Estaca concluída.

## CONTROLE DA EXECUÇÃO

O controle da execução das fundações e os procedimentos de gestão foram materializados em fichas individuais de execução constituídas de: numeração da estaca, nome da obra e do construtor, dimensão do painel, data de execução, nome do projetista, cotas de topo da mureta guia, ponta do Clamshell e da Hidrofresa, comprimentos totais de perfuração e armadura, horários de início e término de perfuração com Clamshell e

Hidrofresa, velocidade e profundidade de avanço em rocha, períodos de limpeza da lama, colocação de armadura, características do fluido estabilizante conforme ensaios padrão, rastreamento da concretagem inclusive sobreconsumos, etc.

Os gráficos a seguir mostram o embutimento em rocha referente a cada Barrete e a velocidade de avanço juntamente com os critérios de projeto:

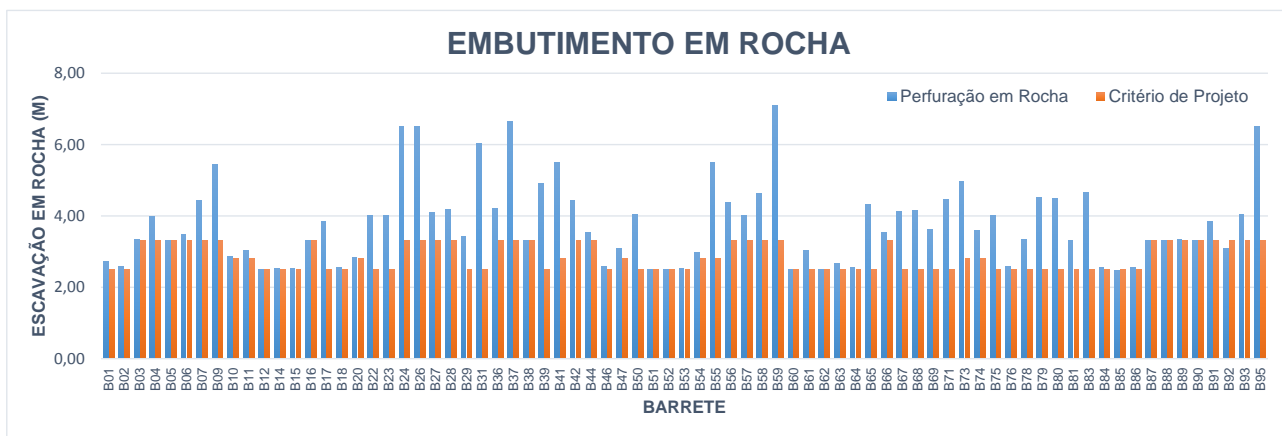


Figura 5. Gráfico Embutimento em Rocha - estacas Barrete

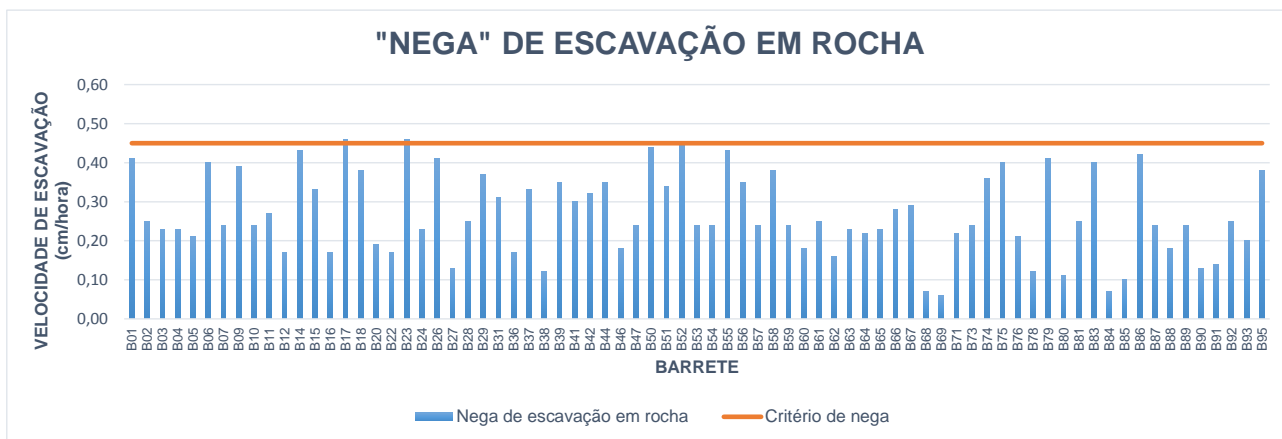


Figura 6. Gráfico “Nega” de Escavação em Rocha - estacas Barrete

Verifica-se que todas as Barretes atingiram embutimento em rocha superior ao especificado em projeto e velocidade de perfuração final inferior ao critério de “nega,” avanço em rocha (velocidade de avanço  $\leq 45$ cm/hora). Para que o segundo critério fosse atendido simultaneamente algumas estacas resultaram com embutimento consideravelmente superior ao critério de projeto.

A figura 7 caracteriza graficamente o critério de simultaneidade para embutimento e avanço em rocha para uma Barrete de 315x100 centímetros.

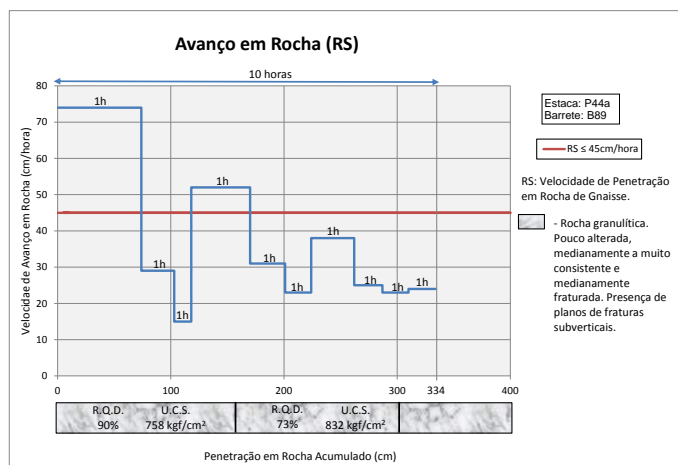


Figura 7. Gráfico típico - Embutimento e avanço em rocha

Verificou-se, em função do sobreconsumo de concreto, variação no perímetro real das estacas Barrete. Utilizando-se o volume de concreto lançado em cada caminhão e a profundidade medida antes e no término do lançamento, informações constantes no boletim de acompanhamento da execução, calculou-se o perímetro equivalente médio (Ne) de cada Barrete. A relação de Ne/Nt é apresentada conforme o gráfico abaixo. Observa-se que, na maioria dos casos, o perímetro real é maior que o perímetro teórico considerado no projeto.

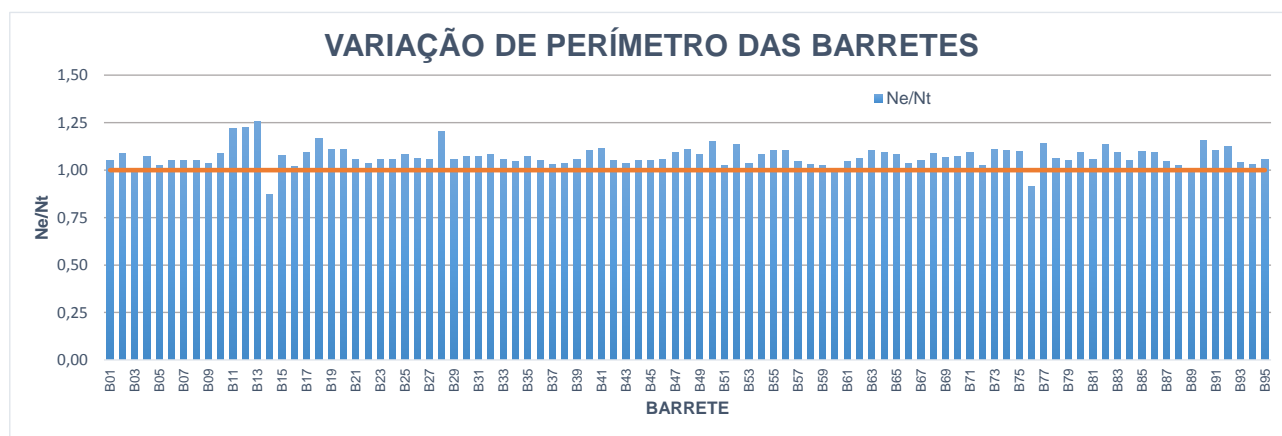


Figura 8. Gráfico Variação de perímetro estacas Barrete

Sobreconsumo médio de concreto de 14,44%.

## CONTROLE DA QUALIDADE

Atendendo ao item 9 – Desempenho das fundações da norma ABNT NBR 6122:2010 realizou-se Provas de Carga Estática (PCE), Ensaios de Carregamento Dinâmico (ECD) e Monitoramento de Recalques.

### Prova de Carga Estática (PCE)

A PCE foi realizada no dia 08/03/12. Para realização da PCE executou-se uma estaca piloto na dimensão de 315x80 cm, com 11,26 metros escavados em solo e 1,50 metros de embutimento em rocha de forma a transmitir para a rocha tensões de aderência da ordem de 101,2 tf/m<sup>2</sup> correspondente a 1.200 tf desconsiderando-se a aderência do trecho em solo.

Como se pretendia verificar apenas a aderência da estaca em rocha instalou-se bloco de isopor de espessura de 97 cm na base da estaca como garantia da não participação da carga de ponta durante o ensaio.

A estrutura de reação utilizada para o ensaio compreendeu oito tirantes de 12 cordoalhas Ø 5/8" inclinados de 15° com a vertical embutidos no maciço rochoso e dimensionados para carga de trabalho de 150tf. A figura abaixo mostra montagem da PCE.

Instalou-se par de "Telltales" na profundidade de início e fim de embutimento em rocha, entretanto por razões executivas não houve a possibilidade de leitura das deformações elásticas.



Figura 9. Montagem PCE



Utilizou-se na PCE metodologia de carregamento lento. O ciclo de carregamento foi realizado em 10 estágios de incrementos de carga da ordem de 120 tf, que corresponde a duas vezes a carga de trabalho da estaca. A carga referente a cada estágio foi mantida até a estabilização dos deslocamentos ou pelo período mínimo de 30 minutos. A carga máxima de ensaio foi mantida por 12 horas e, a seguir procedeu-se o descarregamento que foi realizado em 5 estágios da ordem de 240 tf cada. A carga constante em cada fase de descarregamento foi mantida por 15 minutos.

Segue abaixo curva carga x recalque onde se pode verificar o recalque total da estaca, recalque elástico e residual.

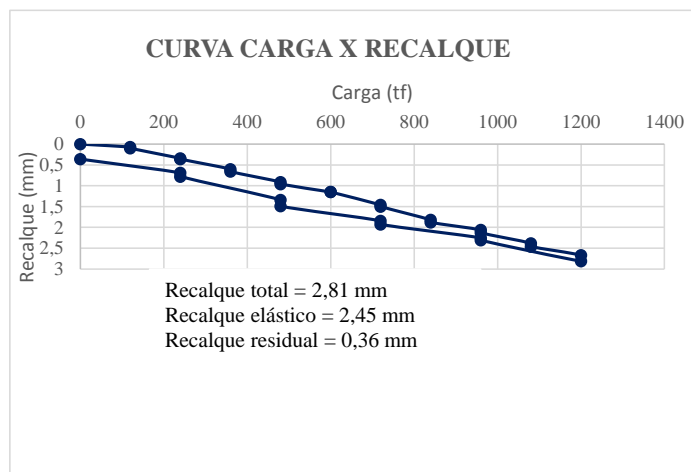


Figura 10. PCE Carga x recalque

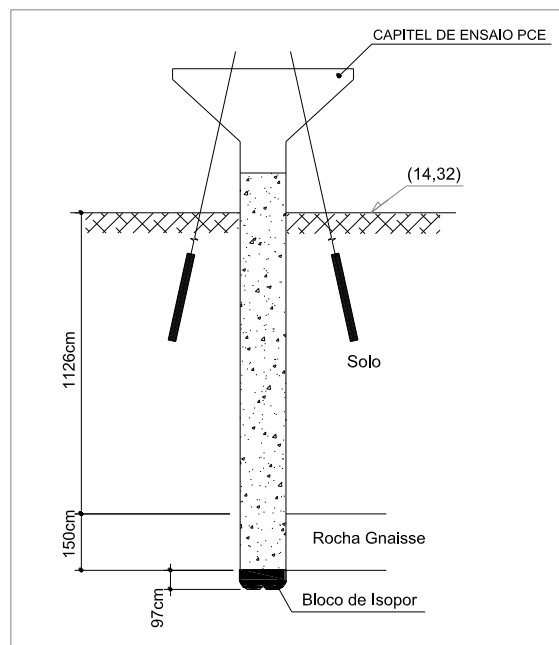


Figura 11. Condições de ensaio PCE

### Ensaio de Carregamento Dinâmico (ECD)

Quinze dias após o final da PCE realizou-se o ECD. Este ensaio foi materializado na mesma estaca piloto descrita no item anterior porém, para o ECD a estaca foi considerada com 10,06 m, sendo deste 1,50 m em rocha. O objetivo da instrumentação consiste na avaliação da capacidade de carga mobilizada pela estaca a cada golpe de energia crescente do martelo hidráulico de 20.000 Kg (MHAP 20) em queda livre atuando sobre bloco de concreto armado executado especificamente para ensaio. Os dados da instrumentação foram aquisitados por sistema PDA (Pile Driving Analyser) – Modelo PAX.

Acrescenta-se ainda que o bloco de ensaio em concreto armado observa rigorosamente as mesmas dimensões do Barrete ensaiado e a relação de Impedância bloco – estaca.



Figura 12. Martelo MHAP20 e Sistema de Aquisição de dados PDA – Modelo PAX

A seguir apresentam-se gráficos demonstrativos da curva carga x deslocamento e resistência mobilizada por atrito ao longo da profundidade para o ECD. Observa-se com importância que a resistência de ponta não foi ativada.

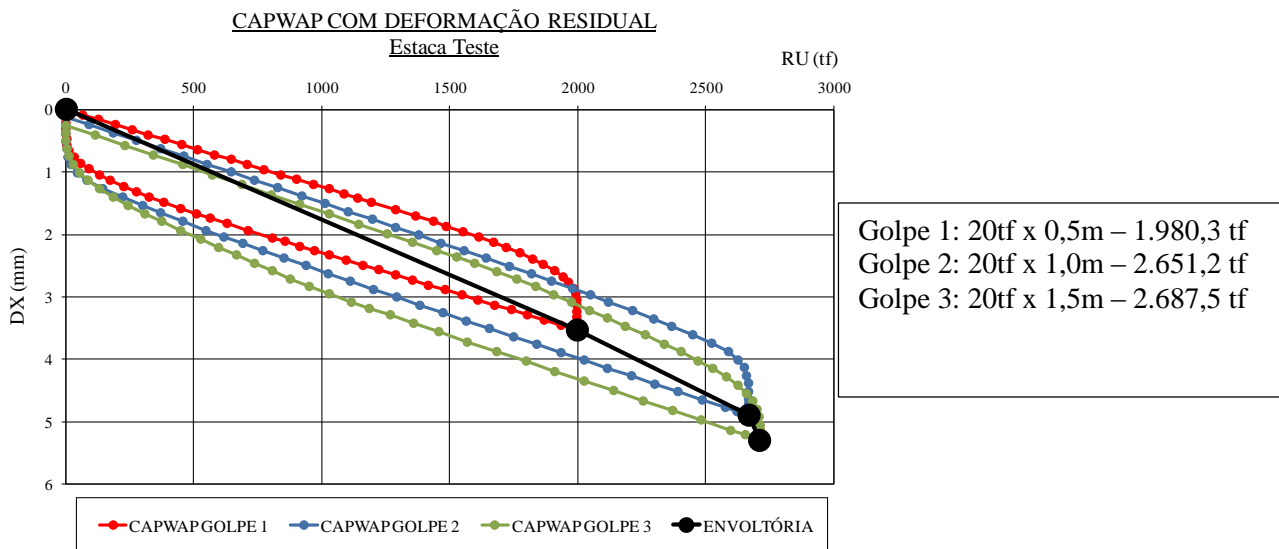


Figura 13. Gráfico Carga x Deslocamento

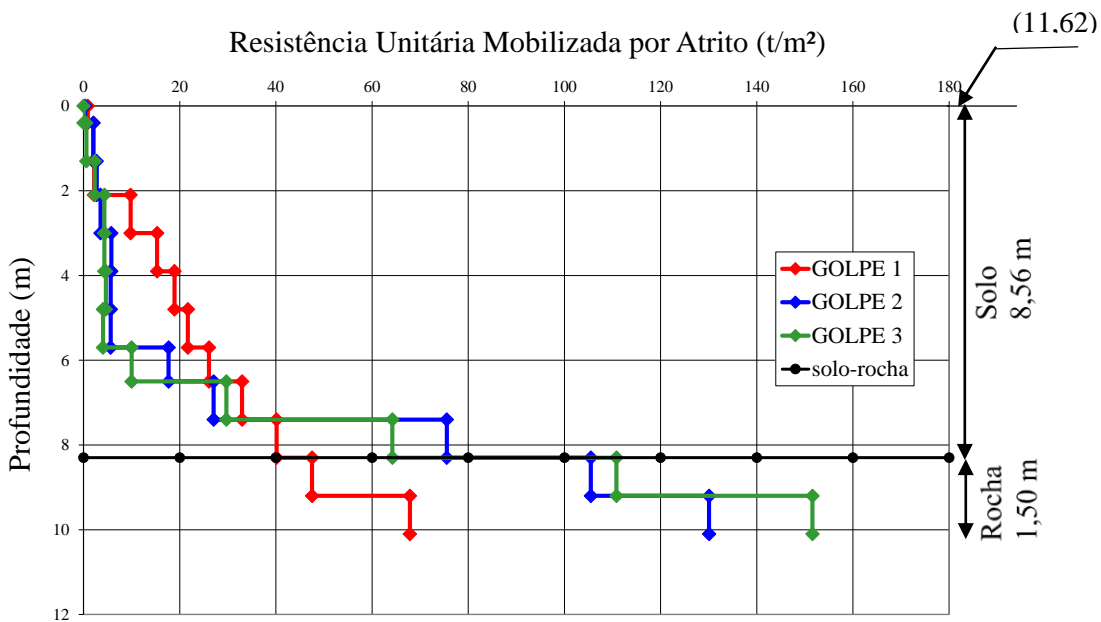


Figura 14. Resistência mobilizada por atrito x profundidade

Com base na figura 14 acima é possível separar a aderência mobilizada no manto de solo e a aderência em rocha. A tabela 2 abaixo demonstra a aderência ativada a cada golpe do ECD.

Tabela 2. Aderência média ativada

<b>ADERÊNCIA ATIVADA - ECD</b>		
GOLPE	ADERÊNCIA MÉDIA SOLO-ROCHA (tf/m <sup>2</sup> )	ADERÊNCIA MÉDIA ROCHA (tf/m <sup>2</sup> )
1	24,90	57,70
2	33,40	117,80
3	33,80	131,21
Aderência adotada em projeto $\tau_{al} \leq 125 \text{ tf/m}^2$		



## Monitoramento de Recalques

Os recalques de fundação foram medidos na estrutura em todos os pilares da Torre. Foram realizadas quatro leituras nos dias 09/11/2013 (21ª laje concretada), 14/12/2013 (22ª laje concretada), 22/03/2014 (Reservatório concretado) e 17/05/2014 (estrutura concluída).

Para interpretação dos resultados arbitrou-se direções “X” e “Y” na planta do edifício, sendo que o eixo “X” é paralelo aos eixos A1 a A9 e o eixo “Y” é paralelo aos eixos 1 a 8 (ver figura 4).

A seguir apresenta-se o traçado das retas que limitam os recalques diferenciais específicos nas direções “X” e “Y” para a 4ª leitura realizada e gráfico correspondente às curvas Tempo x recalque e pilares específicos.

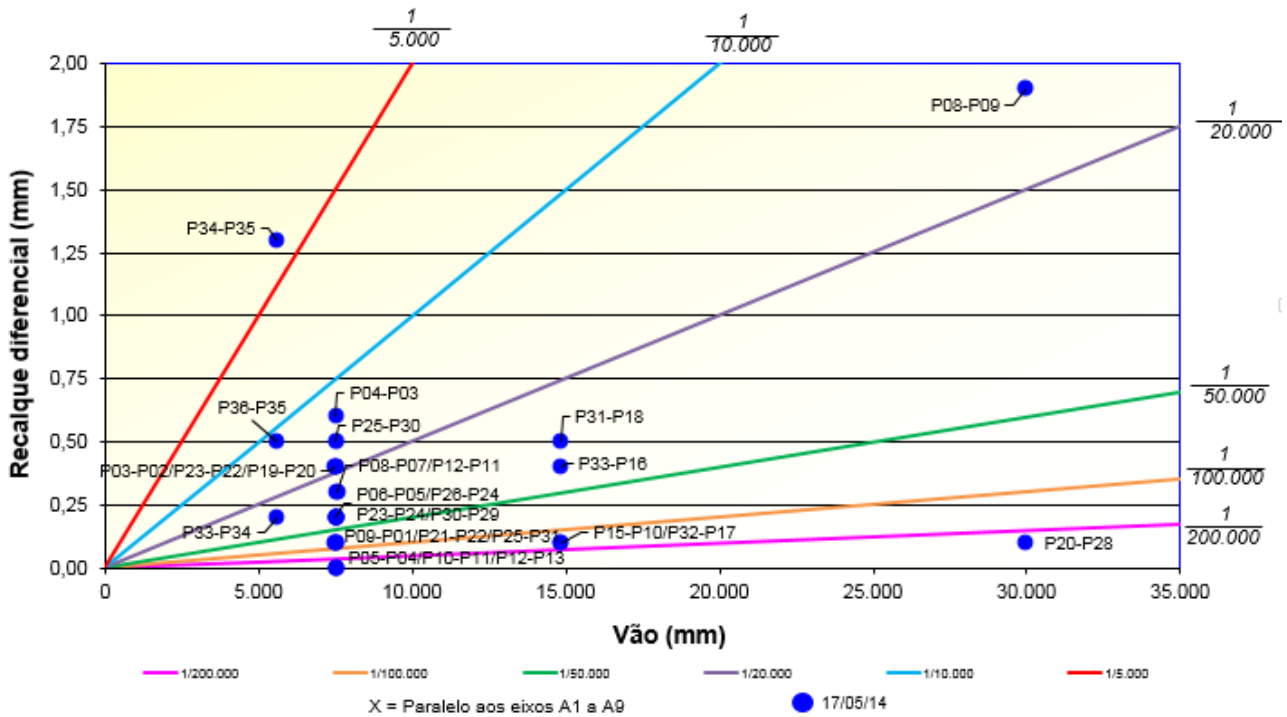


Figura 14. Recalque diferencial na direção “X”

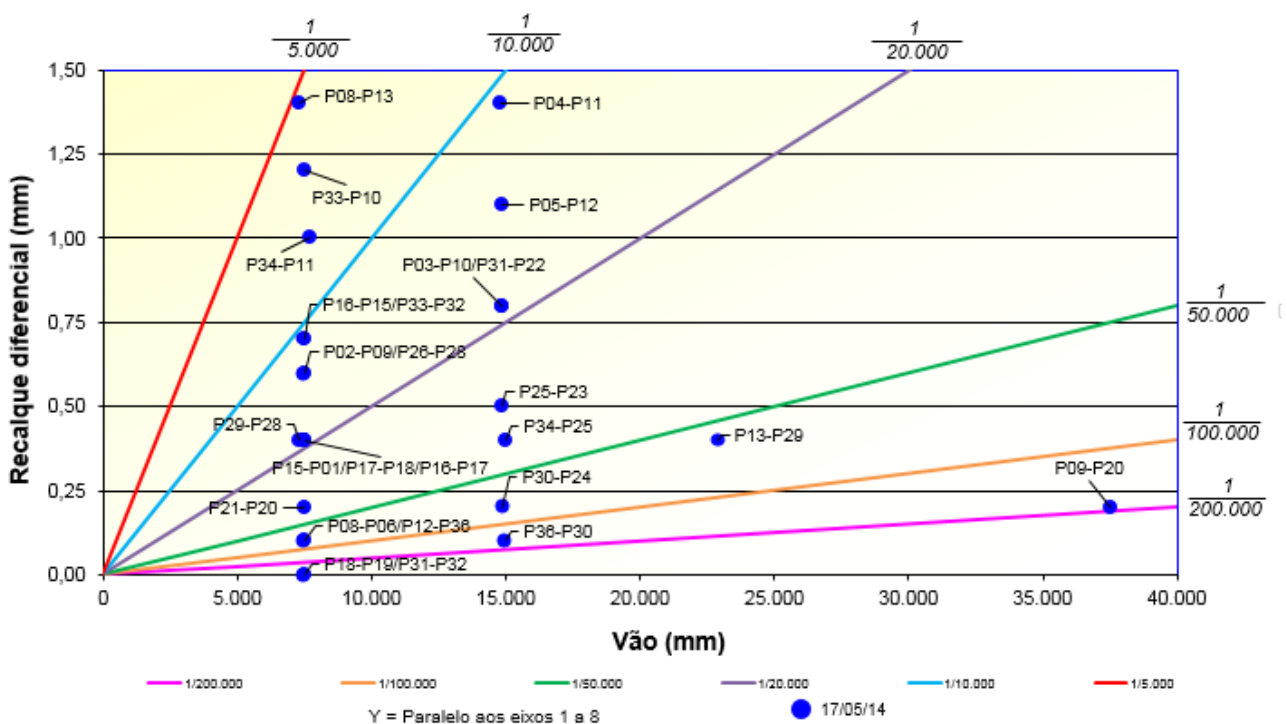


Figura 15. Recalque diferencial na direção “Y”

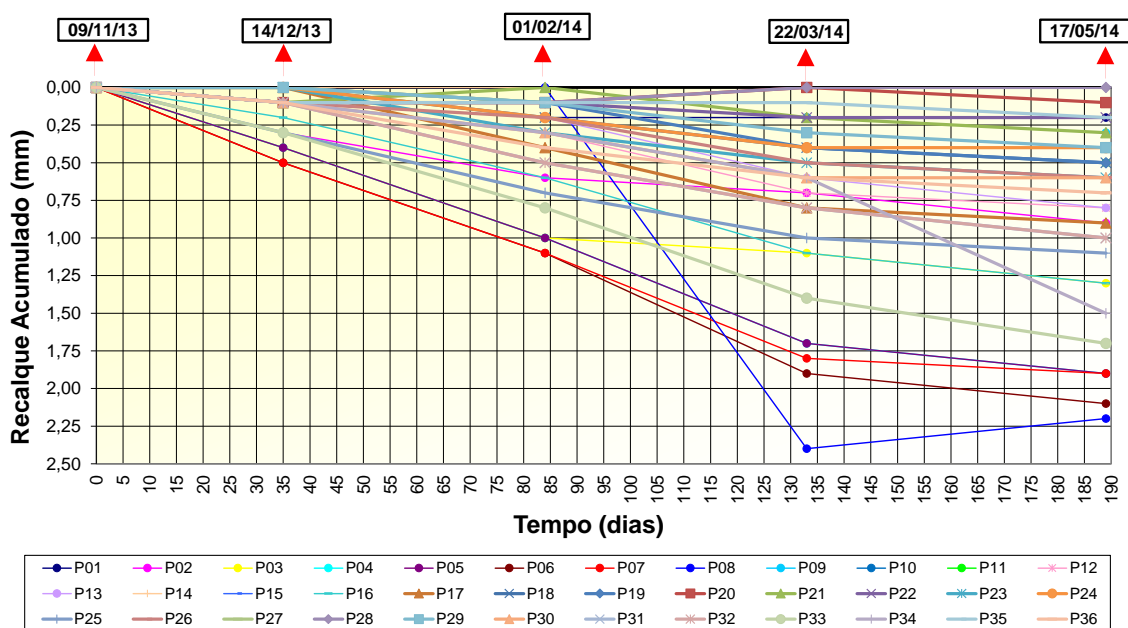


Figura 16. Tempo x Recalque

## CONCLUSÕES

O caso de obra apresentado neste trabalho caracteriza peculiaridades que o diferenciam da rotina de solução de fundações em geral.

A manifestação geológica-geotécnica local com pequena espessura de solo sobrejacente a metamorfismos de rocha de Gnaiss são, nível d'água elevado e necessidade de absorção de cargas da superestrutura de elevadíssima magnitude, condicionaram a solução de fundações à estacas Barrete embutidas em rocha e escavadas com Hidrofresa.

Os ensaios UCS (resistência à compressão simples não confinada) realizados nos testemunhos de rocha gnáissica comprovaram o desempenho e capacidade de escavação do sistema Hidrofresa.

Os ensaios ECD e PCE realizados comprovaram a elevada aderência rocha-barrete, apresentando comportamento elástico linear e reserva de capacidade de carga por atrito lateral a ser ativada.

O controle de recalques realizado durante 7 meses com a evolução do alteamento da superestrutura revela valores de recalques absolutos de baixíssima magnitude e diferenciais específicos entre 1/5000 e 1/200000, plenamente satisfatórios.

Conclui-se portanto, que a solução empreendida através de estacas Barrete embutidas em rocha utilizando fluido estabilizante confirmou as expectativas de projeto e, no caso em questão, é solução inexorável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CONCRETA TECNOLOGIA EM ENGENHARIA, Relatório CC1358/11, Ensaio de Resistência à Compressão em testemunho de rocha, Salvador, 2011, 3 p.
- [2] CANADIAN FOUNDATION ENGINEERING MANUAL – 4<sup>TH</sup> Edition, Canadian Geotechnical Society, Richmond, 2006, 488p.
- [3] VELLOSO, P. P. C. Fundações – Aspectos geotécnicos. PUC. Rio de Janeiro. 1977.
- [4] GEOMEC ENGENHEIROS CONSULTORES, Projeto de Fundações e Controle da Execução.
- [5] COSTA FORTUNA ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, Relatório PC08/2012, Prova de Carga Estática, Cotia, 2012, 31 p.
- [6] GEOMEC ENGENHEIROS CONSULTORES, Relatório RL27.171/2012, ECD Ensaio de Carregamento Dinâmico, Belo Horizonte, 2012, 46 p.