



## **Cravabilidade e calibração em campo do embutimento e da nega de estacas pré-moldadas**

**Arthur Menezes<sup>1</sup>, Vinicius Barichello<sup>2</sup>, Luana Oliveira<sup>3</sup>, Eduardo Tagliarini<sup>4</sup>, João Borges<sup>5</sup>, Ener Cunha<sup>6</sup>, Felipe Scholl<sup>7</sup>**

<sup>1</sup> MRS Logística S.A. / Gerência de Implantação de Soluções de Mobilidade Urbana - SP/ [arthur.menezes@mrs.com.br](mailto:arthur.menezes@mrs.com.br)

<sup>2</sup> MRS Logística S.A. / Gerência de Implantação de Soluções de Mobilidade Urbana - SP/ [vinicius.barichello@mrs.com.br](mailto:vinicius.barichello@mrs.com.br)

<sup>3</sup> MRS Logística S.A. / Gerência de Implantação de Soluções de Mobilidade Urbana - SP/ [luana.oliveira@mrs.com.br](mailto:luana.oliveira@mrs.com.br)

<sup>4</sup> MRS Logística S.A. / Gerência de Implantação de Soluções de Mobilidade Urbana - SP/ [eduardo.tagliarini@mrs.com.br](mailto:eduardo.tagliarini@mrs.com.br)

<sup>5</sup> Tranenge Construções LTDA / Gerência Técnica / [joaoborges@tranenge.com.br](mailto:joaoborges@tranenge.com.br)

<sup>6</sup> Tranenge Construções LTDA / Gerência Técnica / [enercunha@tranenge.com.br](mailto:enercunha@tranenge.com.br)

<sup>7</sup> Enescil Engenharia de Projetos LTDA / Gerência de Projetos / [felipe@enescil.com.br](mailto:felipe@enescil.com.br)

### **Resumo**

Estacas pré-moldadas são um tipo de fundação que se destaca pela garantia da qualidade na fabricação quanto à seção de projeto e à resistência dos materiais e que possui alta produtividade quando comparada a outros tipos de estacas. A sua aplicação está atrelada à cravabilidade e, por isso, a NBR 6122:2022 determina critérios a serem contemplados no projeto e na obra a este respeito. O presente artigo relata a utilização de estacas pré-moldadas Ø60cm vazadas no Viaduto rodoviário no município de Pindamonhangaba/SP cravadas por percussão e aborda resultados da capacidade de carga geotécnica prevista por métodos semiempíricos, a cravabilidade verificada em obra e os critérios da norma brasileira. A execução foi acompanhada por ensaios dinâmicos tipo PDA que permitiram calibrar o critério de nega e o embutimento das estacas para garantia do fator de segurança estipulado pela NBR 6122:2022 aliado à eficiência sob o aspecto financeiro.

### **Palavras-chave**

Fundação; estaca pré-moldada; cravabilidade; ensaio dinâmico.

### **Introdução**

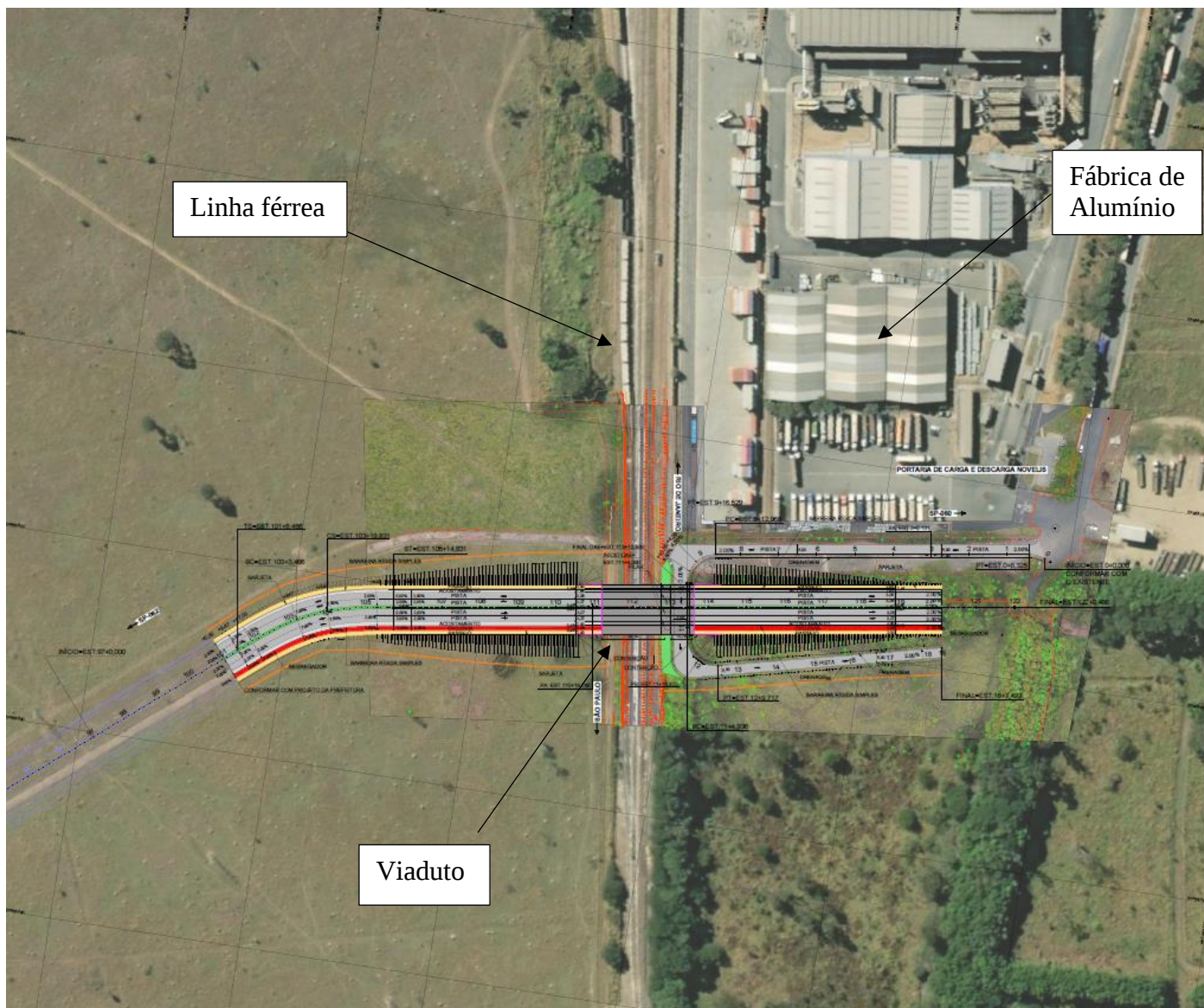
O presente estudo fez parte do Projeto do Viaduto de Coruputuba, integrante do Anel Viário de Contorno em Pindamonhangaba/SP, que interligará a Rodovia Vereador Abel Fabrício Dias (SP-062) com a Rodovia Presidente Dutra (SP-060). O Viaduto possui aproximadamente 46,75m de extensão, dividido em um vão de 31,50m que atravessa a linha férrea Ramal de São Paulo, e um de 14,00m onde passa uma pista de retorno desta estrada que está sendo criada. Sua superestrutura em concreto pré-moldado protendido com tabuleiro que possui largura de 26,33m, apoiado em 8 vigas pré-moldadas protendidas. A seção do Viaduto e a elevação longitudinal são apresentadas nas Figuras 2 e 3.

No projeto, foi estudada a adoção de estacas pré-moldadas por conta da produtividade de execução deste tipo de fundação. A estaca considerada possui diâmetro externo de Ø60cm, furo interno de Ø38cm, composta por concreto com  $f_{ck} \geq 60$  MPa, 10 barras Ø7 e 5 barras Ø6mm de aço CP-175 RB. Esta estaca possui peso linear de 417 kg/m e carga admissível de 389 tf, conforme critérios da norma NBR 6118:2023.

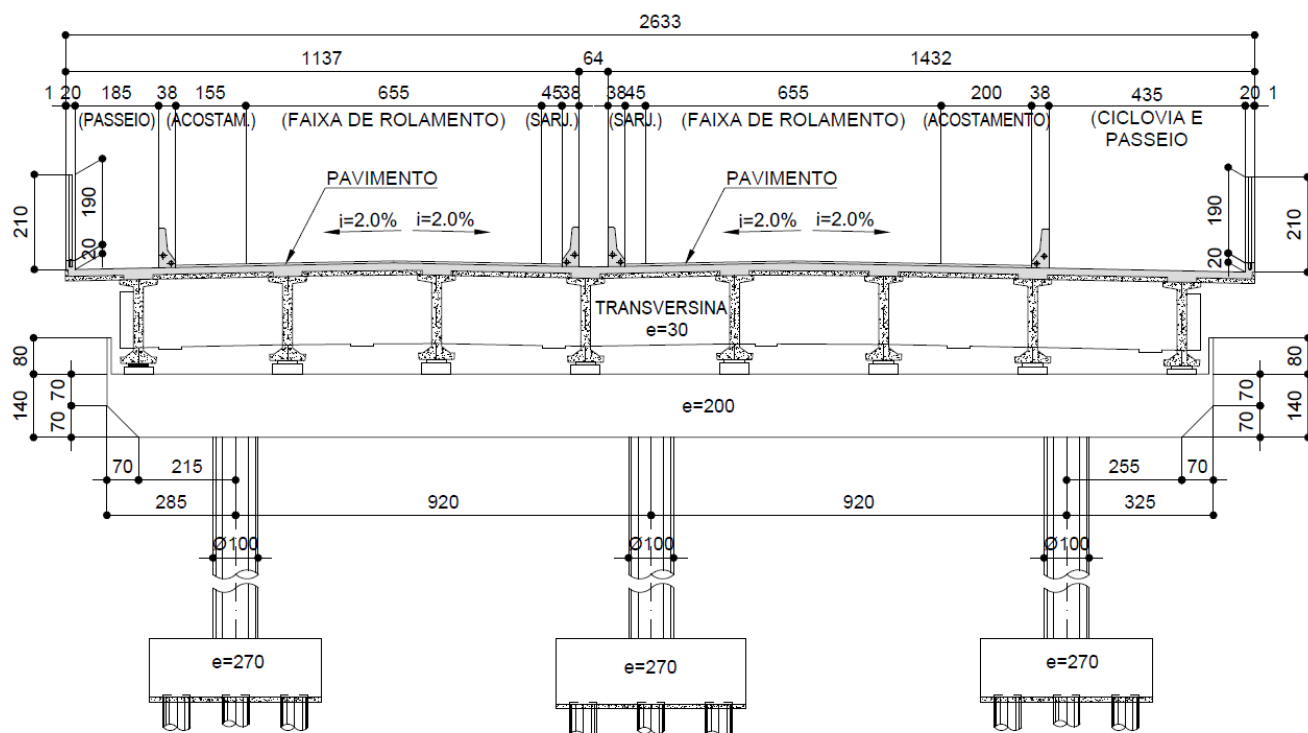
O local de implantação fica em zona suburbana, tendo como construção vizinha apenas uma fábrica cujas suas edificações estão relativamente afastadas, fator que exime o risco de danos às estruturas terceiras pela cravação das estacas. A Figura 1 mostra o local de implantação do Viaduto.

O estaqueamento é composto por 38 estacas distribuídas em três linhas de apoio com três pilares cada. Os pilares são apoiados em blocos independentes. A geometria está apresentada na Figura 4. A carga de trabalho das estacas é apresentada na Tabela 1.

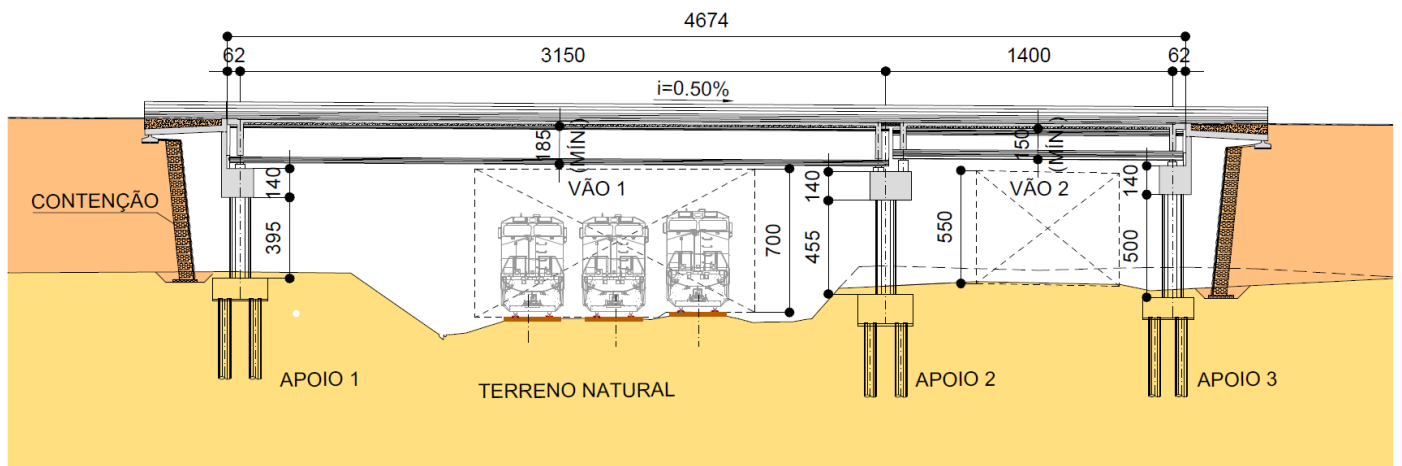
O Viaduto situa-se em terreno composto por solo argiloso de consistência mole na camada superior que enrijece gradualmente conforme a profundidade até a consistência dura, alcançando  $N_{SPT}$  acima de 50 golpes. Há rocha em profundidade da ordem de 20m. A Figura 5 apresenta as sondagens geotécnicas realizadas. Apresenta-se a seguir a avaliação realizada.



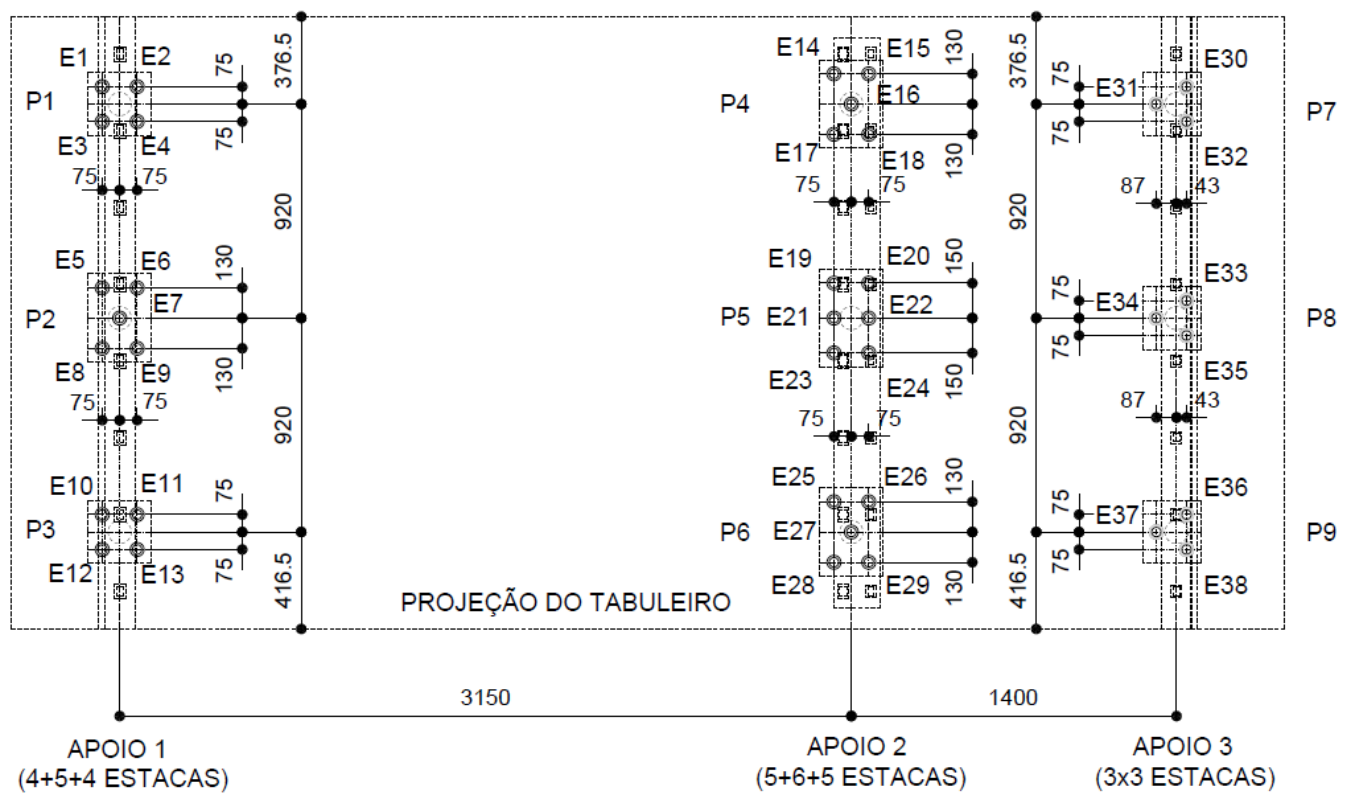
**Figura 1 – Localização do Viaduto**



**Figura 2 - Seção típica do Viaduto**



**Figura 3 – Elevação longitudinal do Viaduto**



**Figura 4 – Estaqueamento do Viaduto**

Sondagem SM-1

| PROFUNDIDADES<br>CAMADA e MANOBRAS<br>(m) | PERFIL GEOLOGICO /<br>AMOSTRAS | DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DO MATERIAL<br>(Táctil-Visual)                                                                                                                                                                                                                             | RESISTÊNCIA À<br>PENETRAÇÃO                |          |                  |
|-------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------|------------------|
|                                           |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                | ENSAIO DE<br>PENETRAÇÃO<br>(GOLPES/PENET.) | INICIAL  | FINAL - $N_{60}$ |
| 0,70                                      | 01                             | Argila siltosa, marrom.<br>(ATERRO).                                                                                                                                                                                                                                           | 2 2 3<br>15 15 15                          | 4        | 5                |
|                                           | 02                             | Argila pouco arenosa, parcialmente plástica, marrom,<br>de consistência mole a média,<br>(SOLO ALUVIONAR).                                                                                                                                                                     | 2 3 3<br>15 15 15                          | 5        | 8                |
| 2,80                                      | 03                             | Argila siltosa, parcialmente plástica, vermelha, de<br>consistência média.<br>(SOLO ALUVIONAR).                                                                                                                                                                                | 3 4 4<br>15 15 15                          | 7        | 8                |
| 3,75                                      | 04                             | Argila pouco arenosa, parcialmente plástica, marrom,<br>de consistência média.<br>(SOLO ALUVIONAR).                                                                                                                                                                            | 4 5 4<br>15 15 15                          | 9        | 9                |
| 4,90                                      | 05                             | Argila siltosa, vermelha com porções de cor<br>variegada, homogênea, de consistência rija a muito<br>rija.<br>(SOLO ALUVIONAR/LACUSTRE).                                                                                                                                       | 7 9 11<br>15 15 15                         | 16       | 20               |
|                                           | 06                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                | 9 11 15<br>15 15 15                        | 20       | 26               |
| 6,70                                      | 07                             | Argila pouco arenosa, cinza, de consistência dura.<br>(SOLO RESIDUAL).                                                                                                                                                                                                         | 10 13 16<br>15 15 15                       | 23       | 29               |
|                                           | 08                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                | 11 14 17<br>15 15 15                       | 25       | 31               |
|                                           | 09                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                | 12 16 19<br>15 15 15                       | 28       | 35               |
|                                           | 10                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                | 11 15 18<br>15 15 15                       | 26       | 33               |
|                                           | 11                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                | 12 16 19<br>15 15 15                       | 28       | 35               |
|                                           | 12                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                | 13 17 18<br>15 16 15                       | 30       | 35               |
| 12,80                                     | 13                             | Argila pouco arenosa com pedregulhos finos,<br>vermelho e de consistência dura.<br>(SOLO RESIDUAL).                                                                                                                                                                            | 15 19 20<br>15 15 15                       | 34       | 39               |
|                                           | 14                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                | 16 21 23<br>15 15 15                       | 37       | 44               |
|                                           | 15                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                | 13 19 22<br>15 15 15                       | 32       | 41               |
| 15,60                                     | 16                             | Argila siltosa, homogênea, amarela, de consistência<br>dura.<br>(SOLO RESIDUAL).                                                                                                                                                                                               | 18 23 30<br>15 15 10                       | 41       | 53<br>25         |
|                                           | 17                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                | 21 25 28<br>15 15 10                       | 46       | 53<br>25         |
|                                           | 18                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                | 25 27 -<br>15 15 -                         | 52       | 27<br>15         |
|                                           | 19                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                | 26 30 -<br>15 10 -                         | 56<br>25 | 30<br>10         |
| 20,00                                     | 20                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                | 35 10 -<br>15 3 -                          | 45<br>18 | 10<br>3          |
| 20,60                                     | 21                             | Argila siltosa, homogênea, amarela, de consistência<br>dura.<br>(SOLO RESIDUAL).                                                                                                                                                                                               | 30 - -<br>8 - -                            | 30<br>8  | -<br>-           |
| 21,08                                     |                                | Argila pouco siltosa, cinza escura a preta e de<br>consistência dura.<br>(SOLO RESIDUAL).                                                                                                                                                                                      |                                            |          |                  |
|                                           |                                | Argilito cinza escuro e foliado, extremamente<br>decomposto (A4) e pouco consistente (C4), sendo<br>facilmente fragmentado manualmente em seus<br>planos de foliação.<br>(SEDIMENTO TERCIÁRIO).                                                                                |                                            |          |                  |
| 23,60                                     |                                | Argilito, cinza esverdeada, maciço, medianamente a<br>pouca decomposta (A2 a A1), medianamente<br>consistente (C3) e de superfície lisa.<br>(SEDIMENTO TERCIÁRIO).                                                                                                             |                                            |          |                  |
| 24,50                                     |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                            |          |                  |
| 25,00                                     |                                | Argilito cinza escura, extremamente decomposto<br>(A4), pouco a medianamente consistente (C4 a C3)<br>com bordas de fragmentos quebradiços a golpe do<br>martelo e não quebradiço a pressão manual.<br>Apresenta planos de fraqueza sub horizontais.<br>(SEDIMENTO TERCIÁRIO). |                                            |          |                  |
| 26,00                                     |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                            |          |                  |
|                                           |                                | Argilito, cinza escuro, extremamente decomposto<br>(A4), pouco consistente (C4) com bordas<br>fragmentando com relativa facilidade à pressão<br>manual.<br>(SEDIMENTO TERCIÁRIO).                                                                                              |                                            |          |                  |
| 29,00                                     |                                | Argilito, cinza escuro, extremamente decomposto<br>(A4), sem consistência (C5) desagregando-se à<br>pressão dos dedos.<br>(SEDIMENTO TERCIÁRIO).                                                                                                                               |                                            |          |                  |
| 30,00                                     |                                | Argilito, cinza escuro, extremamente decomposto<br>(A4), pouco consistente (C4) com bordas<br>fragmentando com relativa facilidade à pressão<br>manual.<br>(SEDIMENTO TERCIÁRIO).                                                                                              |                                            |          |                  |
|                                           |                                | LIMITE DE SONDAAGEM                                                                                                                                                                                                                                                            |                                            |          |                  |

Sondagem SM-2

| PROFUNDIDADES<br>CAMADA e MANOBRAS<br>(m) | PERFIL GEOLOGICO /<br>AMOSTRAS | DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DO MATERIAL<br>(Táctil-Visual)                                                                                                                                                                                                                         | RESISTÊNCIA À<br>PENETRAÇÃO                |          |                  |
|-------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------|------------------|
|                                           |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                            | ENSAIO DE<br>PENETRAÇÃO<br>(GOLPES/PENET.) | INICIAL  | FINAL - $N_{60}$ |
|                                           | 01                             | Argila siltosa, marrom.<br>(SOLO ALUVIONAR/LACUSTRE).                                                                                                                                                                                                                      | 2 3 3<br>15 15 15                          | 5        | 8                |
| 1,70                                      | 02                             | Argila arenosa, marrom avermelhado, de<br>consistência média a rija.<br>(SOLO ALUVIONAR/LACUSTRE).                                                                                                                                                                         | 3 3 4<br>15 15 15                          | 6        | 7                |
|                                           | 03                             |                                                                                                                                                                                                                                                                            | 3 2 3<br>15 15 15                          | 5        | 5                |
|                                           | 04                             |                                                                                                                                                                                                                                                                            | 3 4 5<br>15 15 15                          | 7        | 9                |
|                                           | 05                             |                                                                                                                                                                                                                                                                            | 4 5 7<br>15 15 15                          | 9        | 12               |
|                                           | 06                             |                                                                                                                                                                                                                                                                            | 7 9 11<br>15 15 15                         | 16       | 20               |
| 6,80                                      | 07                             | Argila siltosa e pouco arenosa, marrom avermelhada<br>com porções de cores variegadas, de consistência<br>muito rija a dura.<br>(SOLO RESIDUAL).                                                                                                                           | 8 11 13<br>15 15 15                        | 19       | 24               |
|                                           | 08                             |                                                                                                                                                                                                                                                                            | 10 14 16<br>15 15 15                       | 24       | 30               |
|                                           | 09                             |                                                                                                                                                                                                                                                                            | 11 15 19<br>15 15 15                       | 26       | 34               |
|                                           | 10                             |                                                                                                                                                                                                                                                                            | 11 14 18<br>15 15 15                       | 25       | 32               |
|                                           | 11                             |                                                                                                                                                                                                                                                                            | 12 16 18<br>15 15 15                       | 28       | 35               |
| 11,60                                     | 12                             | Siltos arenoso, marrom avermelhado, muito<br>compacto.<br>(SOLO RESIDUAL).                                                                                                                                                                                                 | 19 19 21<br>15 15 15                       | 38       | 40               |
|                                           | 13                             |                                                                                                                                                                                                                                                                            | 13 20 23<br>15 15 15                       | 33       | 43               |
|                                           | 14                             |                                                                                                                                                                                                                                                                            | 15 28 20<br>15 15 5                        | 43       | 48<br>20         |
| 14,70                                     | 15                             | Argila, cinza escuro, de consistência dura.<br>(SOLO RESIDUAL).                                                                                                                                                                                                            | 25 27 -<br>15 15 -                         | 52       | 27<br>15         |
|                                           | 16                             |                                                                                                                                                                                                                                                                            | 24 30 -<br>15 10 -                         | 54<br>25 | 30<br>10         |
|                                           | 17                             |                                                                                                                                                                                                                                                                            | 27 20 -<br>15 5 -                          | 47<br>20 | 20<br>5          |
|                                           | 18                             |                                                                                                                                                                                                                                                                            | 38 - -<br>15 - -                           | 38<br>15 | -<br>-           |
| 18,80                                     | 19                             | Argila com fragmentos rochosos de argilito, cinza<br>claro, localmente estruturado, de consistência dura.<br>(SOLO RESIDUAL).                                                                                                                                              | 40 - -<br>10 - -                           | 40<br>10 | -<br>-           |
| 20,00                                     |                                | Argilito muito decomposto (A3), variando de cinza<br>claro para cinza mais escuro e de pouco consistente<br>(C4) para sem consistência (C5), do topo para base<br>respectivamente. Observação: ocorre perda parcial<br>de água aos 19,20 metros.<br>(SEDIMENTO TERCIÁRIO). |                                            |          |                  |
| 20,75                                     |                                | Argilito cinza escuro, extremamente decomposto<br>(A4), pouco consistente (C4) com bordas<br>fragmentando com relativa facilidade à pressão<br>manual.<br>(SEDIMENTO TERCIÁRIO).                                                                                           |                                            |          |                  |
| 23,00                                     |                                | Argilito, cinza escuro esverdeado, maciço,<br>extremamente decomposto (A4), pouco consistente<br>(C4).<br>(SEDIMENTO TERCIÁRIO).                                                                                                                                           |                                            |          |                  |
| 30,00                                     |                                | LIMITE DE SONDAAGEM                                                                                                                                                                                                                                                        |                                            |          |                  |

Figura 5 – Sondagens SM-1 e SM-2

**Tabela 1 – Carga de trabalho das estacas.**

| Estaca | N (tf) | Estaca | N (tf) | Estaca | N (tf) |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| E1     | 125,3  | E14    | 123,3  | E27    | 97,3   |
| E2     | 131,4  | E15    | 124,2  | E28    | 120,6  |
| E3     | 124,8  | E16    | 100,3  | E29    | 121,7  |
| E4     | 127,6  | E17    | 120,3  | E30    | 116,1  |
| E5     | 117,5  | E18    | 118,5  | E31    | 116,1  |
| E6     | 124,9  | E19    | 120,2  | E32    | 113,6  |
| E7     | 96,9   | E20    | 117,8  | E33    | 123,0  |
| E8     | 118,2  | E21    | 112,0  | E34    | 124,6  |
| E9     | 124,8  | E22    | 109,7  | E35    | 123,8  |
| E10    | 122,0  | E23    | 120,3  | E36    | 110,5  |
| E11    | 126,0  | E24    | 118,2  | E37    | 114,8  |
| E12    | 123,9  | E25    | 117,2  | E38    | 115,4  |
| E13    | 129,6  | E26    | 114,9  |        |        |

### Embutimento necessário por métodos semiempíricos

A avaliação do embutimento das estacas foi realizada através dos métodos de Aoki-Velloso e Decourt-Quaresma. A definição dos métodos foi extraída e pode ser consultada em (Cintra, J. C. A; Aoki, N., 2010) e (Velloso, D. A., Lopes, F. R., 2010):

#### Método Aoki-Velloso

Neste método, a resistência é dada por:

$$R = R_p + R_L = \frac{KN_p A_p}{F_1} + \frac{U}{F_2} \sum_1^n (\alpha K N_L \Delta_L)$$

$\alpha$  é razão entre o atrito lateral e a resistência de ponta de uma camada de solo;

$\Delta_L$  é o comprimento de fuste considerado para um dado  $\alpha$ , K,  $N_L$ ;

$A_p$  é a área da ponta da estaca;

$F_1$  e  $F_2$  são fatores de correlação entre o método e o tipo de estaca;

K é o coeficiente de correlação do tipo de solo;

$N_L$  é o  $N_{SPT}$  da camada onde o fuste está situado;

$N_p$  é o  $N_{SPT}$  da camada onde a ponta está situada;

$R_p$  é a resistência de ponta;

$R_L$  é a resistência lateral;

U é o perímetro da estaca.

Foram utilizados os parâmetros K e  $\alpha$  apresentados na Tabela 2 e  $F_1 = 1,75$  e  $F_2 = 3,5$ .

**Tabela 2 – Parâmetros K e  $\alpha$  de argilas para o método Aoki-Velloso.**

| Solo                 | K<br>(tf/m <sup>2</sup> ) | $\alpha$<br>(%) |
|----------------------|---------------------------|-----------------|
| Argila               | 20                        | 6,0             |
| Argila arenosa       | 35                        | 2,4             |
| Argila arenossiltosa | 30                        | 2,8             |
| Argila siltosa       | 22                        | 4,0             |
| Argila siltoarenosa  | 33                        | 3,0             |

Aplicando fatores de segurança, a carga admissível da estaca é:

$$R_{adm} = \frac{R_p}{2,0} + \frac{R_L}{2,0}$$

## Método Decourt-Quaresma

Neste método, a resistência é dada por:

$$R = R_p + R_L = \alpha C N_p A_p + \beta \left( \frac{N_L}{3} + 1 \right) UL \quad [tf]$$

$\alpha$  e  $\beta$  são fatores relacionados ao tipo de estaca.

$A_p$  é a área da ponta da estaca;

$C$  é o coeficiente característico do solo

$N_L$  é o  $N_{SPT}$  médio das camadas onde fuste está situado;

$N_p$  é a média do  $N_{SPT}$  da camada onde a ponta será situada, da camada imediatamente anterior e da imediatamente posterior;

$R_p$  é a resistência de ponta;

$R_L$  é a resistência lateral;

$U$  é o perímetro da estaca.

Foram utilizados os parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $C$  iguais a 1,0, 1,0 e 12,0 tf/m<sup>2</sup>, respectivamente.

Aplicando fatores de segurança sugeridos pelos autores do Método, a carga admissível da estaca é:

$$R_{adm} = \frac{R_p}{4,0} + \frac{R_L}{1,3}$$

As tabelas 3 a 6 apresentam a aplicação dos métodos para as estacas do projeto. Para a estaca  $\varnothing 60$ cm, a área da ponta possui 0,36 m<sup>2</sup> e o perímetro da seção é de 2,40m.

**Tabela 3 – Resistência geotécnica das estacas pela Sondagem SM-1 segundo Método Aoki-Velloso.**

| Cota | SPT | K<br>(tf/m <sup>2</sup> ) | K x<br>NSPT<br>(tf/m <sup>2</sup> ) | $\alpha$ | $\alpha$ x K x NSPT<br>(tf/m <sup>2</sup> ) | Resistência<br>lateral (tf) | Resist.<br>Lateral<br>adm<br>(tf) | Resistência<br>de ponta<br>(tf) | Resist.<br>Ponta<br>adm<br>(tf) | Capacidade<br>total<br>(tf) | Capacidade<br>admissível<br>(tf) |
|------|-----|---------------------------|-------------------------------------|----------|---------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 1    | 5   | 22                        | 7,92                                | 0,04     | 0,3168                                      | 3,0                         | 1,5                               | 22,6                            | 11,3                            | 25,6                        | 12,8                             |
| 2    | 6   | 35                        | 12,60                               | 0,024    | 0,3024                                      | 6,5                         | 3,2                               | 43,2                            | 21,6                            | 49,7                        | 24,8                             |
| 3    | 8   | 22                        | 7,92                                | 0,04     | 0,3168                                      | 11,3                        | 5,7                               | 36,2                            | 18,1                            | 47,5                        | 23,8                             |
| 4    | 9   | 35                        | 12,60                               | 0,024    | 0,3024                                      | 16,5                        | 8,2                               | 64,8                            | 32,4                            | 81,3                        | 40,6                             |
| 5    | 20  | 22                        | 7,92                                | 0,04     | 0,3168                                      | 28,6                        | 14,3                              | 90,5                            | 45,3                            | 119,1                       | 59,5                             |
| 6    | 26  | 22                        | 7,92                                | 0,04     | 0,3168                                      | 44,2                        | 22,1                              | 117,7                           | 58,8                            | 161,9                       | 81,0                             |
| 7    | 29  | 35                        | 12,60                               | 0,024    | 0,3024                                      | 60,9                        | 30,5                              | 208,8                           | 104,4                           | 269,7                       | 134,9                            |
| 8    | 31  | 35                        | 12,60                               | 0,024    | 0,3024                                      | 78,8                        | 39,4                              | 223,2                           | 111,6                           | 302,0                       | 151,0                            |
| 9    | 35  | 35                        | 12,60                               | 0,024    | 0,3024                                      | 99,0                        | 49,5                              | 252,0                           | 126,0                           | 351,0                       | 175,5                            |
| 10   | 33  | 35                        | 12,60                               | 0,024    | 0,3024                                      | 118,0                       | 59,0                              | 237,6                           | 118,8                           | 355,6                       | 177,8                            |
| 11   | 35  | 35                        | 12,60                               | 0,024    | 0,3024                                      | 138,1                       | 69,1                              | 252,0                           | 126,0                           | 390,1                       | 195,1                            |
| 12   | 35  | 35                        | 12,60                               | 0,024    | 0,3024                                      | 158,3                       | 79,1                              | 252,0                           | 126,0                           | 410,3                       | 205,1                            |
| 13   | 39  | 35                        | 12,60                               | 0,024    | 0,3024                                      | 180,8                       | 90,4                              | 280,8                           | 140,4                           | 461,6                       | 230,8                            |
| 14   | 44  | 35                        | 12,60                               | 0,024    | 0,3024                                      | 206,1                       | 103,0                             | 316,8                           | 158,4                           | 522,9                       | 261,4                            |

**Tabela 4 – Resistência geotécnica das estacas pela Sondagem SM-2 segundo Método Aoki-Velloso.**

| Cota | SPT | K<br>(tf/m <sup>2</sup> ) | K x<br>NSPT<br>(tf/m <sup>2</sup> ) | $\alpha$ | $\alpha \times K \times$<br>NSPT<br>(tf/m <sup>2</sup> ) | Resistência<br>lateral<br>(tf) | Resist.<br>Lateral<br>adm<br>(tf) | Resistência<br>de ponta<br>(tf) | Resist.<br>Ponta<br>adm<br>(tf) | Capacidade<br>total<br>(tf) | Capacidade<br>admissível<br>(tf) |
|------|-----|---------------------------|-------------------------------------|----------|----------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 1    | 6   | 22                        | 1,32                                | 0,04     | 0,0528                                                   | 3,6                            | 1,8                               | 27,2                            | 13,6                            | 30,8                        | 15,4                             |
| 2    | 5   | 22                        | 1,10                                | 0,04     | 0,044                                                    | 6,6                            | 3,3                               | 22,6                            | 11,3                            | 29,3                        | 14,6                             |
| 3    | 7   | 22                        | 1,54                                | 0,04     | 0,0616                                                   | 10,9                           | 5,4                               | 31,7                            | 15,8                            | 42,5                        | 21,3                             |
| 4    | 12  | 22                        | 2,64                                | 0,04     | 0,1056                                                   | 18,1                           | 9,1                               | 54,3                            | 27,2                            | 72,4                        | 36,2                             |
| 5    | 18  | 22                        | 3,96                                | 0,04     | 0,1584                                                   | 29,0                           | 14,5                              | 81,5                            | 40,7                            | 110,4                       | 55,2                             |
| 6    | 23  | 22                        | 5,06                                | 0,04     | 0,2024                                                   | 42,8                           | 21,4                              | 104,1                           | 52,0                            | 146,9                       | 73,5                             |
| 7    | 36  | 22                        | 7,92                                | 0,04     | 0,3168                                                   | 64,6                           | 32,3                              | 162,9                           | 81,5                            | 227,5                       | 113,7                            |
| 8    | 38  | 22                        | 8,36                                | 0,04     | 0,3344                                                   | 87,5                           | 43,7                              | 172,0                           | 86,0                            | 259,5                       | 129,7                            |
| 9    | 50  | 22                        | 11,00                               | 0,04     | 0,44                                                     | 117,7                          | 58,8                              | 226,3                           | 113,1                           | 344,0                       | 172,0                            |
| 10   | 50  | 22                        | 11,00                               | 0,04     | 0,44                                                     | 147,8                          | 73,9                              | 226,3                           | 113,1                           | 374,1                       | 187,1                            |
| 11   | 50  | 22                        | 11,00                               | 0,04     | 0,44                                                     | 178,0                          | 89,0                              | 226,3                           | 113,1                           | 404,3                       | 202,1                            |
| 12   | 50  | 22                        | 11,00                               | 0,04     | 0,44                                                     | 208,2                          | 104,1                             | 226,3                           | 113,1                           | 434,5                       | 217,2                            |
| 13   | 50  | 22                        | 11,00                               | 0,04     | 0,44                                                     | 238,4                          | 119,2                             | 226,3                           | 113,1                           | 464,6                       | 232,3                            |

**Tabela 5 – Resistência geotécnica das estacas pela Sondagem SM-1 segundo Método Decourt-Quaresma.**

| Cota | SPT | $\beta \times$<br>(N <sub>SPT</sub> /3+1)<br>(tf/m <sup>2</sup> ) | $\alpha \times C \times N_{SPT}$<br>(tf/m <sup>2</sup> ) | Resistência<br>lateral<br>(tf) | Resist.<br>Lateral<br>adm<br>(tf) | Resistência<br>de ponta<br>(tf) | Resist.<br>Ponta<br>adm<br>(tf) | Capacidade<br>total<br>(tf) | Capacidade<br>admissível<br>(tf) |
|------|-----|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 1    | 5   | 2,667                                                             | 60                                                       | 6,4                            | 4,9                               | 22,9                            | 5,7                             | 29,3                        | 10,6                             |
| 2    | 6   | 3,000                                                             | 72                                                       | 12,8                           | 9,8                               | 26,8                            | 6,7                             | 39,6                        | 16,5                             |
| 3    | 8   | 3,667                                                             | 96                                                       | 20,4                           | 15,7                              | 32,0                            | 8,0                             | 52,4                        | 23,7                             |
| 4    | 9   | 4,000                                                             | 108                                                      | 29,9                           | 23,0                              | 52,2                            | 13,1                            | 82,1                        | 36,0                             |
| 5    | 20  | 7,667                                                             | 240                                                      | 40,0                           | 30,8                              | 75,0                            | 18,8                            | 115,0                       | 49,5                             |
| 6    | 26  | 9,667                                                             | 312                                                      | 60,5                           | 46,5                              | 101,4                           | 25,4                            | 161,9                       | 71,9                             |
| 7    | 29  | 10,667                                                            | 348                                                      | 85,9                           | 66,1                              | 117,2                           | 29,3                            | 203,1                       | 95,4                             |
| 8    | 31  | 11,333                                                            | 372                                                      | 113,4                          | 87,2                              | 133,3                           | 33,3                            | 246,7                       | 120,5                            |
| 9    | 35  | 12,667                                                            | 420                                                      | 142,2                          | 109,4                             | 142,6                           | 35,6                            | 284,8                       | 145,0                            |
| 10   | 33  | 12,000                                                            | 396                                                      | 174,2                          | 134,0                             | 148,3                           | 37,1                            | 322,5                       | 171,1                            |
| 11   | 35  | 12,667                                                            | 420                                                      | 204,2                          | 157,0                             | 148,3                           | 37,1                            | 352,5                       | 194,1                            |
| 12   | 35  | 12,667                                                            | 420                                                      | 235,6                          | 181,3                             | 157,0                           | 39,2                            | 392,6                       | 220,5                            |
| 13   | 39  | 14,000                                                            | 468                                                      | 266,9                          | 205,3                             | 169,9                           | 42,5                            | 436,9                       | 247,8                            |

**Tabela 6 – Resistência geotécnica das estacas pela Sondagem SM-2 segundo Método Decourt-Quaresma.**

| Cota | SPT | $\beta \times$<br>(N <sub>SPT</sub> /3+1)<br>(tf/m <sup>2</sup> ) | $\alpha \times C \times N_{SPT}$<br>(tf/m <sup>2</sup> ) | Resistência<br>lateral<br>(tf) | Resist.<br>Lateral<br>adm<br>(tf) | Resistência<br>de ponta<br>(tf) | Resist.<br>Ponta<br>adm<br>(tf) | Capacidade<br>total<br>(tf) | Capacidade<br>admissível<br>(tf) |
|------|-----|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| 1    | 6   | 0,300                                                             | 6,05                                                     | 7,2                            | 5,5                               | 21,8                            | 5,4                             | 29,0                        | 11,0                             |
| 2    | 5   | 0,267                                                             | 6,6                                                      | 14,4                           | 11,1                              | 23,8                            | 5,9                             | 38,2                        | 17,0                             |
| 3    | 7   | 0,333                                                             | 8,8                                                      | 20,4                           | 15,7                              | 31,7                            | 7,9                             | 52,1                        | 23,6                             |
| 4    | 12  | 0,500                                                             | 13,57                                                    | 28,8                           | 22,2                              | 48,8                            | 12,2                            | 77,6                        | 34,4                             |
| 5    | 18  | 0,700                                                             | 19,43                                                    | 42,0                           | 32,3                              | 70,0                            | 17,5                            | 112,0                       | 49,8                             |
| 6    | 23  | 0,867                                                             | 28,23                                                    | 60,5                           | 46,5                              | 101,6                           | 25,4                            | 162,1                       | 71,9                             |
| 7    | 36  | 1,300                                                             | 35,57                                                    | 83,1                           | 63,9                              | 128,0                           | 32,0                            | 211,1                       | 95,9                             |
| 8    | 38  | 1,367                                                             | 41,07                                                    | 117,0                          | 90,0                              | 147,8                           | 37,0                            | 264,9                       | 127,0                            |
| 9    | 38  | 1,367                                                             | 46,2                                                     | 152,1                          | 117,0                             | 166,3                           | 41,6                            | 318,4                       | 158,6                            |
| 10   | 50  | 1,767                                                             | 50,6                                                     | 186,7                          | 143,6                             | 182,2                           | 45,5                            | 368,8                       | 189,1                            |
| 11   | 50  | 1,767                                                             | 55                                                       | 231,4                          | 178,0                             | 198,0                           | 49,5                            | 429,4                       | 227,5                            |
| 12   | 50  | 1,767                                                             | 55                                                       | 275,8                          | 212,1                             | 198,0                           | 49,5                            | 473,8                       | 261,6                            |
| 13   | 50  | 1,767                                                             | 55                                                       | 319,8                          | 246,0                             | 198,0                           | 49,5                            | 517,8                       | 295,5                            |

Para as cargas de trabalho das estacas, os métodos semiempíricos resultam nos embutimentos descritos na Tabela 7. Por conta da proximidade dos furos de sondagem com os apoios, considerou-se a SM-1 no Apoio 1 e a SM-2 para os demais.

**Tabela 7 – Resultados do dimensionamento geotécnico.**

| Linha de Apoio | Carga de Trabalho (tf) | Sondagem aplicável | Aoki-Velloso    |                       | Decourt-Quaresma |                       |
|----------------|------------------------|--------------------|-----------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
|                |                        |                    | Embutimento (m) | Carga admissível (tf) | Embutimento (m)  | Carga admissível (tf) |
| Apoio 1        | 131,4                  | SM-1               | 7               | 134,9                 | 9                | 145,0                 |
| Apoio 2        | 124,2                  | SM-2               | 8               | 129,7                 | 8                | 127,0                 |
| Apoio 3        | 124,6                  | SM-2               | 8               | 129,7                 | 8                | 127,0                 |

## Cravabilidade

O terreno é composto por solo argiloso de compactidade crescente conforme a profundidade. Ambas as sondagens mostram uma homogeneidade entre a natureza das camadas, sendo as superiores compostas por solos aluveonares seguidas por solos residuais. Os boletins de sondagem mostram ausência de matacões e que a camada rochosa é profunda, começando a partir de 20m. Este padrão nas condições geotécnicas corroboram a aplicação de estacas pré-moldadas.

No entanto, o resultado dos métodos semiempíricos mostrou a necessidade de embutimento das estacas em camada com  $N_{SPT}$  maior que 30, fato que pode causar danos às estacas quando alcançarem solo com esta compactidade na cravação. Frente a isto, assumiu-se este horizonte como limite do embutimento em oposição a previsão dos métodos semiempíricos.

Em contrapartida, indicou-se em projeto a necessidade de verificação da capacidade das estacas através de provas de carga dinâmicas, assumindo o risco de constatar incapacidade e de revisar o projeto de fundação em fase de obra com aumento do número estacas.

O Anexo E da NBR 6122:2022 determina os seguintes critérios para a cravação:

- (1) Peso do martelo seja no mínimo igual a 75% do peso total da estaca;
- (2) Peso do martelo igual ou superior a 40 kN (4tf) para estacas com carga de trabalho entre 0,7 MN (70tf) e 1,3 MN (130 tf);
- (3) Para estacas cuja carga de trabalho seja superior a 1,3 MN (130 tf), a escolha do sistema de cravação deve ser previamente analisada.

Segundo o critério (1), considerando elemento pré-fabricado com 10m de comprimento, o peso do martelo deve ter peso mínimo de:  $75\% \times 10m \times 417 \text{ kg/m} = 3.128 \text{ kg} = 3,1 \text{ tf}$ .

Admitiu-se que o peso do martelo deve possuir peso superior a 4 tf para atender aos critérios (2) e (3), visto que a carga de trabalho das estacas é ligeiramente superior a 130 tf.

Foi adotado martelo com peso de 6,0tf e altura de queda de 70cm. Com isso, calculou-se nega de 20mm para 10 golpes a partir da Fórmula dos Holandeses (Velloso, D. A., Lopes, F. R., 2010):

$$\frac{W^2 h}{W + P} = R s$$

W é o peso do martelo;  
H é a altura de queda;  
P é o peso da estaca;

R é a carga admissível com aplicação de fator de segurança igual a 10;  
s é a nega de um golpe.

## Campanha de provas de carga

Por se tratar de um viaduto com vão superior a 30m é obrigatória a realização de ensaio de carga conforme estabelece o item 9.2.2.1 da NBR6122:2022. A obra possui 38 estacas, sendo necessária a execução de uma prova de carga estática. Como possibilitado no item 9.2.2.3 da NBR6122:2022 para o número de estacas da obra, este ensaio foi substituído por provas de carga dinâmicas.

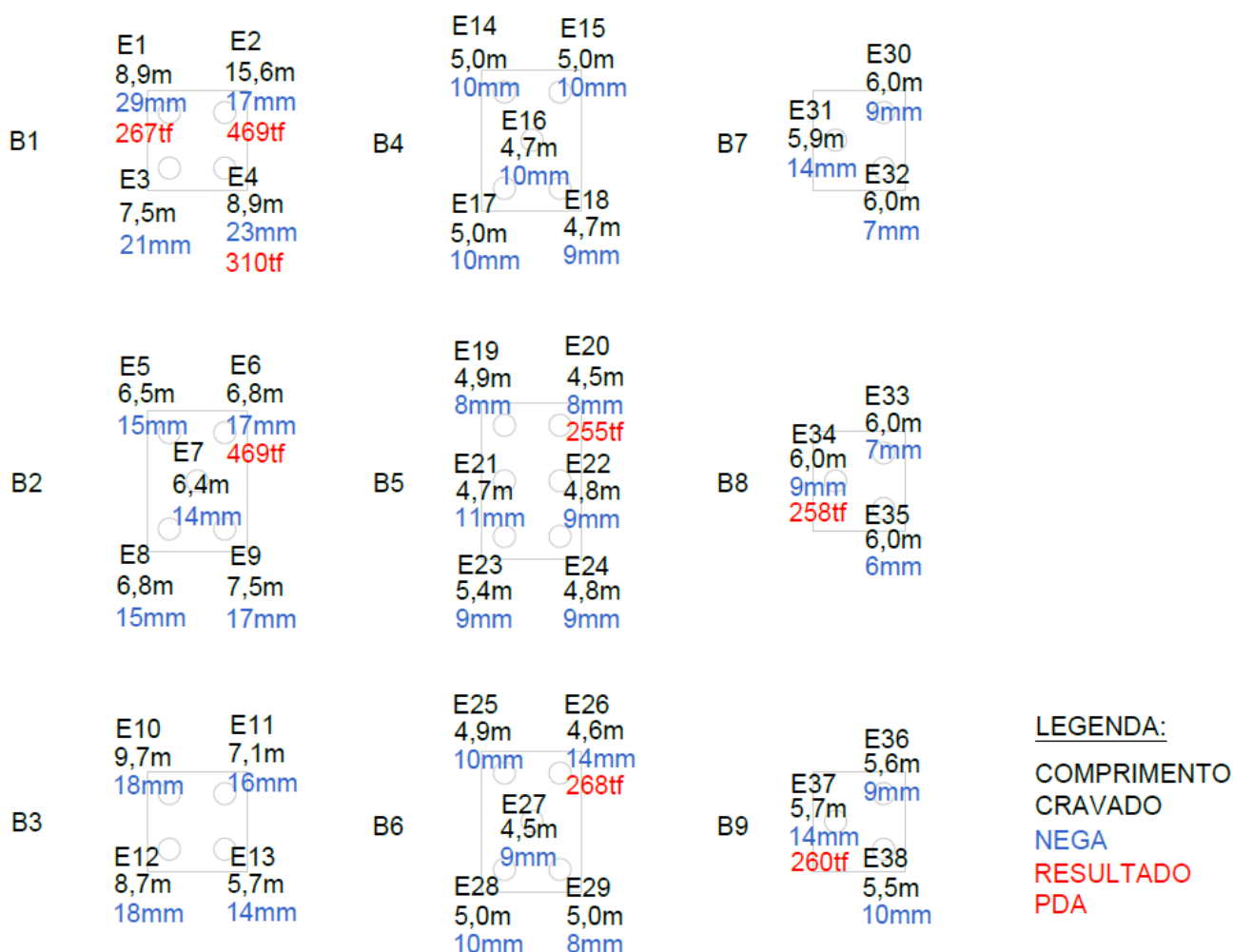
A primeira estaca cravada, a estaca E2, alcançou embutimento de 15,6m, quando obteve nega de 17mm para 10 golpes. Como o embutimento foi maior que o previsto tanto pelo horizonte das camadas de alta compactidade e quanto pelos métodos semi-empíricos para atingir a nega de projeto (20mm), realizou-se um ensaio de PDA para aferir a resistência gerada por essa cravação, em que se verificou resistência geotécnica  $P_k$  de 469 tf. Aplicando-se fator de segurança igual a 2,0, a carga admissível da estaca  $P_{adm}$  é de 234,5 tf.

Visto que a carga admissível desta estaca é 74% superior ao necessário, alterou-se o critério de nega para 30mm em 10 golpes no intuito de adequar a cravação para a carga de trabalho.

A segunda estaca cravada, a E1, atingiu embutimento de 9m e nega de 29mm para 10 golpes. Realizou-se um novo ensaio em que se verificou capacidade de 267 tf ( $P_{adm} = 133,5$  tf).

De modo a confirmar o comportamento, realizou-se um ensaio PDA na estaca E4, terceira estaca cravada, que obteve 8,9m de embutimento, 23mm de nega e carga resistente de 310 tf ( $P_{adm} = 155$  tf).

A partir daí, seguiu-se a seguinte campanha: prova de carga de uma estaca em dois blocos para cada apoio, obtendo-se os resultados apresentados na Figura 6. Foram realizados 8 ensaios PDA cumprindo o critério da NBR6122:2022 e da análise de cravabilidade.



**Figura 6 – Resumo dos embutimentos, negas e ensaios dinâmicos**

## Produtividade de execução da fundação

A cravação das estacas foi dividida em duas campanhas: uma da estaca E1 à E13 (após a ferrovia) e outra da estaca E14 à E38 (antes da ferrovia). A primeira ocorreu de 25/09 a 02/10. Sua duração foi impactada pelos ensaios PDA e do processo de calibração da nega, pois envolveu a agenda de uma empresa terceira para a execução destes serviços. Na segunda campanha, foram cravadas 25 estacas em três turnos de trabalho: manhã do dia 11/11 e manhã e tarde do dia 13/11. As Figuras 7 a 10 apresentam as atividades.



**Figura 7 – Cravação da Estaca E9 [Apoio 1]**



**Foto 8 – Cravação estaca E24 [Apoio 2]**



**Figura 9 – Cravação das estacas do Apoio 3**



**Figura 10 – Execução dos ensaios PDA**

## Conclusão

Este artigo apresenta o estudo realizado na definição da fundação em estaca pré-moldada  $\varnothing 60\text{cm}$  cravadas por percussão do Viaduto de Coruputuba, abordando a utilização de métodos semiempíricos, a cravabilidade das estacas e a campanha de ensaios tipo PDA realizada.

Por alcançar camadas com  $N_{\text{SPT}}$  maior que 30, conferindo risco por danos na cravação das estacas, não se considerou o embutimento previsto pelos métodos semiempíricos em projeto. Em contrapartida, indicou-se a obrigatoriedade de acompanhamento com ensaios dinâmicos tipo PDA para confirmação da capacidade de carga.

Na cravação da primeira estaca, o embutimento ultrapassou significativamente o valor esperado até atender o critério de nega previsto (20mm/10 golpes), quando foi realizada uma calibração deste critério baseada em ensaios PDA.

Uma vez ajustado o valor da nega (30mm/10 golpes), a cravação das estacas seguiu com o acompanhamento de ensaios PDA sem dificuldade no atendimento da nega e da carga de projeto.

A produtividade da segunda campanha de cravação foi de 25 estacas entre os dias 11 e 13/11. A produção efetiva ocorreu em três turnos de trabalho. Ao todo foram cravadas 130m de estaca nesta campanha.

Com base na experiência desta obra, sugere-se os seguintes pontos em projetos com uso semelhante de estacas pré-moldadas:

1. A calibração da nega na cravação das primeiras estacas através de ensaios dinâmicos para confirmação da capacidade de carga;
2. De posse desta calibração, pode-se fazer uso da nota *d* da Tabela 6 da NBR 6122:2022: “*As provas de carga executadas exclusivamente para avaliação de desempenho devem ser levadas até que se atinja pelo menos duas vezes a carga admissível ou até que se observe um deslocamento que caracterize ruptura. Caso exista prova de carga prévia, as provas de carga de desempenho devem ser levadas até que se atinja pelo menos 1,6 vezes a carga admissível ou até que se observe um deslocamento que caracterize ruptura.*”. A calibração caracteriza-se como prova de carga prévia, permitindo a adoção de coeficiente de segurança de 1,6 no cálculo da carga admissível.
3. Para melhor aproveitamento da empresa executora dos ensaios PDA, pode-se planejar a aferição das cargas resistentes em estacas previamente cravadas com diferentes negas. A cravação das estacas restantes seguirá o critério estabelecido através do resultado da curva nega x carga resistente. As estacas usadas na calibração com valor de nega mais alta serão recravadas para atendimento do critério estabelecido e aproveitamento delas.
4. Deve-se considerar que variações entre valores de nega e das cargas resistentes são normais, como mostrado na Figura 6. Por exemplo, a estaca E20 possui nega de 8mm e carga resistente de 255 tf; a estaca E26, nega de 14mm e carga resistente de 268tf. Os embutimentos das estacas são de 4,5 e 4,6m, respectivamente. Em tese, a carga resistente da estaca E20 teria que ser maior que a da estaca E26.
5. Apesar do risco de incapacidade da carga resistente e de revisão do projeto de fundação em fase de obra, pode-se assumir a possibilidade de atingir a resistência necessária no toque da estaca com camada de  $N_{\text{SPT}}$  maior ou igual a 30 desde que amparado por verificação através de provas de carga – análise de cravabilidade. Para isto, recomenda-se o uso de seções com áreas relativamente altas para a carga de trabalho, dada a importância da resistência de ponta nesta condição. Neste exemplo, a seção vazada da estaca pré-moldada suporta 389 tf enquanto a carga de trabalho é de 130tf, ou seja, um terço da capacidade dos materiais constituintes da estaca.

## **Referências**

ABNT NBR 6122, 2022. Associação Brasileira de Normas Técnicas – Projeto e Execução de Fundações. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 6118, 2023. Associação Brasileira de Normas Técnicas – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro.

Cintra, J. C. A; Aoki, N. Fundações por estacas: projeto geotécnico. Oficina de Textos. São Paulo, 2010.

Velloso, D. A., Lopes, F. R. Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas. Oficina de Textos. São Paulo, 2010.