

Análise Comparativa de Capacidade de Carga de Estações em Rocha pelo Método Cabral-Antunes e Ensaios ECD nos Contornos de Caraguatatuba e de São Sebastião

Bruno Barreto Rose

Engenheiro Civil, Engecorps Engenharia S.A., Barueri, Brasil, bruno.rose@engecorps.com.br

Ary Paulo Rodrigues

Engenheiro Civil, Engecorps Engenharia S.A., Barueri, Brasil, ary@engecorps.com.br

Eduarda Stephanie de Mello

Engenheira Civil, EGTC Infra S.A., São Paulo, Brasil, eduarda.mello@egtc.com.br

RESUMO: No âmbito das estacas executadas em rocha, é de amplo conhecimento e utilização no Brasil o método Cabral-Antunes para definição da capacidade de carga de estacas. O citado método foi empregado nos projetos de estaqueamento de duas obras de arte especiais dos Contornos de Caraguatatuba e de São Sebastião, importante obra na região do Litoral Norte de São Paulo, nas cidades de Caraguatatuba e São Sebastião, e parte integrante do complexo viário ampliado da Rodovia dos Tamoios. Como forma de controle de qualidade e de desempenho das estacas escavadas de grande diâmetro (elementos com diâmetro de 1,20m) que compõem as fundações dos viadutos e em atendimento à norma NBR 6122/2022, foram realizados ensaios de carregamento dinâmico em quinze estacas, além de ensaios de resistência à compressão do maciço rochoso extraído durante as escavações dos elementos. O presente artigo demonstra, a partir dos resultados destes ensaios, que as capacidades de carga de ruptura estimadas com base no método Cabral-Antunes superam os valores de cargas de ruptura levantados através dos ensaios ECD, enquanto as cargas admissíveis extraídas pelo método (com fator de segurança global igual a 3) e pelos ensaios (com fator de segurança global igual a 2) apresentam-se com grande aderência. Ao final desta comparação, apresenta-se, ainda, valores do parâmetro β do método calibrados para os resultados dos ensaios de carregamento dinâmico visando a sua utilização no dimensionamento de estacas executadas em condições semelhantes e em maciços de mesmas características (gnaises).

PALAVRAS-CHAVE: Estacas em rocha, ensaios ECD.

ABSTRACT: In the context of rock piles, the Cabral-Antunes method for defining the load capacity of piles is widely known and used in Brazil. The aforementioned method was used in the piling projects for two viaducts on the Contornos de Caraguatatuba e de São Sebastião, an important project in the North Coast region of São Paulo, in the cities of Caraguatatuba and São Sebastião, and an integral part of the expanded road complex of Rodovia dos Tamoios. As a form of quality control and performance of the large diameter excavated piles (elements with a diameter of 1.20m) that make up the foundations of the viaducts and in compliance with the NBR 6122/2022 standard, dynamic loading tests were carried out on fifteen piles, in addition to compressive strength tests of the rock mass extracted during the excavation of the elements. This article demonstrates, based on the results of these tests, that the rupture load capacities estimated based on the Cabral-Antunes method exceed the rupture load values obtained through the ECD tests, while the allowable loads extracted by the method (with global safety factor equal to 3) and from tests (with global safety factor equal to 2) present great adherence. At the end of this comparison, values of the parameter β of the method calibrated to the results of dynamic loading tests are also presented to their use in the design of piles built under similar conditions and in rocks with the same characteristics (gneiss).

KEYWORDS: Rock piles, dynamic load tests.

1 INTRODUÇÃO

Para melhoria das condições de tráfego na região do Litoral Norte de São Paulo, foi concebido um complexo viário nas cidades de Caraguatatuba e São Sebastião, conhecido como Contornos de Caraguatatuba e de São Sebastião, localizado junto à Rodovia dos Tamoios, importante rodovia do estado de São Paulo.

Dentro do sistema de vias, túneis e viadutos que compõem os Contornos, destacam-se duas obras de arte especiais, as OAEs 403 e 407. A caracterização do local de implantação dessas obras foi realizada através de sondagens mistas que indicaram subsolo composto por espessas camadas de argila marinha sobrepostas a solos residuais e a embasamento de gnaise. As condições geotécnicas locais, com lençol freático elevado e solos competentes em espessura reduzida, resultaram na adoção de estacas escavadas com embutimento em rocha como solução de fundação das obras de arte especiais 403 e 407.

Visando o controle de qualidade e a verificação de desempenho da infraestrutura das obras, foram realizados, na OAE 403, 15 (quinze) ensaios de carregamento dinâmico (ECD) nas estacas, valor adequado ao atendimento das indicações dos itens 9.2.2.1 e 9.2.2.3 da NBR 6122/2022 para um total de 128 estacas componentes da OAE.

A partir desse amplo conjunto de ensaios, verificou-se a possibilidade de se comparar os resultados reais de capacidade de carga das estacas com os valores estimados a partir da metodologia de cálculo empregada no projeto (método Cabral-Antunes) e de se calibrar o parâmetro β característico do método para a aplicação em maciços de gnaise.

2 CARACTERIZAÇÃO DA OBRA

A OAE 403, objeto do presente artigo, encontra-se localizada entre as estacas 4159+12,879 e 4211+15,351 da pista direita dos Contornos de Caraguatatuba e de São Sebastião e entre as estacas 1+16,733 e 5+11,958 da Alça de Maresias. Possui extensão total de aproximadamente 1200m, divididos em 45 tabuleiros de grelhas de vigas pré-moldadas protendidas com vãos de 18m, 20m, 25m, 28m, 30m e 34m. A seção transversal destes tabuleiros possui largura variando entre 9,0m e 13,7m. A Figura 1 a seguir apresenta a OAE 403 em planta.

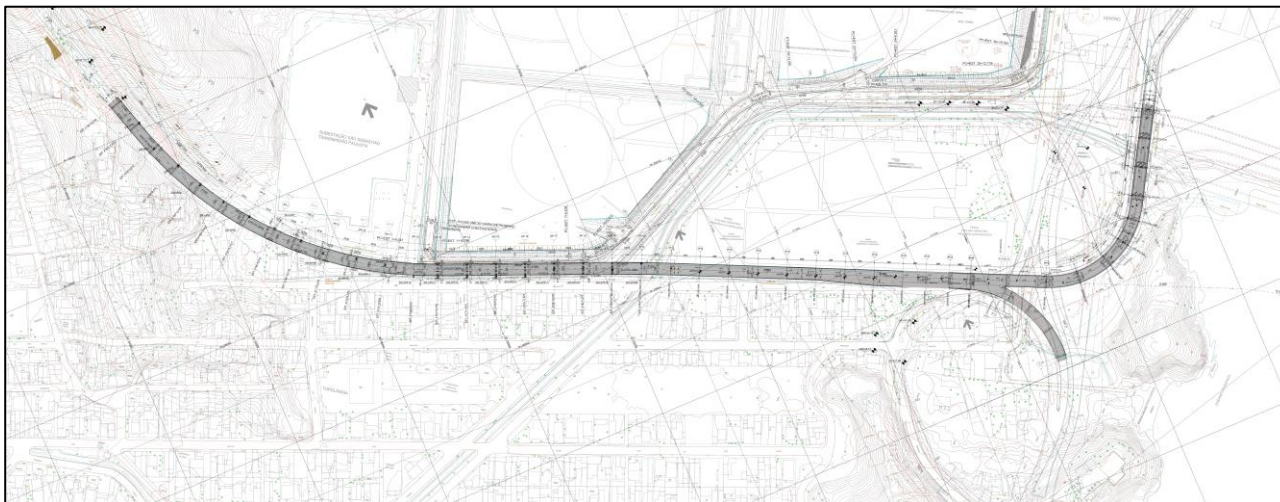


Figura 1. OAE 403 dos Contornos de Caraguatatuba e de São Sebastião – Implantação.

A infraestrutura da obra é constituída por 1 encontro apoiado em fundação direta (E1) e 2 encontros apoiados em 2 estacões cada (E2 e E3), além de 44 apoios centrais, sendo que 4 são compostos por fundação direta (AP1-AP4), 6 são compostos por bloco de fundação com 4 estacões cada (AP5, AP6, AP19, AP33, AP42 e AP34), 8 são compostos por bloco de fundação com 3 estacões cada (AP23, AP24, AP28, AP32, AP35, AP36, AP43 e AP44), 23 são compostos por blocos de fundação (blocos únicos, isolados ou ligados com viga de travamento) com 2 estacões cada (AP7-AP18, AP20-AP22, AP25-AP27, AP29-AP31 e AP37-AP38) e 3 são compostos por travessa apoiada diretamente em 2 estacões cada (AP39-AP41). Todos os encontros e

apoios centrais com fundações profundas possuem a infraestrutura composta por estações de 120cm de diâmetro com embutimento em rocha.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DA ÁREA

O contexto geológico em que os Contornos de Caraguatuba e de São Sebastião estão inseridos compreende as rochas do Complexo Costeiro de idade Neoproterozóica (CPRM, 2006), aflorante no litoral do Estado de São Paulo (Figura 2). O Complexo Costeiro é delimitado a norte pela Falha de Cubatão, e a sul pela linha de costa e ilhas vizinhas (Hasui et al., 1981). Na área dos Contornos de Caraguatuba e de São Sebastião, afloram duas unidades litoestratigráficas do Complexo Costeiro, sendo elas: os gnaisses bandados e os gnaisses peraluminosos. A unidade gnaisses bandados compreende rochas gnáissico-migmatíticas de composição monzogranítica e textura gnáissica, com a mineralogia compreendendo quartzo, microclínio, oligoclásio, hornblenda e biotita (CPRM, 2006). A unidade gnaisses peraluminosos, por sua vez, compreende paragnaisses heterogêneos (CPRM, 2006).

Encerrando a sequência estratigráfica, sobreposta às unidades gnáissicas do Complexo Costeiro, ocorrem depósitos detríticos indiferenciados de idade Cenozóica. Estes depósitos compreendem o retrabalhamento de sedimentos arenosos e cascalhosos das Formações Botucatu, Bauru e Cachoeirinha. Em geral, são depósitos que formam terraços areno-cascalhosos com níveis de materiais transportado e ferruginosos (CPRM, 2006).

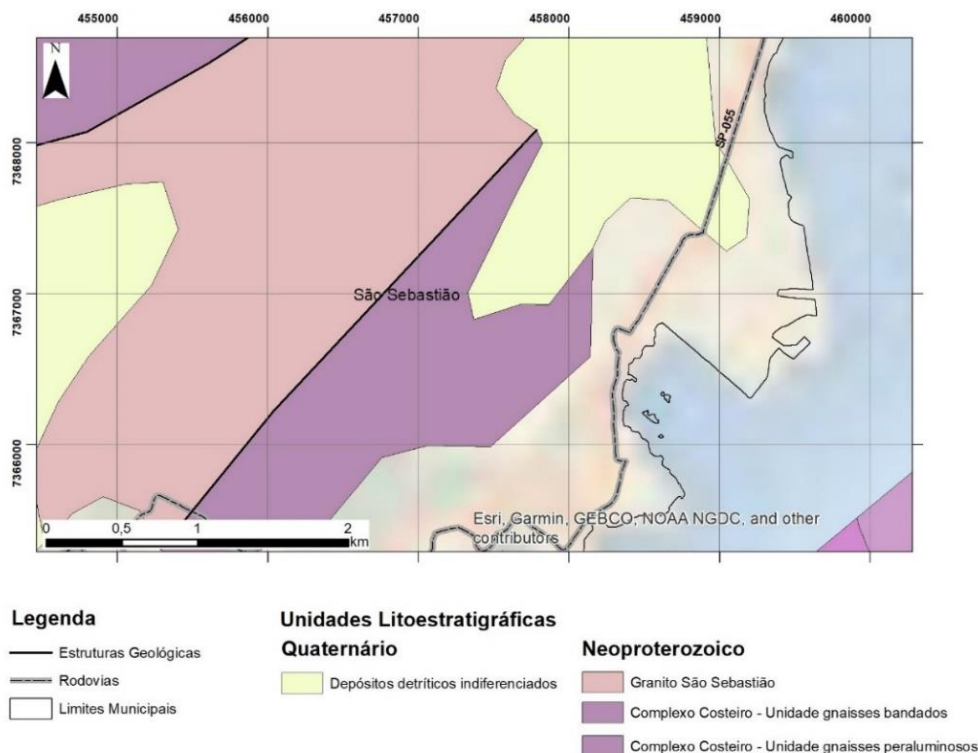


Figura 2. Mapa geológico da região do Contorno de Caraguatuba no município de São Sebastião, na escala 1:750.000 (CPRM, 2006).

4 ESTIMATIVA DE CARGA DE RUPTURA EM ESTACAS EMBUTIDAS EM ROCHA

4.1 Método Cabral-Antunes

No âmbito da geotecnia nacional, há vários métodos consagrados para estimativa de carga de estacas, destacando-se, dentre os mais conhecidos, os métodos de Aoki-Velloso e Decourt-Quaresma para elementos de fundação em solo. No caso de estacas com embutimento em rocha, uma das metodologias mais difundidas no meio técnico corresponde ao método Cabral-Antunes.

O método Cabral-Antunes foi apresentado no 4º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia (SEFE) em 2000 (CABRAL, 2000), abordando especificamente a estimativa de carga de estacas escavadas embutidas em rocha.

As expressões que caracterizam o método encontram-se indicadas a seguir.

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{ponta}} + Q_{\text{atrito}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{ponta}} = \beta \cdot \sigma_c \cdot A_p \quad (2)$$

$$Q_{\text{atrito}} = 0,025 \text{ a } 0,035 \cdot \beta \cdot \sigma_c \quad (3)$$

Em que:

Q_{total} é a carga de ruptura da estaca, em kN

Q_{ponta} é a carga de ruptura associada à parcela de ponta, em kN

Q_{atrito} é a carga de ruptura associada ao atrito lateral, em kN

β é um fator adimensional de correlação da resistência à compressão da rocha (ver Tabela 1)

σ_c é a resistência à compressão da rocha sã, em kN/m²

A_p é a área de ponta da estaca, em m²

Para as parcelas de ponta e de atrito lateral, o método prevê, ainda, limites dos valores associados ao f_{ck} do concreto das estacas. Tais limites podem ser consultados no artigo original de apresentação da metodologia (CABRAL, 2000).

Tabela 1. Valores do parâmetro β . (CABRAL, 2000)

Grau de alteração da rocha	Variação do parâmetro β	Valor médio do parâmetro β
Muito alterada	0,07 a 0,13	0,10
Alterada	0,24 a 0,36	0,30
Pouco alterada a sã	0,48 a 0,60	0,54

Para obtenção da carga admissível das estacas, o método recomenda a utilização de fator de segurança igual a 3 a ser aplicado sobre o valor de Q_{total} .

5 FUNDAÇÕES DA OBRA DE ARTE ESPECIAL 403

5.1 Perfis de escavação das estacas

Conforme indicado anteriormente, o subsolo local na região de implantação da OAE 403 é caracterizado por espessas camadas de argila marinha sobrepostas a estratos de solo residual e a embasamento de gnaíse. As estacas definidas para a obra previam embutimento no maciço rochoso local para transferência das cargas atuantes provenientes da estrutura.

Apesar do projeto estabelecer valores específicos de embutimento em rocha para as estacas, os embutimentos reais em campo apresentaram variações devido à resistência do maciço e à capacidade de perfuração do equipamento empregado na obra.

Com base nos boletins de execução, foi possível estabelecer, para cada elemento, o perfil de escavação das estacas, tanto no trecho em solo quanto no trecho em rocha. Estes perfis, elaborados a partir das amostras

extraídas durante a perfuração e analisadas por profissional especializado, possibilitaram as verificações das reais condições de embutimento das estacas e do atendimento às definições de projeto.

A Figura 3 a seguir apresenta, para as estacas com execução de ensaios ECD da OAE 403, os perfis de escavação dos elementos, focando especificamente nos trechos de embutimento em maciço rochoso (os valores indicados na base de cada estaca correspondem às profundidades totais dos elementos). Nos trechos em rocha, adotou-se as classificações de rocha alterada mole (RAM), rocha alterada dura (RAD) e rocha pouco alterada a sã (RS). A Figura 4 indica algumas das amostras de gnaiss extraídas durante a perfuração das estacas, assim como um dos ensaios realizados em tais amostras (ver tópico seguinte).

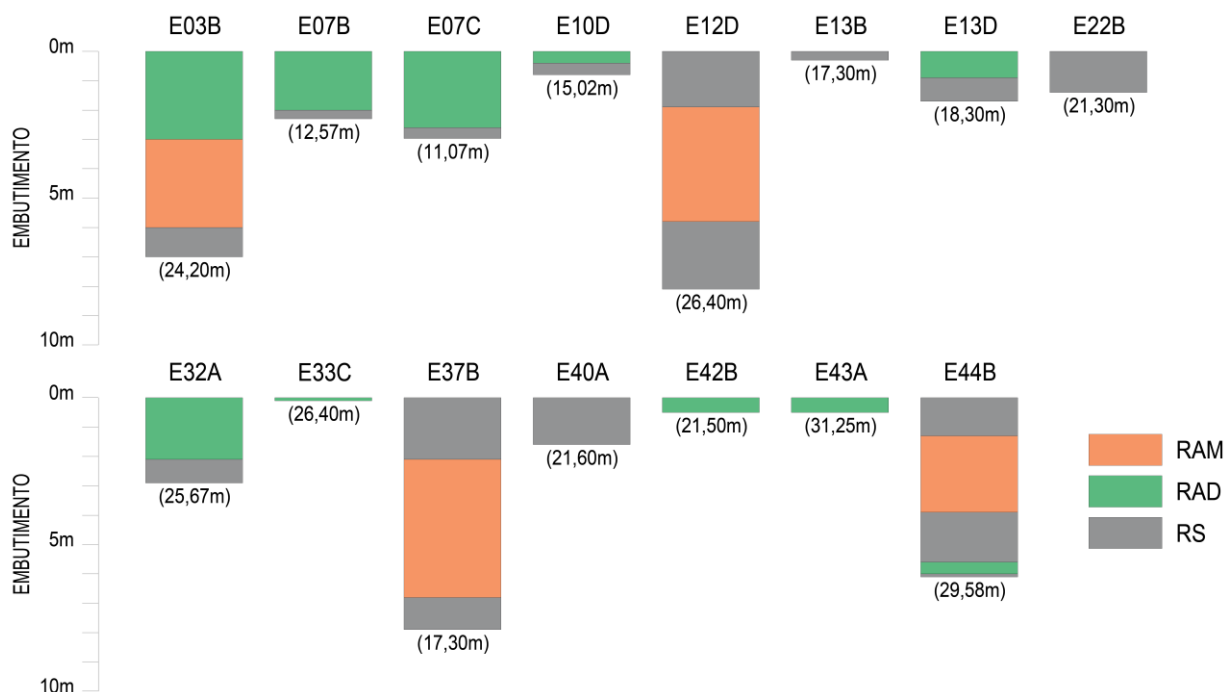


Figura 3. Perfis de escavação no trecho de embutimento em rocha das estacas da OAE 403 dos Contornos de Caraguatatuba e de São Sebastião.



Figura 4. Amostras de gnaiss extraídas durante a perfuração das estacas da OAE 403 dos Contornos de Caraguatatuba e de São Sebastião e ensaio de resistência à compressão uniaxial realizado nas amostras.

5.2 Ensaios realizados nas fundações da OAE

Como parte dos processos de controle de qualidade e de verificação de desempenho do estaqueamento da obra, foram realizados, em parte dos elementos constituintes da infraestrutura da OAE, ensaios de carregamento dinâmico – ensaios ECD – e ensaios de resistência à compressão uniaxial de amostras de rocha extraídas durante a perfuração das estacas.

Os elementos ensaiados foram definidos conjuntamente entre projetista e construtor, tendo por base os dados de perfuração das estacas. A Tabela 2 a seguir indica a lista de estacas ensaiadas na OAE 403 e os respectivos ensaios que foram realizados em cada elemento.

Tabela 2. Ensaios realizados nas estacas da OAE 403.

Estaca	Ensaio de resistência à compressão uniaxial	Ensaio ECD	Estaca	Ensaio de resistência à compressão uniaxial	Ensaio ECD
E03B	-	X	E32A	-	X
E07B	-	X	E33C	-	X
E07C	-	X	E37B	-	X
E10D	-	X	E38A	X	-
E12D	-	X	E38B	X	-
E13B	X	X	E40A	X	X
E13D	-	X	E42B	X	X
E15B	X	-	E43A	-	X
E17A	X	-	E44B	-	X
E22B	-	X			

A Tabela 3 a seguir apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão executados nas estacas da OAE 403. Os resultados dos ensaios ECD, os quais foram realizados conforme as indicações da norma NBR 13208/2007, encontram-se apresentados e analisados no item 6.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial

Estaca	Profundidade da amostra (m)	Condição do maciço	Resistência (MPa)
E13B	17,0	RS	90,3
E15B	17,5	RS	83,7
E17A	20,4	RS	86,3
E38A	19,7	RS	75,7
E38A	20,5	RS	87,5
E38B	17,7	RS	93,8
E40A	21,3	RS	88,4
E42B	21,0	RAD	40,9
Valor médio de resistência (*)			86,5

(*) excluindo-se os resultados nas amostras RAD

6 ANÁLISES DE RESULTADOS

6.1 Comparativo de cargas

6.1.1 Cargas de ruptura

A partir dos ensaios ECD realizados nas estacas da OAE 403 e dos cálculos desenvolvidos com base no método Cabral-Antunes, fez-se o comparativo dos valores de capacidade de carga visando avaliar a correlação entre os resultados calculados e os resultados obtidos em campo. A Tabela 4 a seguir apresenta a comparação entre tais valores. Ressalta-se que os ensaios ECD das estacas E12D, E37B e E44B foram excluídos das análises, tendo em vista que, conforme perfis de escavação indicados na Figura 3, tais estacas apresentaram intercalações no perfil rochoso que denotam a possibilidade de perfuração em matacões, o que poderia comprometer a avaliação dos resultados obtidos.

Tabela 4. Comparativo de resultados de capacidade de carga para as estacas da OAE 403.

Estaca	Carga atuante (kN)	Ensaio ECD (*)			Método Cabral-Antunes (*)			Relação Cabral-Antunes / ECD
		Atrito (kN)	Ponta (kN)	Carga total (kN)	Atrito (kN)	Ponta (kN)	Carga total (kN)	
E03B	3660	5.230	7.770	13.000	18.710	9.048	27.758	2,13
E07B	5090	3.090	6.120	9.210	8.352	9.048	17.400	1,89
E07C	5090	3.270	6.880	10.150	11.067	9.048	20.115	1,98

Estaca	Carga atuante (kN)	Ensaio ECD (*)			Método Cabral-Antunes (*)			Relação Cabral-Antunes / ECD
		Atrito (kN)	Ponta (kN)	Carga total (kN)	Atrito (kN)	Ponta (kN)	Carga total (kN)	
E10D	4000	3.860	7.540	11.400	3.968	9.048	13.016	1,14
E13B	3660	5.900	11.900	17.800	3.534	9.048	12.582	0,71
E13D	3660	5.440	8.760	14.200	7.729	9.048	16.777	1,18
E22B	5630	4.750	8.550	13.300	8.569	9.048	17.617	1,32
E32A	6220	5.360	8.840	14.200	11.862	9.048	20.910	1,47
E33C	4410	4.290	6.210	10.500	0	9.048	9.048	0,86
E42B	5020	6.310	7.390	13.700	1.598	9.048	10.646	0,78
E40A	4430	7.920	9.880	17.800	7.521	9.048	16.569	0,93
E43A	4415	4.530	4.670	9.200	1.712	9.048	10.760	1,17
Valor médio								1,34 ^(**) (1,30 ^(***))

(*) cargas sem minoração por fatores de segurança / (**) considerando-se apenas as estacas com curva carga-recalque com ruptura nítida nos ensaios ECD (estacas em negrito) / (***) considerando-se todas as estacas indicadas na tabela

Observa-se, com base nos resultados disponíveis, que o método Cabral-Antunes resulta, em média, em valores de cargas de ruptura cerca de 30% acima dos valores de cargas de ruptura obtidos em campo a partir dos ensaios ECD.

6.1.2 Cargas admissíveis

Apesar do comparativo das cargas de ruptura indicar valores calculados pelo método Cabral-Antunes superiores aos valores obtidos nos ensaios ECD, é de fundamental importância entender o impacto destas diferenças nas cargas admissíveis dos elementos de fundação.

No que tange às cargas admissíveis, observa-se que o método Cabral-Antunes, ao recomendar a utilização de fator de segurança global no valor de 3, acaba por mitigar as diferenças identificadas nas cargas de ruptura. Considerando-se que as cargas admissíveis extraídas a partir dos ensaios ECD poderiam ser calculadas com fator de segurança global igual a 2, as cargas calculadas pelo método resultariam, assim, em valores da ordem de 90% das cargas admissíveis extraídas dos ensaios ECD. A Tabela 5 apresenta esse comparativo de cargas admissíveis.

Tabela 5. Comparativo de resultados de carga admissível para as estacas da OAE 403.

Estaca	Ensaio ECD		Método Cabral-Antunes		Relação Cabral-Antunes / ECD
	Carga total (kN)	Carga admissível (kN) (FS=2)	Carga total (kN)	Carga admissível (kN) (FS=3)	
E07B	9.210	4.605	17.400	5.800	1,26
E07C	10.150	5.075	20.115	6.705	1,32
E33C	10.500	5.250	9.048	3.016	0,57
E42B	13.700	6.850	10.646	3.549	0,51
E43A	9.200	4.600	10.760	3.587	0,78
Valor médio					0,89

6.2 Estimativa do parâmetro β

Com base nos resultados obtidos, fez-se a calibração dos valores do parâmetro β de modo a se obter maior aderência entre os resultados de carga de ruptura calculados através do método Cabral-Antunes e os resultados extraídos de estacas da obra. Os valores obtidos de β (único parâmetro variável durante a calibração) a serem utilizados no cálculo da parcela de atrito lateral encontram-se indicados na Tabela 6.

Tabela 6. Valores do parâmetro β .

	Rocha muito alterada	Rocha alterada	Rocha pouco alterada a sã
Parâmetro β calibrado	0,035	0,10	0,15

Comparando-se os valores de β das Tabelas 1 e 6, observam-se diferenças significativas entre os valores calibrados e os valores originais do método. Considera-se que tal diferença se deve, em grande parte, ao fato dos valores calibrados já incorporarem as limitações de atrito na interface concreto-maçoço. Entende-se que, ao se utilizar os valores calibrados (para gnaisses), não se faz necessária a aplicação das limitações da adesão previstas no método Cabral-Antunes. Um comparativo direto dos valores de β para gnaisses não pode ser feito em virtude de não serem apresentados, no artigo original do método, dados específicos por tipo de rocha.

Para o caso da parcela de ponta, observou-se que o valor obtido pelo método para maciços de elevada resistência como o gnaise é definido pela limitação desta parcela a 40% do f_{ck} do concreto da estaca (CABRAL, 2000). Pelos resultados obtidos nos ensaios ECD, recomenda-se admitir a limitação da parcela de ponta a 30% da resistência característica do concreto.

7 CONCLUSÕES

O presente artigo teve por objetivo apresentar um comparativo entre os resultados de cargas de estacas embutidas em rocha indicadas por ensaios ECD e de cargas estimadas através do método Cabral-Antunes. O estudo comparativo foi baseado nas estacas escavadas com embutimento em gnaise da OAE 403 dos Contornos de Caraguatatuba e de São Sebastião. Através dos dados obtidos em campo, verificou-se, para o universo amostral disponível, que os valores de carga de ruptura estimados pelo método Cabral-Antunes encontram-se, em média, cerca de 30% acima das cargas de ruptura identificadas nos ensaios ECD.

Apesar da aparente tendência identificada do método de superestimar as cargas de ruptura totais das estacas embutidas em gnaise, verifica-se que, em termos de cargas admissíveis (parâmetro de definição dos comprimentos de embutimento em rocha), o método apresenta elevada aderência com os resultados dos ensaios de campo. Tendo em vista que o método recomenda a utilização de fator de segurança global no valor de 3 (contrapondo-se ao valor de $FS=2$ a ser aplicado sobre os resultados dos ensaios ECD), observa-se que as variações de carga estimadas pelo método (variações que se justificam pelas incertezas inerentes à execução das fundações e às condições dos maciços rochosos) são compensadas pelo valor de FS sugerido pelos autores da metodologia. Os resultados obtidos demonstram, assim, a validade do método Cabral-Antunes para estimativa do comprimento de embutimento de estacas em rocha, corroborando os resultados empíricos da utilização do método no meio geotécnico nacional desde a sua publicação em 2000.

Para o caso específico de se buscar maior aderência nos valores da carga de ruptura estimados pelo método Cabral-Antunes e os valores extraídos em ensaios ECD, o presente artigo apresentou sugestões de valores do parâmetro β que poderiam ser aplicados no dimensionamento de estacas embutidas em gnaise.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a EGTC Infra S.A. pela permissão de uso dos dados de investigações geotécnicas e dos resultados de ensaios realizados nas fundações das obras dos Contornos de Caraguatatuba e de São Sebastião, o técnico de Geologia Nadson Tadeu Souza Mota pelo auxílio na compilação dos dados de campo e a geóloga Janaína Pereira Duarte pela sua contribuição na caracterização geológica da área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). NBR 6122. *Projeto e Execução de Fundações*. Rio de Janeiro.
- Cabral, D.A., Antunes, W. R. (2000) Sugestão para a determinação da capacidade de carga de estacas escavadas embutidas em rocha. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE 4, São Paulo. *Anais... ABMS*. v. 1, p. 169-173.
- Hasui, Y.; Dantas, A. S. L.; Carneiro, C. D. R.; Bistrichi, C. A. *O embasamento Pré-Cambriano e Eo-paleozóico em São Paulo*. In: Mapa Geológico do Estado de São Paulo. Pró-Minério, IPT. v. 1, p. 12-45, 1981.
- Serviço Geológico Brasileiro (CPRM). *Breve Descrição das Unidades Litoestratigráficas Aflorantes no Estado de São Paulo*. Mapa Geológico do Estado de São Paulo, Programa Geologia do Brasil, 2006.