



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GLT/35

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - III

GRUPO DE ESTUDO DE LINHA DE TRANSMISSÃO- GLT

FUNDAÇÕES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO: ANÁLISE INTEGRADA DE DESEMPENHO X RISCO X CUSTO

**Gerson Fernandes Junior(*)
EPTÉ**

**Patricia Rodrigues Fernandes
EPTÉ**

**Rafael de Barros Aranha Piccolo
AES ELETROPAULO**

RESUMO

O informe técnico apresenta discussão sobre a importância de sondagens, bem executadas, para elaboração de projetos de fundações de linhas de transmissão, sendo ressaltado que, face ao custo relativamente limitado das sondagens, estas devem ser previstas, de forma sistemática, nos projetos de instalações de transmissão de energia.

Discute-se a relevância das sondagens, tanto no que se refere à confiabilidade das linhas de transmissão quanto para serem evitados vieses de projeto, os quais, além de representarem custos adicionais, interferem de forma decisiva nos cronogramas dos empreendimentos.

PALAVRAS-CHAVE

Fundações, Sondagem, Reforço Fundação, Prova de Carga

1.0 - INTRODUÇÃO

Embora represente parcela importante dos investimentos para implantação de linhas de transmissão, as fundações das estruturas pouco tem estado presente no conjunto de informes técnicos apresentados nos seminários e congressos do setor elétrico.

Aglutinando engenheiros de duas importantes áreas do conhecimento, engenharia estrutural e geotecnia, o projeto de fundações de linhas de transmissão, apesar de mais presente em congressos e seminários progressos, com apresentações de relevante interesse e aplicação para o setor elétrico, tem sido notada relativa ausência nos eventos recentes (2 IT's no XXI SNPTEE, nenhum IT no XXII SNPTEE, 1 IF no XXIII SNPTEE).

Tendo como base de dados, ou melhor, insumos para projeto, apenas as sondagens geotécnicas tipo SPT, nem sempre executadas em todos os pontos de implantação de torres, é de competência, e responsabilidade, da engenharia estrutural e geotécnica desenvolver projetos seguros, confiáveis, econômicos, otimizados e, acima de tudo, factíveis com simplicidade sob o ponto de vista executivo.

O ensaio de penetração dinâmica - Standard Penetration Test[®] (SPT) é o mais propagado e empregado no Brasil em projetos de fundações, todavia, ele é agente de imperfeições recorrentes na atividade de execução e isso ocorre principalmente devido ao estado de conservação dos equipamentos, inconstância na energia de cravação e a não execução de procedimentos padronizados requeridos na ABNT NBR 6484. ROCHA et al. (2015), desenvolveram um estudo sobre a avaliação da variabilidade dos resultados de ensaios SPT no Campo Experimental de Fundações da Escola de Engenharia de São Carlos (USP – São Carlos). Os pesquisadores administraram dezessete sondagens executadas por quatro empresas e em seguida confrontaram os resultados a

cada metro de profundidade levando em consideração todas as empresas (Geral) e cada uma delas separadamente. A partir dessa verificação identificaram um coeficiente de variação (CV) médio de 37%.

O ensaio de sondagem SPT é o âmago do projeto de fundação, pois ele determina as resistências e características do solo a cada metro de profundidade, as quais são utilizadas para dimensionar as estruturas de fundação. O dimensionamento por sua vez é comumente feito a partir de métodos semi-empíricos mais disseminados na área de geotecnia. Por outro lado, apesar de usar excelentes métodos de cálculo, ainda assim apresentam imprecisões com a realidade.

Nesse contexto, com relação às incertezas na execução da sondagem SPT e dos métodos de cálculo, vale ressaltar que a ABNT NBR 6122, 2010 prescreve 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”*.

Neste ponto de vista que se justifica plenamente a realização de sondagens na totalidade das torres de transmissão, haja vista o potencial retorno associado, tanto no que tange à confiabilidade resultante quanto no que se refere ao limitado investimento associado.

2.0 - FUNDAÇÕES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

2.1 Prova de Carga Estática: O âmago da averiguação do projeto de fundações de um Engenheiro

A seguir apresenta-se relato de anomalia ocorrida em prova de carga estática de uma estaca, da qual resultou o não atendimento da carga de tração requerida para a estrutura de transmissão de energia.

A prova de carga transcorria conforme expectativa, tendo sido lidas as deformações dos relógios comparadores no 13º estágio de carregamento, de um total previsto de 15 estágios.

Atingido o tempo de 5 minutos (prova de carga rápida à tração) desde a aplicação do 13º carregamento, e ao iniciar-se a aplicação da carga do 14º estágio, as leituras dos extensômetros passaram a aumentar, primeiro lentamente e, à medida que se realizava a recarga, as deformações passaram a sofrer acréscimos significativos, caracterizando um clássico processo de ruptura da interação solo-estaca.

Caracterizada a anomalia, restava-se determinar a razão do desempenho não conforme a partir da retroanálise de todos os elementos do processo de concepção da fundação: análise da memória de cálculo da fundação, da estimativa do comprimento, correlação com resultados de SPT obtidos nas sondagens, e do resgate das condições de perfuração e avanço da sonda por ocasião da execução da estaca raiz. Nada parecia indicar alguma não conformidade. Perfuração e injeção Ok. Memória de cálculo OK. Comprimento da estaca OK. Então foi solicitada uma nova sondagem visando confirmar a estratificação e resistência das camadas em profundidade. A tabela 1 apresenta resultados de SPT's indicados nos relatórios de sondagens realizadas na torre.

Tabela 1 - Resultados de SPT em sondagens realizadas na torre de transmissão

DATA	NA	Prof. (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ago/15	-6,49	SPT Antigo	3	4	7	6	13	10	12	17	16	16	14	16	22	21	23
jul/16	-3,67	SPT Novo	2/36	1/24	2/34	2/34	4/32	3/31	14	4/31	3/32	5	7	6	7	13	23

O que houve de errado? As diferenças nos valores de “SPT” de metro em metro são expressivas, demonstrando que, para o comprimento de estaca previsto por ocasião do projeto, o elemento de fundação não teria competência para resistir aos esforços transferidos pela torre de transmissão. Felizmente tal comprovação se deu durante a prova de carga. Tendo como base este cenário de fundo, pergunta-se:

- E se a prova de carga não tivesse sido realizada antes da montagem da torre, lançamento dos cabos e entrada da LT em operação?
- Quais as razões que podem explicar diferenças tão expressivas entre sondagens realizadas, em tese, no mesmo local?

- c) O que dizer de instalações de transmissão projetadas com sondagens realizadas a cada 2,0 km, com prevalência nos ângulos e estruturas terminais?
- d) Qual o grau de segurança que projetistas de fundações tem no desenvolvimento dos projetos quando se depara com situações como esta, ou quando se sabe que situações como esta podem ocorrer? Afinal as únicas informações disponíveis são sondagens, as quais podem não representar com fidelidade as efetivas condições do subsolo, tanto em termos de resistência quanto de deformação. Estas incertezas, de forma geral, implicam em maiores fatores de (in)segurança, com potenciais impactos nos custos de implantação das fundações.
- e) E quanto ao risco de falha ou desempenho insatisfatório das fundações? Quais os custos envolvidos em eventual necessidade de reforço de fundações? E no caso de anomalias de maior abrangência?
- f) Gastos com sondagens devem ser tratados como custos ou investimentos? Qual o ganho mensurável em campanhas de sondagens que investiguem, tanto quanto possível, a maioria, se não a totalidade das torres de uma LT?
- g) Insuficiência / carência de provas de carga?

É com base nestas condições de contorno que o presente informe técnico se desenvolve, sendo apresentadas análises comparativas entre dimensões, volumes e quantidades de materiais de fundações dimensionadas para solos com resistência variável, considerando-se como indicativo de resistência valores de SPT obtidos em sondagens geotécnicas. O informe técnico se detém, ainda, na análise da qualidade das sondagens, precisão reprodutibilidade dos resultados, fiscalização e acompanhamento de campanha de sondagens e, como tópico relevante, a capacitação das empresas de sondagens, ressaltando-se o círculo vicioso perverso, resumido na sequência abaixo:

Limitado número de sondagens => menor número de empresas sondadoras => contratação por menor preço => menores custos praticados => sacrifício da qualidade => precarização de resultados => incertezas => carência de fiscalização => maiores fatores de (in)segurança => maiores custos para as fundações e/ou possibilidade de anomalias de comportamento

O tópico final apresenta estudo de caso de fundação de linha de transmissão no qual, em função de deficiência de sondagem, houve necessidade de reforço visando dotá-la de capacidade de carga suficiente para resistir às solicitações de tração e compressão transferidas pela estrutura.

2.2 Dimensionamento de Fundações Típicas em Função dos valores de SPT

Para desenvolvimento deste item serão adotadas metodologias de dimensionamento que estimam parâmetros de resistência a partir de correlações com valores de SPT. Os ensaios SPT são a única informação disponível para projetos de fundações de linhas de transmissão, sendo relativamente escassos ensaios complementares nesta área da engenharia, não sendo aplicados, nestas análises, procedimentos de cálculo dependentes do conhecimento dos parâmetros de resistência dos solos, especificamente coesão e ângulo de atrito interno.

Os procedimentos aplicados tem uso consolidado pela engenharia de fundações, tanto em linhas de transmissão quanto nas demais área da engenharia civil, sendo indicados abaixo as expressões de correlação com valores de SPT.

Ressalta-se que o objetivo do informe técnico não é validar metodologias de cálculo, nem discutir precisão e/ou fatores de ajuste específicos nas expressões de cálculo, mas sim investigar a variação da capacidade de carga de fundações, dimensionadas a partir de critérios comuns e, neste sentido, eventuais desvios nas expressões de cálculo não serão determinantes para as análises comparativas desenvolvidas.

- a) Tensão admissível para fundações comprimidas

$$\sigma = N_{SPT} \cdot (1+0,1H) / k \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad \text{onde:}$$

N_{SPT} = média dos SPT na profundidade de 1,5.B abaixo da cota de apoio (golpes/30cm)

B = lado ou diâmetro da fundação (m)

H = profundidade da fundação (m)

(1+0,1H) limitado a 1,50

K = coeficiente de ajuste da expressão (3 para tubulões - 4 para sapatas) (admissional)

b) Atrito lateral em tubulões

$$T_{lat} = 0,065 \cdot (1 + SPT_i / 3) \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad \text{onde:}$$

SPT_i = medição de SPT na profundidade "i" (golpes/30cm)

c) Capacidade de carga a tração (VII ERLAC = 1997)

$$T_b = V_s \cdot \gamma_s + P_f \quad T_b = \text{carga teórica}$$

V_s = volume de solo aparente => função de "α" ângulo de arranchamento

$$\alpha = \alpha_{lim} \cdot (1 - \exp(-r \cdot Z \cdot (N+1)))$$

$$r = 0,5$$

$$Z = B / H \quad (B = \text{lado/diâmetro} - H = \text{profundidade})$$

$$N = \text{SPT de referência ao longo da profundidade} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n (SPT)_i}$$

$$T_{lim} = 5,00 \times T_b^{2/3} \quad \Rightarrow \quad T_{adm} = 3,57 \times T_b^{2/3}$$

d) Atrito lateral em estacas

$$r_{lat} = 0,077 \cdot (1 + SPT_i / 3) \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad \text{onde:}$$

SPT_i = medição de SPT na profundidade "i" (golpes/30cm)

2.3 Variação de Dimensões de Fundações em Função de valores de SPT

A variação na resistência do solo na profundidade de interesse de aplicação da fundação, implica em alterações expressivas nos volumes de concreto e escavação, tanto para fundações diretas, tubulões e sapatas, bem como no comprimento requerido de estacas para fundações estaqueadas.

A simulação foi desenvolvida para esforços de compressão de 40,0 tf e solicitações de tração de 35,0 tf e, adicionamento no caso de estacas foi adotada solicitação axial limite de 15,0 tf. Para as sapatas o procedimento de cálculo, visando obtenção de valores mínimos de volumes de escavação e concreto, foi realizado através do cálculo da área da base para atendimento à solicitação de compressão e, com base nesta dimensão foi obtida profundidade necessária para sustentação da carga de tração. No caso dos tubulões foi adotado diâmetro de 0,80 m, sem alargamento de base, obtendo-se de forma integrada a profundidade na qual haveria atendimento simultâneo das solicitações de compressão e tração. Para as estacas foi adotado diâmetro de 0,26 m.

São apresentadas nas Figuras 1 a 3 a variação das dimensões das fundações, dimensionadas pelos critérios apresentados no Item 2.2.

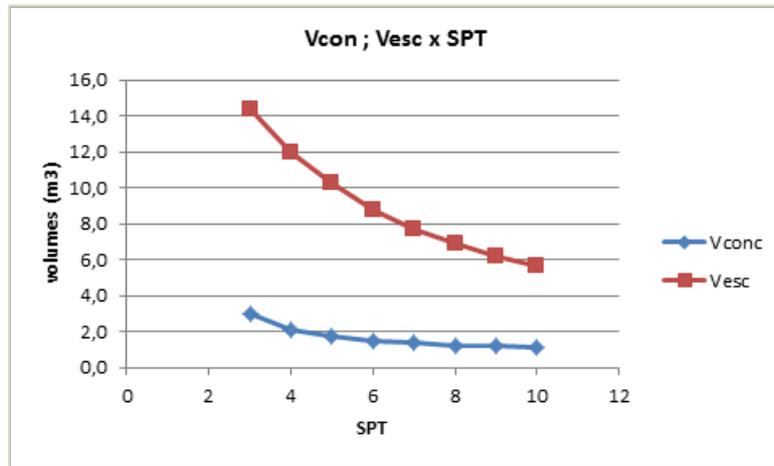


FIGURA 1 – Fundação em Sapata - Variação dos Volumes de Escavação e Concreto em Função dos Valores de SPT

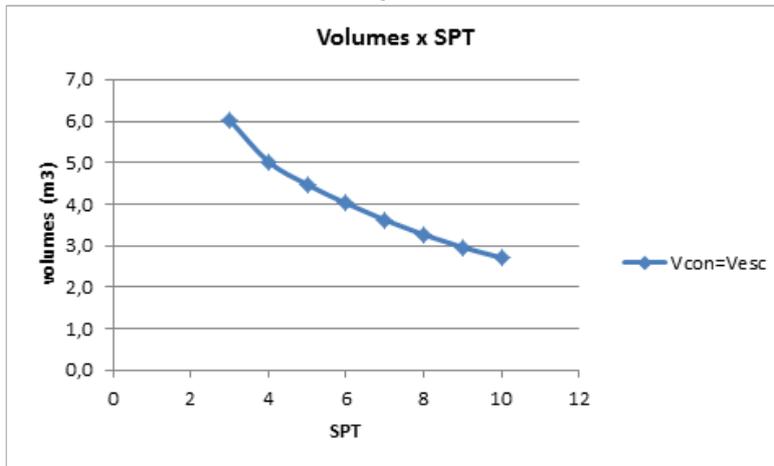


FIGURA 2 – Fundação em Tubulão ($\varnothing = 0,80$ m) - Variação dos Volumes de Escavação e Concreto em Função dos Valores de SPT

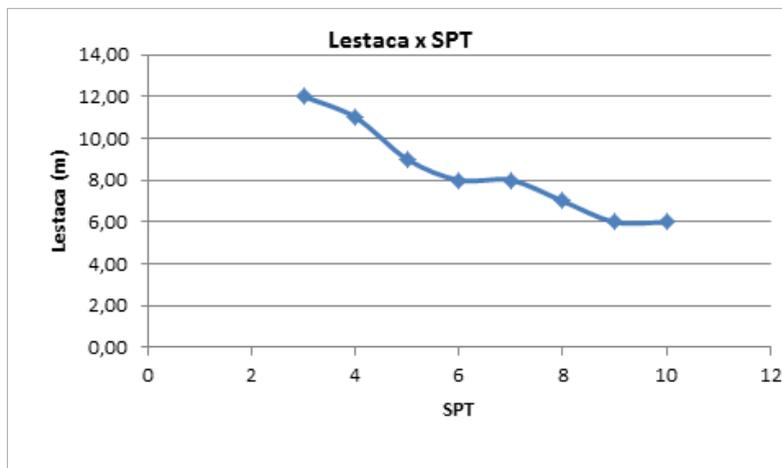


FIGURA 3 – Fundação em Estaca ($\varnothing = 0,26$ m) - Variação do Comprimento em Função dos Valores de SPT

Análise complementar realizada nas simulações refere-se à variação dos comprimentos requeridos de tubulões submetidos a elevados esforços de tombamento, caso típico das instalações de transmissão situadas em áreas urbanas. Nesta análise adotou-se como valor de referência momento de tombamento de 200,0 tf.m, sendo admitido nas simulações um valor fixo, 1,30 m, para o diâmetro dos tubulões. Neste tipo de fundação, o momento reagente, resultante da integração da tensão horizontal desenvolvida entre a geratriz do tubulão e o solo circundante, varia em razão cúbica da profundidade do tubulão, não havendo variação expressiva nos volumes de escavação e concreto resultantes, conforme observado na Figura 4.

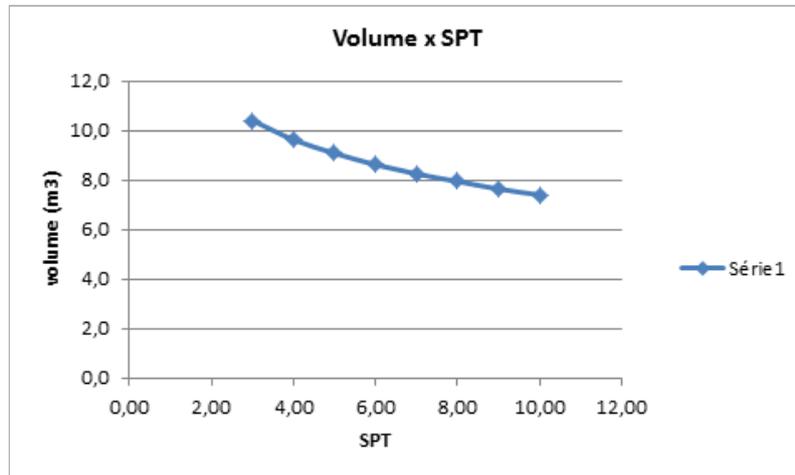


FIGURA 4 – Fundação em Tubulão para postes ($\varnothing = 1,30$ m) - Variação dos Volumes em Função de SPT

2.4 Resultados das Análises

Conforme pode ser observado nas Figuras 1 a 4, com exceção do caso de tubulões submetidos a esforços de tombamento, a variação dos volumes de escavação e concreto, e comprimento de estaca, resultam em expressivo impacto no custo das fundações, efeito que se potencializa em função da replicação para as demais fundações de uma linha de transmissão. Em contrapartida, o desconhecimento das efetivas condições de resistência do subsolo, seja em função de carência de sondagens, ou fruto de incertezas com relação à confiabilidade de resultados das sondagens, representam limitações essenciais. Nessa condição o projetista de fundações aplica majoração de coeficientes de segurança, aplicação de fundações mais robustas e mesmo mudança do tipo de fundação, ações que têm por objetivo assegurar grau de segurança adequado às fundações face às incertezas prevalentes.

Considerando o limitado custo das sondagens geotécnicas SPT, mesmo que realizadas na totalidade das torres das linhas de transmissão, e tendo por base os resultados indicados nas Figuras 1 a 4, salienta-se que são notórios os benefícios diretos da realização de campanhas de sondagens. Tais benefícios representam potencial redução no custo final dos empreendimentos e garantia da confiabilidade requerida para estas instalações, e adicionalmente os custos de recomposição das instalações decorrentes de comportamento anômalo de fundações transcendem, os limitados investimentos requeridos para manter adequadas condições para projeto e instalação de fundações.

A Figura 5, transcrita de BARROS, Mercia M.S.B. de; MELHADO, Silvio B. [1993], ilustra com perfeição a importância de investimentos na fase de concepção e projeto de empreendimentos, sejam de que natureza for.

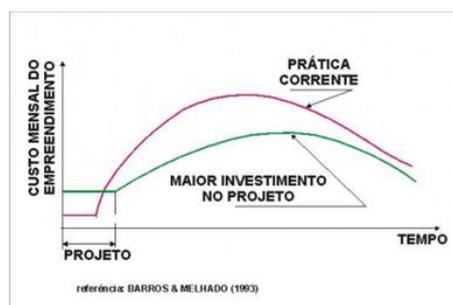


FIGURA 5 – Custo de Empreendimentos em Função do Investimento em Projeto

Ressalta-se ainda que não basta a execução de campanha de sondagem na totalidade das torres das linhas de transmissão. São condições imperativas que a empresa executante tenha capacitação e integridade na consecução de suas atividades, condição que infelizmente não ocorre com todas as prestadoras de serviço, mormente no caso de contratações exclusivamente por menor preço, bem como que a campanha de sondagens seja monitorada ou fiscalizada, no todo ou em parte, condicionantes que balizam para o atendimento às expectativas da concessionária, da projetista e da empreiteira responsável pela execução dos empreendimentos, não sendo raro, como infelizmente se constata, mudanças no tipo de fundação durante a execução das obras civis de fundações.

Como fatores adicionais que podem implicar em não conformidades no desempenho de fundações, pode-se citar:

- a) Deslocamentos de torres na fase de projeto, posteriormente à etapa de execução das sondagens,
- b) Equívocos na vinculação Nº Torre x Nº Sondagem, condição que passa despercebida no caso de inserções ou exclusões de torres na fase de projeto,
- c) Locação de furos através de GPS manuais os quais, além de indicarem posição com erro da ordem de 10,00 m a 12,00 m, dependem da correspondência entre o Datum de Projeto e o Datum do equipamento, podendo ocorrer diferenças de até 60,00 m entre os sistemas de referência geodésico (SAD 69 x SIRGAS 2000), não sendo raras divergências como estas.

2.5 Estudo de Caso: Fundação em tubulão para torre autoportante

Apresenta-se abaixo estudo de caso relativo à necessidade de reforço em fundação em tubulão, motivada por divergências expressivas entre sondagem realizada na fase de prospecção geotécnica e sondagem posterior à execução da fundação, realizada como forma de confirmar as características do subsolo, haja vista que a escavação foi executada mecanicamente, não se podendo inferir, a partir de consulta à equipe de escavação, as condições do subsolo em profundidade. Ressalta-se que a iniciativa de realizar processo de confirmação do subsolo por amostragem de torres foi decorrente da falha em prova de carga relatada no início do informe técnico.

A Tabela II apresenta os resultados das sondagens (prévia e posterior), podendo-se identificar as divergências entre os valores de SPT obtidos ao longo da profundidade.

Tabela II - Resultados de sondagem na torre

DATA	NA	Prof. (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ago/14	-8,45	SPT Antigo	26	17	20	22	25	29	34	43	-	-	-	-	-	-	-
out/16	-11,56	SPT Novo	1/26	2/25	2	2	2	4	4	5	7	4	4	6	7	9	...

Na Figura 6 (a) é indicada a fundação projetada segundo a sondagem prévia, realizada na fase de projeto da linha de transmissão e, considerando-se a sondagem disponível e os esforços solicitantes aplicados ($C = 56,00$ tf e $T = 51,00$ tf), em tese a tubulão mostra-se adequado à finalidade proposta.

Entretanto, à luz dos resultados da sondagem obtidos na segunda campanha de prospecção, fica evidenciada a limitação da fundação para resistir aos carregamentos indicados, sendo necessário reforço da fundação, a ser engendrado de forma tal a ser instalado considerando que a torre de transmissão já se encontra montada, sem possibilidade de desmontagem. A Figura 6 (b) apresenta detalhe da fundação em estaca proposta para reforço do tubulão.

Em função das diferenças notórias entre a fundação prevista e o reforço proposto, há que se prever considerável diferencial de custo entre elas. Embora a previsão inicial, se embasada em sondagem representativa, certamente direcionaria para fundação em estaca, o retrabalho, e custos decorrentes, associados à não conformidade da sondagem inicial realizada, representam entraves ao andamento da implantação do empreendimento, além de implicar em arranjos estruturais mais onerosos e de mais difícil execução.

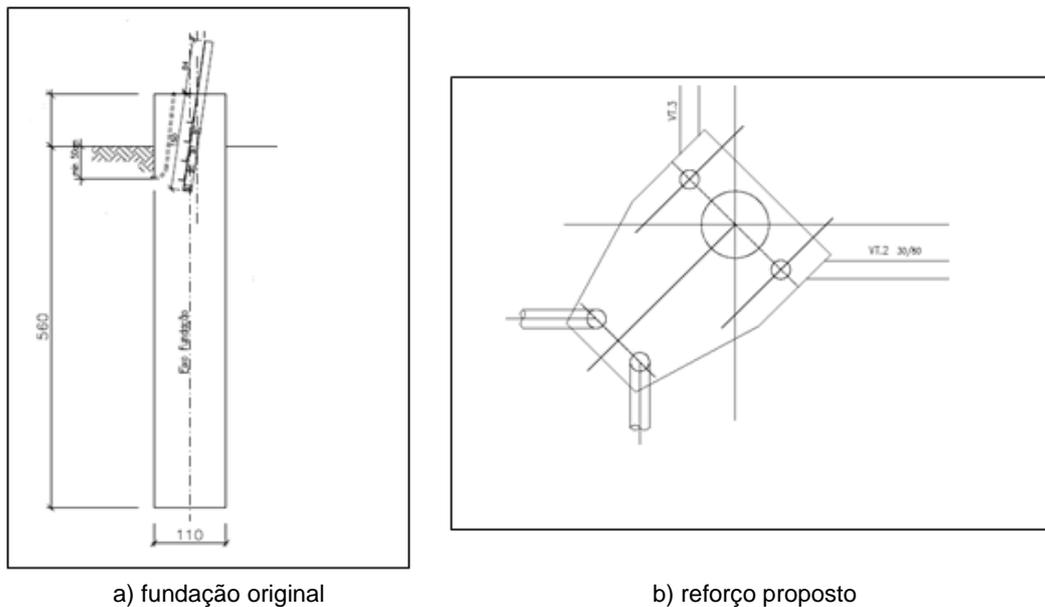


FIGURA 6 – Detalhe de Fundação

3.0 - CONCLUSÕES

Como resultados do informe técnico ficam evidenciadas:

- a) A importância de campanhas de sondagem sistemáticas nos projetos de fundações de linhas de transmissão, com aplicação de “check-list” no que concerne à locação dos furos previstos
- b) A relevância de monitoramento das equipes de sondagem visando prevenir e detectar desvios de conduta
- c) Avaliação de eventual necessidade de execução de sondagens por amostragem durante a fase de implantação das fundações, no caso de indicativo de potencial assimetria de dados/constatações projeto x campo
- d) A necessidade de estabelecimento de um critério rigoroso para habilitação das empresas de sondagens junto às concessionárias de energia
- e) A previsão de realização de ensaios de carga na fase de execução de fundações de linhas de transmissão, através dos quais se possa aferir os resultados das sondagens que embasaram o projeto das fundações, e a aderência dos procedimentos de cálculo baseados em correlações com valores de SPT, contribuindo desta forma para ampliação do acervo técnico relativo a provas de carga
- f) O acompanhamento e fiscalização da execução de fundações, tanto através de inspeções periódicas, quanto através de interações com as equipes de campo

4.0 - REFERÊNCIAS BIOGRÁFICAS

- (1) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e execução de fundações – NBR 6122. Brasil.
- (2) 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.
- (3) BARROS, Mercia M.S.B. de; MELHADO, Silvio B. Racionalização do projeto de edifícios construídos pelo processo tradicional. São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil/EPUSP, 1993. /Seminário apresentado no curso de pós-graduação da EPUSP - Datilografado/.
- (4) MORENO, Roberto F.; “Fundações submetidas a Esforços de Tração” - VII Encontro Regional Latino Americano da CIGRÉ Argentina – 1997

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Gerson Fernandes Junior: Engenheiro Civil (Universidade de Guarulhos - 2013). Atua no segmento de Linhas de Transmissão desde 2009, iniciando suas atividades como Trainee, atualmente ocupa o cargo de Engenheiro de Projetos de Linhas de Transmissão de Energia na EDF Engenheiros Associados (EPTE).

Patricia Rodrigues Fernandes: Engenheira civil (Universidade de Guarulhos - 2015). Atua no segmento de Linhas de Transmissão desde 2012, iniciando suas atividades como Trainee, atualmente ocupa o cargo de Engenheira de Projetos de Linhas de Transmissão de Energia na EDF Engenheiros Associados (EPTE).

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.