



## GRUPO – VIII

### GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

#### METODOLOGIA DE REDUÇÃO DE CUSTOS DE FUNDAÇÕES EM OBRAS DE SUBESTAÇÕES

Rafael de Barros Aranha Piccolo(\*)  
AES ELETROPAULO

Diego dos Reis Vasconcelos  
AES ELETROPAULO

Rogério Alencar Bimbato Rocha  
AES ELETROPAULO

## RESUMO

A aplicação da metodologia DMAIC (Define, Measure, Analyse, Improve e Control) é uma proposta viável para promover a melhoria contínua na construção de subestações. Nesse contexto a subestação ETD Granja Viana teve seu projeto de fundações elaborado continuamente. Esse método consistiu em considerar a variabilidade do ensaio de sondagem SPT, realização de ensaios de fundações e controles técnicos conforme exigido NBR 6122/2010. A partir dos resultados o projeto de fundações foi revisado ciclicamente durante a execução da obra gerando uma economia de mais de um milhão de reais.

## PALAVRAS-CHAVE

Subestação, Fundações, Projeto Civil, Sondagem SPT, Geotecnia

### 1.0 - INTRODUÇÃO

Os equipamentos da subestação possuem conexões elétricas que precisam estar fixas e estáveis para garantir o funcionamento adequado e a distribuição de energia. Assim, os projetistas não admitem deslocamentos em suas bases, nesse sentido, para evitar essa condição acabam superdimensionando as estruturas e fundações. Do outro lado da moeda, construção de novas subestações que implicam na expansão do sistema devem respeitar regras regulatórias de forma a caracterizar seus investimentos como sendo prudente e de baixo risco de glosa. Portanto, em obras de subestações devem ser observados critérios técnicos, econômicos, regulatórios e ambientais.

Nas fundações de subestações da AES Eletropaulo comumente aplicam-se estacas pré-moldadas de concreto armado com um dimensionamento arquetipo que pode fazer com que os custos de bases de equipamentos cheguem a até 30% do custo total de serviços para executar uma subestação. Antes da implantação da metodologia DMAIC na ETD Granja Viana, os custos de execução das fundações variaram entre 8% a 30% do custo total de serviços em seis obras progressivas analisadas. O **DMAIC** é o acrônimo, em inglês, para *define, measure, analyze, improve e control* (definir, medir, analisar, melhorar e controlar). Fundamentalmente, essa metodologia tem o objetivo de programar uma estratégia baseada em medições substanciadas na melhoria de processos e redução de variabilidade.

Ademais todos os projetos de fundações desenvolvidos na AES Eletropaulo foram elaborados exclusivamente a partir de ensaios de penetração dinâmica - Standard Penetration Test<sup>®</sup> (SPT). Esse é o ensaio mais difundido e utilizado no Brasil para projeto de fundações, no entanto, ele é objeto de falhas crônicas no processo de execução e isso ocorre em função do estado de conservação dos equipamentos, variação na energia de cravação e procedimentos padronizados que não são seguidos conforme o que está especificado na ABNT NBR 6484. ROCHA et al. (2015), desenvolveram um trabalho que buscou avaliar a variabilidade dos resultados de ensaios SPT no Campo Experimental de Fundações da Escola de Engenharia de São Carlos (USP – São Carlos). Eles executaram dezessete sondagens realizadas por quatro empresas diferentes e em seguida compararam os resultados a cada metro de profundidade, para todas as empresas (Geral) versus cada uma delas isoladamente. Eles obtiveram um coeficiente de variação (CV) médio de 37% entre os resultados.

(\*)Av. Dr. Marcos Penteado de Ulhoa Rodrigues, 939 - 3º andar – Torre Jatobá – CEP 06460-040 Barueri, SP-Brasil - Tel: (+55 11) 2195-5851 – Fax: (+55 11) 2195-5739 – Email: rafael.piccolo@aes.com

O ensaio de sondagem SPT é a essência do projeto de fundação, pois a partir dele as resistências e características do solo são obtidas e então podem ser usadas para dimensionar os elementos de fundação. O dimensionamento é usualmente realizado a partir de métodos semi-empíricos mais difundidos na área de geotecnia. Por outro lado, apesar de usar os melhores métodos de cálculo, ainda assim apresentam imprecisões com a realidade.

Dada à variabilidade do ensaio de sondagem e as incertezas dos métodos de cálculo, vale salientar que a ABNT NBR 6122, 2010 estabelece no seu item primeiro (Escopo) o seguinte: *“Reconhecendo que a engenharia de fundações não é uma ciência exata e que riscos são inerentes a toda e qualquer atividade que envolva fenômenos ou materiais da natureza os critérios e procedimentos constantes nesta Norma procuram traduzir o equilíbrio entre condicionantes técnicos, econômicos e de segurança usualmente aceitos pela sociedade na data da sua publicação”.*

Portanto, o uso de ensaios SPT para a elaboração do projeto deve ser considerado com caráter de pré-dimensionamento, principalmente em função dos resultados poderem ser diferentes com a realidade. Nesse sentido, o projeto de fundação deve ser retificado ou ratificado a partir de controles tecnológicos e ensaios de fundações conforme requisitos técnicos da ABNT NBR 6122.

## 2.0 - ESTAÇÃO TRANSFORMADORA DE DISTRIBUIÇÃO ETD GRANJA VIANA

A ETD Granja Viana é do tipo convencional barra dupla conectada aos dois circuitos do Ramal Subterrâneo Granja Viana 1-2. Os principais equipamentos que a caracterizam são: um conjunto de terminais de cabos de 145 kV, um conjunto de para-raios de 88/138 kV, uma seccionadora de acionamento manual de 88/138 kV, um conjunto de TP de 145 kV, um conjunto de TC de 145 kV, um disjuntor isolado a gás SF6 de 145 kV em cada circuito ligados a 03 transformadores de 32/40 MVA, 138/88 – 13,8 kV.

A referida estação está localizada na Estrada da Fazendinha, próximo à Av. São Camilo, em Carapicuíba. Esse empreendimento faz parte do planejamento de expansão da AES Eletropaulo que integra um complexo que conta com 3,5 km de linhas de transmissão subterrânea e 12 novos circuitos de distribuição. O total de investimentos é de R\$ 67 milhões e devem ser concluídos no segundo semestre de 2018. As obras irão beneficiar mais de 150 mil clientes dos municípios de Barueri, Carapicuíba, Cotia, Itapevi, Jandira e Osasco. O escopo da metodologia DMAIC (Define/Definir) consistiu em reduzir os custos e aumentar a confiabilidade das fundações da subestação ETD Granja Viana.

### 2.1 Projeto de Fundações Original

O projeto de fundações existente contava com 296 estacas, das quais 227 eram do tipo Pré-moldadas de Concreto aplicadas nas bases de equipamentos e 69 estacas tipo Hélice Contínua para o edifício de comando. Alerta-se que o projeto original contava com comprimentos de estacas padronizados, pois as 96 estacas dos para-raios, seccionadores, disjuntores e banco capacitores tinham seis metros de comprimento. Já as 136 estacas das colunas de barramento, transformadores e parede corta-fogo tinham 20 metros de comprimento. E por fim, as estacas tipo Hélice Contínua tinham 17 metros de comprimento apesar das cargas do edifício de comando serem variáveis, transferindo diferentes esforços para cada estaca. Esse projeto original contava com 4433 metros lineares de fundação.

### 2.2 Projeto de Fundações revisado a partir de novos ensaios SPT

O projeto original foi revisado antes da contratação tanto para de otimizar os comprimentos dos elementos de fundação no tocante às especificidades do terreno, bem como o fato da campanha de sondagens ter sido executada em 2011. É famigerado que o teor de umidade e efeito de adensamento do solo ao longo do tempo influenciam nos resultados de sondagem SPT e, por conseguinte no dimensionamento das fundações. Portanto em 2015 foi realizada uma nova campanha a partir da execução de quatro sondagens sendo duas na região dos transformadores e duas adjacentes ao edifício de comando. A realização das sondagens adicionais fez parte das ações da metodologia DMAIC que objetivou Medir (*Measure*) a resistência do solo nessas regiões específicas do terreno de implantação do empreendimento.

As estacas tipo Hélice Contínua foram substituídas por Pré-moldadas. Nesse sentido foi possível economizar na mobilização do equipamento de execução de Hélice Contínua. As estacas Pré-moldadas de Concreto convencional foram substituídas por estacas Pré-moldadas de Concreto **Protendido**. Na prática, as estacas protendidas

alcançam a mesma capacidade de carga das convencionais usando uma área de seção menor e sendo uma alternativa potencialmente mais econômica. Por ser mais esbelta carece de um comprimento maior de cravação para atingir a mesma capacidade de carga. Mesmo assim, é vantajosa, pois na maioria dos solos a resistência cresce ao longo da profundidade, portanto estacas mais esbeltas e profundas aproveitam melhor a resistência natural do solo do que estacas largas e curtas. A substituição das estacas é, portanto uma questão de eficiência e aproveitamento.

Apesar da utilização de estacas mais esbeltas o comprimento de cravação geral do empreendimento foi reduzido de 4433 metros para 3888 metros de estacas protendidas. Isso se deve principalmente em função de três razões principais:

- Os ensaios de sondagem adicionais permitiram caracterizar melhor o terreno;
- O dimensionamento dos elementos de fundação foi elaborado a partir da média dos resultados das sondagens de regiões próximas e isso aperfeiçoou o projeto gerando comprimentos variáveis em função da resistência do solo setorial;
- Apesar das estacas de concreto protendido precisarem de um comprimento maior de cravação em comparação com estacas de concreto armado convencional, em termos de volume, ficou 25% menor do que o projeto original. Isso se deve principalmente porque o solo é mais resistente nas camadas mais profundas.

A análise dos ensaios de sondagem SPT através do fracionamento do terreno por regiões consistiu na aplicação da fase de analisar (*Analyze*) da metodologia DMAIC. A etapa seguinte denominada *Improve* (melhorar) corresponde na atividade de revisão do projeto descrita nesse item. E finalmente, o passo seguinte de controlar (*Control*), está associado aos ensaios de fundações e controles tecnológicos que tiveram a função de confirmar o dimensionamento realizado.

### 2.3 Ensaios de Fundações

De acordo com o item 9.2.2 da NBR 6122 são obrigatórios ensaios de fundações a partir de 100 estacas pré-moldadas em um empreendimento. Em função disso ficou definida a realização de um ensaio de Prova de Carga Estática e 10 ensaios de Prova de Carga Dinâmica.

#### 2.3.1 Ensaios de Prova de Carga Dinâmica (PDA).

O ensaio de Prova de Carga Dinâmica consiste sumariamente na instalação de sensores no fuste da estaca interligados a um computador. São usados dois pares de sensores, instalados em faces opostas da estaca. O primeiro par são dois transdutores de deformação que têm a função de medir a deformação sofrida pelo concreto. Já o segundo par são acelerômetros que têm a função de medir a aceleração das partículas da estaca. Esses sensores são interligados a um computador e com o auxílio do Software é possível obter dados da energia transferida no elemento de fundação a partir do golpe do martelo do bate estaca. Transpassa-se uma onda de choque que passa pelos sensores e percorre a estaca até a ponta, em seguida retorna aos sensores devido à reação do solo. Assim é possível obter a capacidade de carga da estaca indiretamente através do cálculo da quantidade de energia envolvida nesse processo. Além disso, esse ensaio identifica se a peça de concreto possui alguma anomalia como trinca, fissura ou falha na solda por exemplo. Na figura 1 é possível observar o ensaio PDA que foi realizado na estaca EC-154: Instalação dos sensores, manipulação dos dados em Software e resultados obtidos após processamento dos dados.

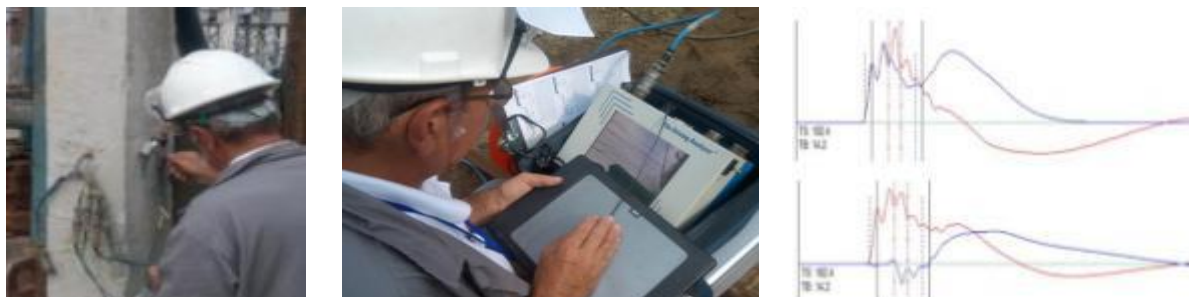


Figura 1 - Ensaio de Prova de Carga Dinâmica na estaca EC-154

A metodologia DMAIC é cíclica, portanto os resultados da última etapa de checagem podem ser considerados na fase de medir (*Measure*) em um novo ciclo de melhoria contínua, e assim serem aprimorados novamente.

Nesse sentido, a segunda revisão do projeto foi concebida em função dos resultados satisfatórios dos primeiros dois ensaios PDA realizados nas estacas EC-154, EC-164 e respectivos controles de cravação preenchidos nas fichas de verificação de serviço FVS. Ademais, outros fatores foram preponderantes para essa retificação:

- As negas das estacas executadas apresentaram valores entre 1,0 cm e 1,5 cm para 10 golpes;
- Algumas estacas não alcançaram o comprimento de cravação: EC-36, EC-40, EC-48, EC-67;
- Duas estacas apresentam ruptura durante a cravação EC-112 e ED-17;

Essas evidências podem apontar duas causas:

- O solo arenoso do terreno da subestação podia estar dificultando a cravação das estacas;
- Os ensaios de sondagem das campanhas realizadas até o momento (2011 e 2015) não representavam a realidade do solo.

Esses fatos motivaram a realização da terceira campanha de sondagem (2016) e a redução do comprimento de cravação projetado. O comprimento de estacas do empreendimento foi reduzido novamente passando de 3888 metros para 3289 metros.

Neste novo ciclo de melhoria contínua define-se: Medir (*Measure*): Ensaios PDA e controles de cravação; Analisar (*Analyze*): corresponde na análise do resultado dos ensaios PDA e características das cravações; Melhorar (*Improve*): Revisão do projeto e execução das fundações redimensionadas. Controlar (*Control*): está associado ao ensaio de prova de carga estática que é capaz de medir a capacidade de carga da fundação de forma direta.

### 2.3.2 Ensaio de Prova de Carga Estática (PCE – tipo lento).

O ensaio de Prova de Carga Estática consistiu em executar a montagem de um sistema de reação a partir de vigas metálicas e estacas adicionais. Esse sistema foi dimensionado para suportar o macaqueamento da estaca ensaiada. O macaco foi acionado manualmente aplicando-se estágios progressivos de tensão, mormente a verificação da pressão exercida na cabeça da estaca. Essa pressão foi convertida em toneladas para estabelecer relação com a capacidade de carga da estaca. A partir de quatro extensômetros foi possível medir o deslocamento em função do carregamento e assim obter diretamente a capacidade de carga da estaca no solo em questão. Na figura 2 é possível observar o ensaio PCE que foi realizado na estaca EC-148: Estaca de reação, sistema de reação montado e macaco com capacidade de 100 tf.



Figura 2 - Ensaio de Prova de Carga Estática na estaca EC-148

De acordo com o item 6.2.1.2.2 da NBR 6122, no caso de provas de carga executadas na fase de adequação do projeto, o fator de segurança da carga admissível pode ser reduzido de 2,0 para 1,6, desde que a estaca ensaiada apresente resultado satisfatório com uma carga de ensaio duas vezes à carga admissível de projeto. Na tabela 1 é possível verificar que a estaca ensaiada pronunciou um deslocamento de 16,79 mm na carga máxima de 60,4 tf (604 kN).

Tabela 1 – Quadro Resumo do Ensaio de Prova de Carga Estática

Prova de Carga	Estaca	Seção (cm)	Comp. Ensaiado (m)	Carga Admissível (kN)	Carregam. Máximo (kN)	Desloc. Máximo (mm)	Desloc. Residual (mm)
PCC-01	EC-148	19,5 x 19,5	12,70	300	604	16,79	11,71



O principal produto que se obtém no ensaio de prova de carga estática é chamado de curva carga x recalque. Consiste na representação gráfica dos deslocamentos da estaca em função de cada modificação de carregamento. Na figura 3 é possível verificar os deslocamentos da estaca em todos os 14 estágios de carregamento, sendo 10 para acréscimo e quatro para decréscimo de carga.

Inicialmente aplicou-se 60 kN obtendo 0,31 mm de deslocamento imediatamente após o emprego da carga. Seguidamente foram feitas leituras ao longo do tempo conforme o padrão da norma: 2, 4, 8, 15, 30 (minutos), 1h, 2h, e de hora em hora contatos a partir do início do estágio até se atingir a estabilização. A estabilização é atendida quando a diferença entre duas leituras consecutivas corresponder a no máximo 5% do deslocamento anterior. Esse critério foi atendido com 0,33 mm de deslocamento em um dado tempo conforme sequencia mencionada anteriormente. Esse processo foi repetido até o décimo e último estágio de carregamento. O descarregamento foi feito em quatro estágios seguindo o mesmo critério de estabilização, porém dessa vez considerando 15 minutos como tempo mínimo para cada estágio.

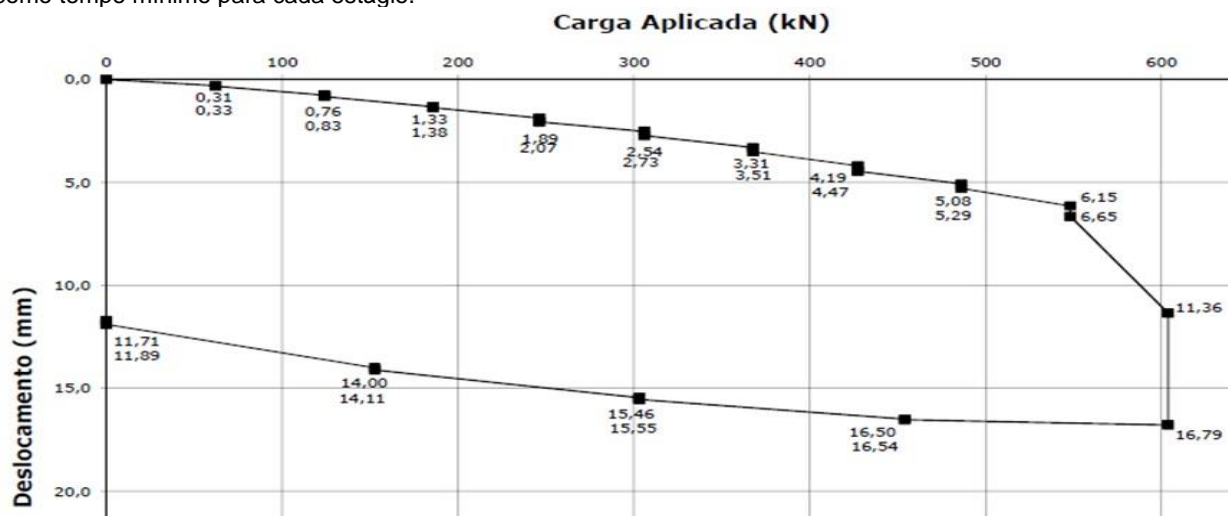


Figura 3 – Curva Carga x Deslocamento da estaca EC-148

Verifica-se que no último estágio de carregamento o deslocamento passou de 11,36 mm para 16,79 mm durante o período de estabilização da carga de 604 kN. Essa movimentação expressiva é um indicio de que houve ruptura do sistema estaca-solo e para confirmar isso foram aplicados métodos de extrapolação da curva carga x recalque com o fito de identificar a carga de ruptura. A NBR 6122 em seu item 8.2.1.1 estabelece uma metodologia para essa análise, no entanto, ela não é aplicável para todos os formatos de curva. Nesse caso em questão foram feitos quatro métodos consagrados na literatura conforme apresentado na figura 4. Dentre os quatro métodos utilizados escolheu-se o resultado obtido pela aplicação de Aoki (1976).

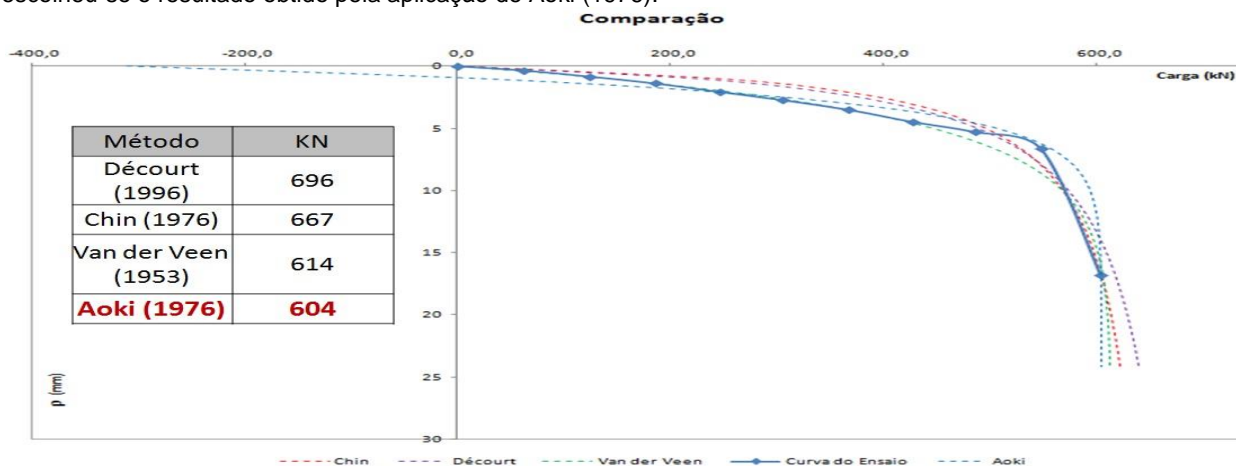


Figura 4 – Extrapolação da Curva Carga x Deslocamento da estaca EC-148

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

A carga admissível dessa estaca era de 300 KN e a partir do desempenho obtido no ensaio foi possível recalculando o dimensionamento das demais estacas da subestação passando o atual fator de segurança de 2,0 para 1,6. Portanto, foi possível aplicar a redução correspondente a 20% em termos de capacidade de carga e economia. Essa análise permitiu reduzir novamente o comprimento das estacas sendo que o total geral passou de 3289 metros para 2958 metros.

Neste novo ciclo de melhoria contínua define-se: Medir (*Measure*): Realização do ensaio PCE; Analisar (*Analyze*): corresponde na análise do resultado do ensaio PCE e critérios normativos; Melhorar (*Improve*): Revisão do projeto e execução das fundações redimensionadas. Controle (*Control*): está associado ao controle tecnológico, verificação da nega e repique, e ensaios de sondagem durante a execução da obra.

### 2.3.3 Controle tecnológico de cravação.

De acordo com o Anexo D da NBR 6122, deve ser feito registros de execução de cada estaca cravada como, por exemplo, a identificação do elemento, comprimento, peso do martelo e outras informações. Entre todos os registros requeridos, a verificação da nega e repique é a mais relevante permitindo inclusive sua aplicação em métodos de cálculo que relacionam essas características com a provável capacidade de carga da estaca. Em tese, cada estaca cravada é ensaiada por meio da verificação de nega e repique. A nega corresponde ao deslocamento da estaca em função de um golpe. Na prática, como essa distância é tão pequena, opta-se por executar 10 golpes e então verifica-se a distância obtida (nega para 10 golpes). A partir disso pode-se dividir a distância por 10 para obter a nega para um golpe.

Em certo momento da cravação a estaca passa a manifestar o efeito do deslocamento elástico do solo, em outras palavras, a cada golpe o elemento descende verticalmente e ascende em uma fração menor. O repique corresponde à diferença dessa parcela que desce e sobe e é medido por meio de um lápis aplicado sobre um papel gerando um gráfico análogo a um eletrocardiograma.

Na figura 5 é possível verificar o registro de execução padrão elaborado pela AES Eletropaulo para obras com fundações de estacas cravadas. Denominada como Ficha de Verificação de Serviço, tem a função de catalogar a nega, repique, dados da estaca, número de golpes e outras informações relevantes conforme requisitos da NBR 6122.

AES Eletropaulo Uma Empresa ABB Brasil				FICHA DE VERIFICAÇÃO DE SERVIÇO CRAVAÇÃO DE ESTACAS				IDENTIFICAÇÃO: PVS / CE	
OBRA:				ELEMENTO CRAVADO:				REVISÃO: 1 PÁG: 1 / 1	
ETD GRANJA VIANA				BASE CL				Empresa Responsável/Executante: SARBRAS ENG.	
AVANÇO (m):	NÚMEROS DE GOLPES	AVANÇO (m):	NÚMEROS DE GOLPES	ESTACA Nº	COTA TERRENO:	SEÇÃO DA ESTACA:	19,5 x 19,5		
00,0 - 00,5		14,50 - 15,00		EC 154	823,40	ALTURA	0,40 m		
00,5 - 1,00	5	15,00 - 15,50		PESO	7 + 7	QUEDA:			
1,00 - 1,50		15,50 - 16,00		MARTELO: 2700 Kg	COMPOSIÇÃO:	NEGA PARA 10 GOLPES:	30 mm		
1,50 - 2,00	5	16,00 - 16,50		CEPO: 36 mm	COMPRIMENTO CRAVADA:	REPIQUE:			
2,00 - 2,50		16,50 - 17,00		ALTURA	12,20				
2,50 - 3,00	6	17,00 - 17,50		CEPO:	1,8				
3,00 - 3,50		17,50 - 18,00		TORTA: 36 mm					
3,50 - 4,00	6	18,00 - 18,50							
4,00 - 4,50		18,50 - 19,00							
4,50 - 5,00	6	19,00 - 19,50							
5,00 - 5,50		19,50 - 20,00							
5,50 - 6,00	12	20,00 - 20,50							
6,00 - 6,50		20,50 - 21,00							
6,50 - 7,00	25	21,00 - 21,50							
7,00 - 7,50		21,50 - 22,00							
7,50 - 8,00	31	22,00 - 22,50							
8,00 - 8,50		22,50 - 23,00							
8,50 - 9,00	40	23,00 - 23,50							
9,00 - 9,50		23,50 - 24,00							
9,50 - 10,00	63	24,00 - 24,50							
10,00 - 10,50		24,50 - 25,00							
10,50 - 11,00	91	25,00 - 25,50							
11,00 - 11,50		25,50 - 26,00							
11,50 - 12,00	147	26,00 - 26,50							
12,00 - 12,50	57	26,50 - 27,00							
12,50 - 13,00		27,00 - 27,50							
13,00 - 13,50		27,50 - 28,00							
13,50 - 14,00		28,00 - 28,50							
14,00 - 14,50		28,50 - 29,00							
				Data: _____ End.: Rua Estrela da Procelândia N°1888 N° 88 Cliente: Bairro: Município: Carapicuíba Estado: SP Projeto: Máquina: _____ Piquete n°: _____ Seção: _____ Composição: _____ Data de repique: _____ Data de cravação: _____ Assinatura do Engenheiro Responsável (CONTRATADA): Assinatura do Fiscal Responsável (ELETROPÁULO):				NF: 31191 OS: 086-07-19	
				OBS: - ALTURA CEPO: - ALTURA TORTA: _____ - Colar o dcalque do cravamento no espaço em branco disponível				DATA DA EXECUÇÃO 22/07/16	

Figura 5 – Ficha de Verificação de Serviço da estaca EC-154

O anexo D8 da NBR 6122 especifica o seguinte: “Há terrenos que têm comportamento de relaxação e outros de cicatrização. Para sua identificação é recomendada a determinação de nega descansada (alguns dias após o término da cravação)”. O solo da ETD Granja Viana manifestou cicatrização do terreno após a cravação, isto é, ganhou de capacidade de carga com o tempo. Isso foi constatado nas estacas EC-5 e EC-40 que foram cravadas

conforme o dimensionamento da última revisão do projeto. Na figura 6 é possível verificar a nega na cravação (10 cm/10 golpes) e a nega descansada (6,5 cm/10 golpes) após 72h de cravação da estaca EC-05. Verifica-se um ganho de resistência que foi confirmado a partir de três métodos de cálculo dos quais foi considerando o Método dos Holandeses para a análise.

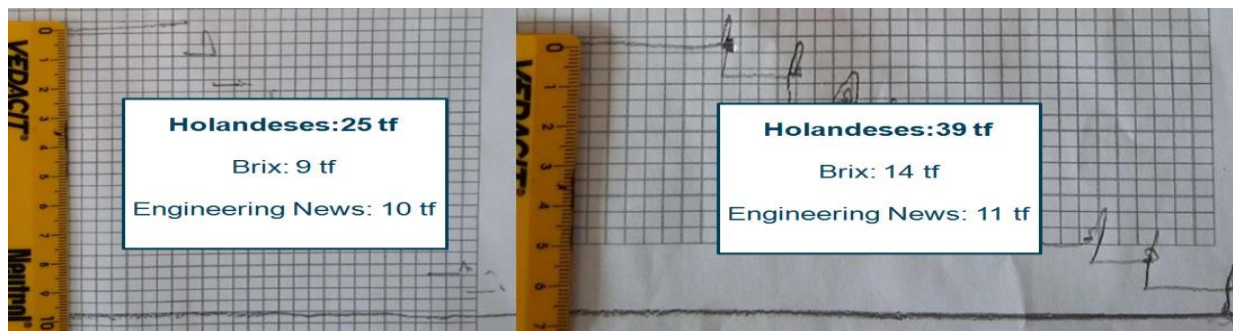


Figura 6 – Nega na cravação e Nega Descansada da Estaca EC-05

### 2.3.4 Ensaio de sondagem SPT durante obra.

Fundamentalmente em obras de empreendimentos que custam milhões não é dispendioso prever ensaios de sondagem SPT adicionais para confirmação das resistências do solo durante a fase de construção.

Em 2016, A empresa contratada pela execução da obra realizou uma nova campanha de sondagens as suas expensas. A referida campanha foi composta por quatro ensaios SPT localizados na região dos transformadores e no centro do edifício de comando. Ambos foram realizados após a execução da terraplenagem na região ensaiada. A realização desse ensaio após a terraplenagem concluída é recomendável, pois a remoção de solo causa desconfinamento e alterações no teor de umidade. Por conta disso, o ensaio de sondagem pode apresentar divergências em comparação com a execução no solo original.

Considerando 604 KN como carga de ruptura obtida através do ensaio PCE na estaca EC-148 foi possível recalcular o seu dimensionamento usando seis diferentes seleções de sondagens em três métodos de dimensionamentos diferentes. Essa técnica tem o objetivo de verificar quais métodos e quais sondagens representam melhor a realidade do solo local, tomando como base que essa realidade corresponde ao resultado do ensaio PCE porque é capaz de medir a capacidade de carga da estaca de forma direta.

A figura 7 apresenta os resultados obtidos. O 1,0 corresponde ao valor de capacidade de carga obtido no ensaio PCE (604 KN) e as barras verdes correspondem a divisão do valor obtido em cada método por 604. Isso gera um resultado que pode ser traduzido em termos de porcentagem. Resumidamente, quanto mais próximo do 1,0 mais preciso foi o método.

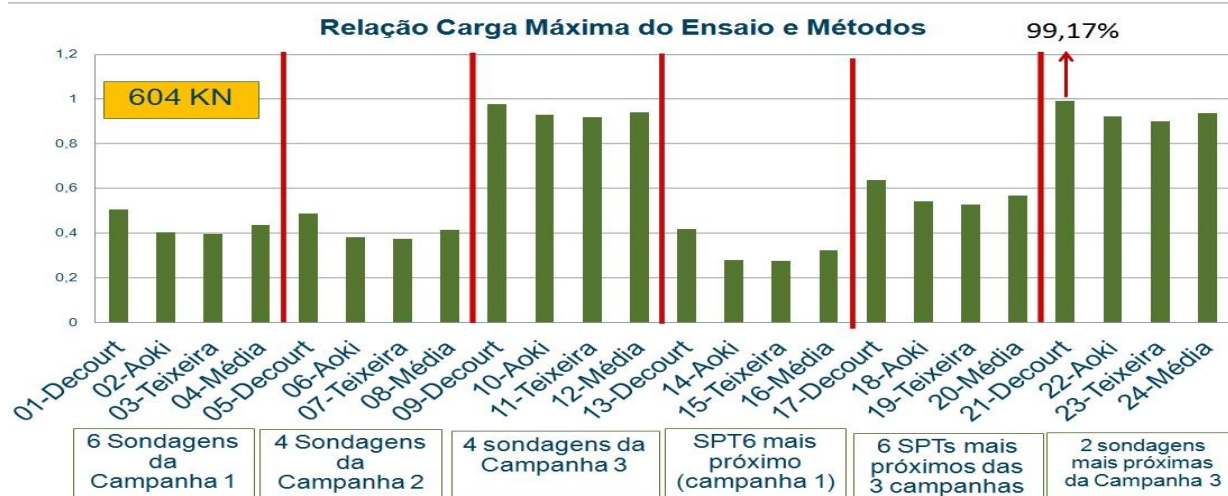




Figura 7 – Relação Carga Máxima dos Ensaios e Métodos de Dimensionamento – Estaca EC-148

Verifica-se que os resultados mais próximos da realidade ocorrem quando se utiliza as sondagens da terceira campanha. O valor obtido na seleção 21 foi de 0,9917, ou seja, 99,17% da prova de carga. O método aplicado nesse caso foi o Decourt para a média das duas sondagens mais próximas dessa estaca resultando em 599 KN (604 x 0,9917) como capacidade de carga dessa estaca.

A partir dessa análise foi possível concluir que as campanhas de sondagem 1 e 2 não se aproximaram satisfatoriamente do valor obtido na prova de carga, no entanto, a campanha 3 se aproximou tanto ao se considerar a média das quatro sondagens ou a média das duas mais próximas e ainda, em qualquer método de cálculo. Na geotecnia entende-se como resultado satisfatório aquele que varia em no máximo 20% do valor obtido na prova de carga. Esse foi o terceiro e último ciclo de melhoria contínua. Através dele foi possível determinar com precisão a melhor forma de dimensionamento das estacas.

### 3.0 - CONCLUSÃO

O projeto de fundação da ETD Granja Viana teve quatro versões: a original e três modificações consubstanciadas por três ciclos de melhoria contínua DMAIC. A execução dos ensaios de fundações nas primeiras estacas cravadas da obra foi de suma importância para permitir a retificação do projeto com brevidade. Os controles tecnológicos também foram de grande valia, pois confirmaram a expectativa na cravação em termos de nega e repique a cada novo dimensionamento. A tabela 2 apresenta o quadro resumo das revisões de projeto. É possível verificar as reduções obtidas em termos de comprimento médio de cravação e comprimento total do empreendimento.

Tabela 2 – Quadro Resumo das revisões de projeto

Tipo de revisão	Quantidade total de estacas (m)	Comprimento médio (m)	Relação (%)
Projeto original (Campanha 1)	4433	15,0	100,0%
Revisão antes da obra (Campanha 1 e 2) – primeiro ciclo DMAIC	3888	13,1	87,7%
Revisão pelos ensaios PDA e controle de cravações – segundo ciclo DMAIC	3313	11,2	74,7%
Revisão pela PCE – terceiro ciclo DMAIC	2958	10,0	66,7%

A aplicação da metodologia descrita nesse trabalho permitiu uma economia de R\$ 1.493.443,27 considerando inclusive as datas de revisão do projeto de fundações. Dentre os elementos fundamentais que promoveram essa economia, destacam-se:

- Refazer a campanha de sondagens em função do tempo, principalmente durante a fase de construção do empreendimento e após a finalização da terraplenagem;
- Manter um controle tecnológico sobre a cravação de todas as estacas por meio de fichas de verificação de serviço. O registro da nega e repique é fundamental nesse controle;
- Refazer a nega de algumas estacas para identificar se o solo tem comportamento de relaxação ou cicatrização ao longo do tempo. Comparar a capacidade de carga da nega na cravação com a nega descansada;
- Realizar os ensaios de fundações nas primeiras estacas da obra para confirmar o dimensionamento do projeto;
- Fazer a extrapolação da curva carga x recalque do ensaio de prova de carga estática e assim obter a carga de ruptura da estaca;
- Redimensionar os comprimentos de estacas após a realização dos ensaios;
- Analisar qual método de cálculo se aproxima mais do resultado obtido na prova de carga;

Esse Informe Técnico tende a romper a fronteira entre o projeto e a execução visando aproximar projetista e executor fomentando a proposta de que o projeto só termina quando se conclui a obra. A adequada interpretação dos resultados de ensaios de fundações é mais fiel com a realidade do desempenho das estacas em comparação com a utilização simplória de ensaios de sondagem SPT e métodos de estimativa de capacidade de carga.

É possível replicar essa metodologia em subestações novas ou em reformas de ativos já existentes aplicando em qualquer concessionária ou empreendedor de obras que fazem uso de fundações. Ademais esse método não



possui custo de investimento, pois todos os ensaios de fundações e controles técnicos realizados foram feitos em atendimento aos requisitos da NBR 6122/2010, nenhum teste adicional foi necessário.

#### 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e execução de fundações – NBR 6122. Brasil.
- (2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo - Sondagens de simples reconhecimentos com SPT - Método de ensaio– NBR 6484. Brasil.
- (3) ROCHA, P. Breno, e.t. al. Considerações sobre a execução e a interpretação de ensaios SPT – SEFE 2015 – Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia.

#### 5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Rafael de Barros Aranha Piccolo nasceu em São Paulo, estado de São Paulo, Brasil, em 25 de Agosto de 1987. Curso de graduação em Engenharia Civil com ênfase em Sistemas Construtivos pela Universidade Federal de São Carlos (2010), pós-graduação em Engenharia da Qualidade pela Universidade Estadual de Campinas (2011), pós-graduação em Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios pela Universidade de São Paulo (2017). Ocupa o cargo de Engenheiro na AES ELETROPAULO, Barueri, São Paulo, Brasil desde 2011, com experiência em projetos e obras de subestações e linhas de transmissão. Possui formação em Lean Six Sigma Green Belt pela conclusão do projeto APEX de melhoria contínua: *"Redução de Custos de Fundações em Obras de Subestações"*, trabalho vencedor do Evento de Reconhecimento APEX em 2016 na AES Eletropaulo.



Diego dos Reis Vasconcelos, nasceu em Mococa, São Paulo, em 1986. Ele recebeu o a qualificação de técnico em informática industrial da CEETPS / FATEC, em 2005, recebeu o a qualificação de técnico em eletrotécnica da CEETPS / FATEC, em 2007 e a B.S. Graus em Engenharia Civil da Universidade Paulista, São Paulo, em 2014. De 2007 a 2014, foi técnico em eletrotécnico na empresa AES Eletropaulo e de 2015 a 2017(atual), exerce o cargo de Engenheiro Civil no Departamento de Engenharia na AES Eletropaulo. O Sr. Autor foi um dos vencedores do Prêmio de Melhor Projeto de Melhoria Continua em 2016 pela AES Brasil, projeto "Redução de Custos de Fundações em Obras de Subestações". O projeto gerou uma economia para empresa de 1,15 MM e conseguiu reduzir a média de porcentagem do custo de fundações de 20% para 6,5% e levou a alterações de procedimentos e padrões, resultando em redução de custo das fundações de mais de R\$ 1,15 milhões.



Rogério Alencar Bimbato Rocha nasceu em São Caetano do Sul, estado de São Paulo, Brasil, em 26 de Fevereiro de 1973. Recebeu o título de Técnico em Eletroeletrônica em 1996 pela ETE Jorge Street. Formou-se em graduação em Matemática pela Universidade do Grande ABC-SP (2005) e Engenharia Civil pela mesma Instituição (2015). Atualmente ocupa o cargo de Engenheiro na Diretora de Planejamento, Engenharia e Obras da Distribuição da AES ELETROPAULO, Barueri, São Paulo, Brasil atuando, na gestão de projetos e obras de Subestações e Linhas de Transmissão e Distribuição desde 2011. Possui certificação em Lean Six Sigma Green Belt. Participou do projeto "Redução de Custos de Fundações em Obras de Subestações", vencedor do Prêmio de Melhor Projeto de Melhoria Continua em 2016 pela AES Brasil.