



**GRUPO III
GRUPO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT**

**REFORÇOS EM FUNDAÇÕES DE SUPORTES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
A EXPERIÊNCIA DA ELETROSUL**

**José C. de Saboia Stephan ⁽¹⁾
ELETROSUL**

**Luís A. R. Fulco
ELETROSUL**

**Jorge L. Schreiber
ELETROSUL**

**Mário A. Vitório
ELETROSUL**

RESUMO

Esta contribuição técnica apresenta nova metodologia para projeto e execução de reforço de fundações em grelha metálica para suportes de linhas de transmissão. São abordados critérios de dimensionamento geotécnico e estrutural da sapata de concreto armado utilizada como reforço, bem como, os procedimentos adotados quando da execução dos ensaios em escala real dos protótipos: escolha do local da praça de ensaio, equipamentos e instrumentos de ensaio, medição das deformações ocorridas nas fundações ensaiadas e caracterização da ruptura do solo. É, também, analisada a adequação do comportamento teórico do reforço de fundações face ao efetivamente constatado na prática.

PALAVRAS-CHAVE

Suporte, Linhas de Transmissão, Fundação, Reforço, Corrosão.

INTRODUÇÃO

Na década de 80 ocorreu significativa expansão da malha de linhas de transmissão do sistema elétrico brasileiro, sendo que, os projetos das fundações dos suportes foram elaborados de acordo com um dos conceitos vigentes na época: A utilização de fundações tipo grelha metálica (aço galvanizado).

A fundação metálica, por estar em contato direto com o solo, pode sofrer processo corrosivo mais acentuado em relação à parte aérea da torre, chegando algumas grelhas de suportes a apresentar importante processo corrosivo, com perda significativa de massa, transcorridos apenas dez anos da sua instalação.

Para se ter uma idéia da dimensão do que representa o problema de corrosão em grelhas de suportes para o sistema de transmissão da Eletrosul – Centrais Elétricas S.A., são 10.414 suportes que possuem fundação em grelha metálica, o que corresponde a mais de 54% do total de 19.231 torres de seu sistema de transmissão.

A ELETROSUL tem desenvolvido pesquisas visando solucionar o problema da corrosão em grelhas metálicas, que se intensificaram a partir de 1998 e que foram apresentadas e discutidas em encontro técnico realizado em agosto de 2001, envolvendo as áreas de manutenção e projeto de LT's da empresa, que tirou como diretriz principal, o reforço de fundação utilizando o concreto armado como solução para o problema de corrosão em grelhas metálicas, o que resultou no projeto de uma sapata nervurada de concreto armado, cujos aspectos técnicos de concepção de projeto, dimensionamento, ensaios em escala real e construção de um protótipo são abordados no presente trabalho.

1.0 - A CARACTERÍSTICA DIFERENCIADA DO PROCESSO CORROSIVO DAS FUNDAÇÕES METÁLICAS DE SUPORTES DE LINHAS TRANSMISSÃO.

As principais causas responsáveis pela característica diferenciada do processo corrosivo das fundações em grelha em relação à parte aérea dos suportes são:

⁽¹⁾ Rua Dep Antônio Edu Vieira, 999 - Pantanal - Florianópolis - SC – BRASIL - CEP 88040-001
Tel.: (48) 231-7540 - e-mail: jcsaboia@eletrosul.gov.br

I) Os Solos Ácidos e de Baixa Resistividade

O meio ácido formado em um solo de pH baixo e a baixa resistividade do mesmo são fatores que favorecem uma série de reações eletroquímicas do processo de corrosão, nas quais intervêm direta ou indiretamente os íons da água presentes nos vazios do solo, sendo maior a velocidade deste processo, quanto mais ácido e menos resistivo seja o solo de fundação.

Outras características do solo de fundação contribuirão para o aumento da velocidade do processo de corrosão:

Maior Índice de Vazios (Aeração)	→ Maior presença de oxigênio
	→ Maior facilidade para a percolação de água
Maior Teor de Umidade	→ Maior presença de água
Teor de Sulfatos e Sulfetos	→ Reação química com o aço

II) As Correntes de Fuga

Associadas a ação do solo ácido, contribuirão ainda para a aceleração do processo de corrosão das grelhas metálicas, as correntes de fuga:

- Caso 1: corrente induzida no cabo pára-raio por efeito do campo eletromagnético gerado na linha, que escoia pela torre até o solo (pois o cabo pára-raio não é isolado da torre);
- Caso 2: corrente que escoia através das cadeias de isoladores dos cabos condutores para a torre e desta para o solo.

Situadas na ordem de miliamperes, as correntes de fuga intensificam as reações eletroquímicas do processo de corrosão, sendo maior a intensidade destas correntes e conseqüentemente, a velocidade deste processo, quanto maior a classe de tensão da linha de transmissão.

2.0 - O CONCRETO ARMADO COMO SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA DE CORROSÃO EM FUNDAÇÕES EM GRELHA METÁLICA PARA SUPORTES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

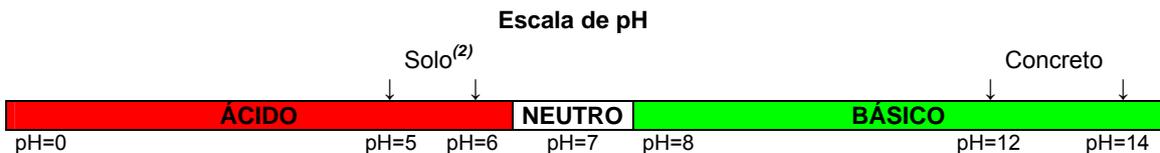
A Eletrosul tem como diretriz principal para solução do problema de corrosão em grelhas metálicas a fundação em concreto em função das seguintes vantagens:

a) Economia – Manutenção e conservação nulas em associação à durabilidade perene

O concreto armado como reforço de fundação é a única alternativa definitiva, isto é, uma vez aplicado, não exigirá manutenção e conservação e sua durabilidade será perene.

b) O concreto protege o aço da corrosão, garantindo a durabilidade da fundação

A durabilidade do concreto armado é o resultado natural da dupla natureza que o concreto exerce sobre o aço: por uma parte, o cobrimento de concreto é uma barreira física e, por outra, a hidratação do cimento forma uma solução de elevada alcalinidade, situando o pH do concreto em valores entre 12 e 14, isto é, no extremo mais alcalino da escala de pH. Em razão de sua natureza alcalina, esta solução propicia um meio adequado para a formação de uma capa de óxidos transparentes, fina, contínua, compacta e aderente, na superfície do aço, que o mantém protegido por período indefinido, mesmo em presença de umidades elevadas no concreto.



⁽²⁾ Nas medições de pH do solo realizadas em duas torres de transmissão da LT 525 kV Ivaiporã / Salto Santiago, foram obtidos os seguintes resultados:

- T.130: pH=5,6
- T.131: pH=5,7

c) Adaptação a qualquer tipo de forma e facilidade de execução

Permitindo total liberdade de concepção estrutural, de formas e de método construtivo, liberdade esta que nenhum outro material estrutural propicia (acoplada à economia).

d) Resistência a efeitos térmicos, atmosféricos e a desgastes mecânicos

3.0 - O PROJETO

Inicialmente foi necessário estudar e avaliar as soluções consideradas mais econômicas como reforço de fundação em concreto para torres de linhas de transmissão: tubulão e sapata. Ambas foram estudadas em

alternativas visando a execução do reforço dispensando o estaiamento da torre e principalmente o escoramento dos pés da mesma, o que conferiria economia significativa de custos e maior confiabilidade ao serviço.

A solução de fundação em sapata mostrou-se mais viável economicamente e de execução mais adequada às condicionantes de campo, para as quais, as condições dos acessos às torres para o tráfego de veículos carregados de agregados, bem como, as distâncias a serem percorridas até o comércio destes, são fatores que influenciam diretamente o custo do concreto, principal item no preço final do serviço.

Numa segunda etapa foram estudadas as diferentes metodologias de dimensionamento geotécnico e estrutural de fundações em sapata. A partir do que se considerou teoricamente mais lógico de todos os métodos estudados, foi elaborado roteiro de dimensionamento para o reforço, que deveria ser aplicado a uma situação real de torre de 525 kV, isto devido a maior magnitude das cargas atuantes na classe 525 kV em relação aos sistemas de 138 kV e 230 kV, como também, porque o processo corrosivo é mais acelerado nas grelhas das torres desta classe de tensão por efeito das correntes de fuga - portanto, requerendo solução mais imediata em relação às demais classes de tensão do Sistema ELETROSUL. Mais especificamente, foi escolhida uma torre de suspensão, por representar este tipo de torre, a maior porcentagem em uma linha de transmissão.

3.1 Projeto piloto

A torre N° 564 da Linha de Transmissão 525 kV Caxias / Gravataí foi escolhida por situar-se no município de Gravataí, região metropolitana da Grande Porto Alegre, portanto, próxima aos recursos de serviços, numa região de relevo plano, propícia ao acesso de caminhão betoneira e próxima à estrada asfaltada, além do que, a linha de transmissão a qual pertence é a mais afetada pela corrosão em grelhas das linhas de 525 kV do Sistema ELETROSUL.

3.1.1 Concepção de formas da sapata adotada para o projeto piloto

As linhas mais novas que possuem fundações em grelha estão completando vinte anos de operação. Neste período, os acessos às torres foram conservados de tal maneira a permitir o tráfego dos veículos utilizados pela manutenção – off roads tracionados, portanto, em muitos casos apresentam dificuldades para a entrada de caminhões. Como é necessário levar os agregados até a torre, quanto maior o volume de concreto, maior será o custo relativo deste item no custo final do serviço. A opção pela sapata nervurada (Figura 1) significa uma economia em torno de 15% no volume de concreto.

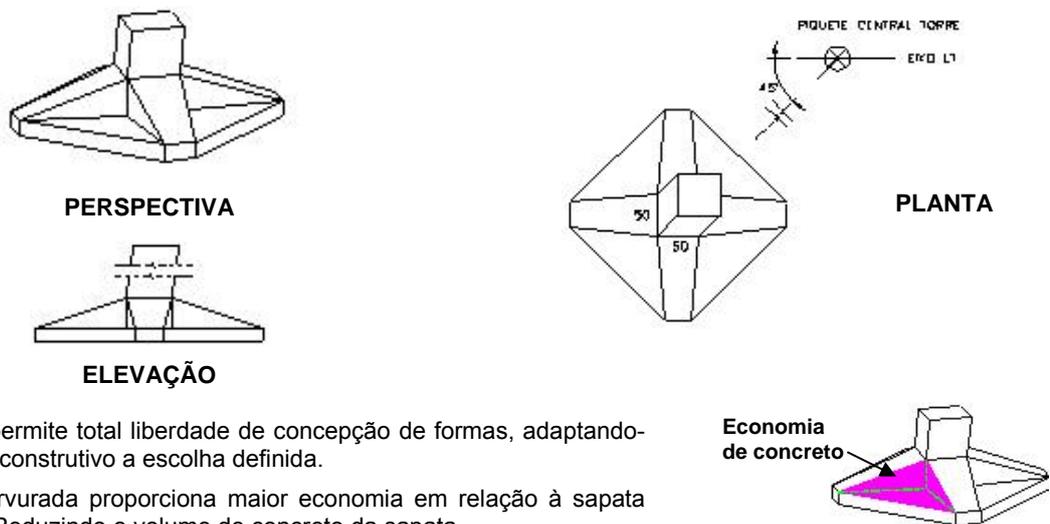


FIGURA 1 - Sapata Nervurada

3.1.2 Parâmetros físicos adotados na elaboração do projeto piloto

Torre Nº 564 da LT 525 KV Caxias / Gravataí					
INFORMAÇÕES BÁSICAS		ESFORÇOS ATUANTES			
		VERTICAIS	HORIZONTAIS ASSOCIADOS		
Fabricante	→ SBE	Compressão	$P_c = 37.123,13 \text{ kgf}$		
Tipo	→ S5+0,0			→ Transversal = 5.749,36 kgf	→ Longitudinal = 4.812,27 kgf
Pés	→ 4 Pés +10,0				
Vão Médio	= 440 m				
Vão Gravante	= 460 m	Tração	$P_t = 28.739,83 \text{ kgf}$		
Condutor	→ Grosbeak 636			→ Transversal = 4.662,64 kgf	→ Longitudinal = 3.725,54 kgf
Pára-Raios	→ Oriole				
	→ OPGW 13.8 mm				

3.1.3 Parâmetros geotécnicos adotados para elaboração do projeto piloto

Nas proximidades da Torre Nº 564 da LT 525 KV Caxias / Gravataí foi executada sondagem à percussão (SPT) e retiradas amostras para realização de ensaios de laboratório – ensaio de compressão triaxial, não drenado, rápido, análise granulométrica e demais ensaios de caracterização de Solo. Os resultados destes ensaios foram analisados, definindo-se os seguintes parâmetros geotécnicos:

PERFIL GEOTÉCNICO DO TERRENO	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS
<p>0,00 m</p> <p>Argila pouco arenosa, fofa com raízes, cor marrom</p> <p>-0,90 m</p> <p>-2,70 m</p> <p>Argila pouco siltosa de consistência variando de mole a rija, cor vermelho variegado</p> <p>-7,00 m</p>	<p>Coesão: $C_u = 20 \text{ kN/m}^2$</p> <p>Ângulo de Atrito interno: $\phi = 15^\circ$</p> <p>Peso Específico Natural: $\gamma = 14 \text{ kN/m}^3$</p>

3.1.4 Dimensionamento geotécnico do projeto piloto

A verificação da estabilidade da sapata à tração foi efetuada utilizando a metodologia preconizada pela Universidade de Grenoble (J. Biarrez - Y. Barraud), com verificação de consistência utilizando o processo de cone de arrancamento, sendo a verificação à compressão efetuada através da utilização de pressão admissível no solo que não produzisse recalques diferenciais prejudiciais à integridade das estruturas. Adicionalmente, a fundação foi verificada, também, quanto ao tombamento.

O resultando do dimensionamento geotécnico atendeu às premissas estabelecidas para o reforço de fundação: a sapata poderia ser executada sem a necessidade de estaiamento da torre e, principalmente, do escoramento do pé da mesma. A torre teria então uma nova fundação, de concreto, podendo ser considerada perdida a grelha metálica.

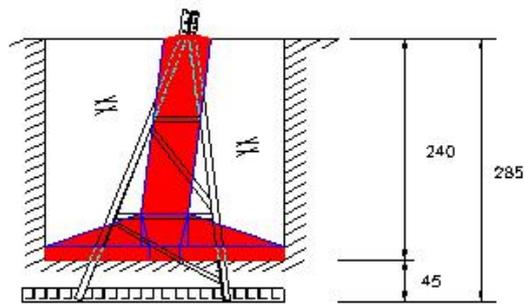


FIGURA 2 – PROJETO PILOTO - REFORÇO DA GRELHA DE FUNDAÇÃO DA T.564 DA LT525 kV CAX/GRA

3.1.5 Dimensionamento estrutural do projeto piloto

A base da sapata foi dimensionada à flexão pura e as vigas verificadas adicionalmente como consolos curtos. O fuste foi dimensionado ao cisalhamento, flexo-tração e flexo-compressão.

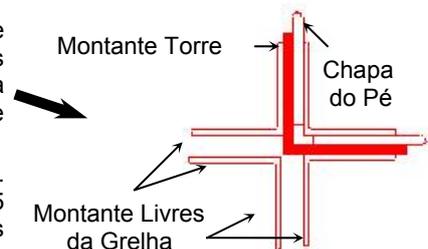
3.1.6 Construção do projeto piloto

Para que se pudesse certificar a viabilidade executiva do projeto, verificando-se as possíveis interferências das barras de treliça e montantes da grelha metálica com as barras de armadura e formas da sapata, além de outros aspectos executivos, construiu-se, com sucesso, num dos pés da torre 564 da LT525kV CAX/GRA, um protótipo do projeto piloto, conforme pode ser observado nas fotos apresentadas a seguir:



O stub do reforço de fundação é formado por duas chapas de largura e espessura idênticas ao montante da torre, instalado entre as abas livres dos montantes da grelha. A solução em duas chapas deve-se à interferência do montante do pé da torre, que impossibilita a instalação de cantoneira 'L'.

Esta é a solução mais segura e envolve menor número de horas de serviço. Em função das cargas envolvidas, cada chapa do stub deve contar com 5 parafusos, sendo então necessário proceder à furação de outros 2 furos nas abas livres dos montantes das grelhas além dos 3 existentes.





Colocação da armadura superior da laje. Já posicionadas: armadura inferior da laje, armadura das vigas e do fuste.



Aspecto Final



A concretagem deve ser iniciada a partir da base da sapata.

4.0 - ENSAIO DO REFORÇO DE FUNDAÇÃO À TRAÇÃO

Ainda era necessário experimentar o desempenho real do reforço de fundação através de ensaios de campo, para que, a partir do confronto entre o comportamento teórico e o efetivamente constatado na prática, se pudesse avaliar a adequação dos métodos de cálculo. Para tanto, foram realizados, com sucesso, ensaios de tração em dois protótipos de reforço de fundação nas proximidades da torre T.564 da LT525kV CAX/GRA. O Protótipo 1 corresponde ao Projeto Piloto e o Protótipo 2, com as mesmas dimensões da base da sapata e mesma seção transversal do fuste do Projeto Piloto, porém de profundidade correspondente à cota superior da grelha, ou seja, 30 cm de profundidade a mais que o Protótipo 1.

4.1 Sistema de aplicação de cargas e instrumentação

4.1.1 Sistema de aplicação de cargas

O sistema de aplicação de cargas utilizado é apresentado na Fig.3, qual seja: 01 macaco hidráulico de 80Tf reagindo sobre um sistema de 02 vigas metálicas de 180mm x 500mm x 6000mm, apoiadas sobre 02 pilares de concreto armado de 25cm x 50cm de seção transversal, engastados em sapatas de 100cm x 120cm, sendo as mesmas posicionadas de tal modo a não haver interferência entre os bulbos de pressão e a zona de ruptura do protótipo ensaiado. Todo conjunto foi estaiado longitudinalmente à direção da viga, restringindo o seu deslocamento e impedindo a mudança de direção do carregamento aplicado.

4.1.2 Instrumentação

A leitura dos deslocamentos do protótipo de reforço foram medidas por 06 extensômetros com sensibilidade de 0,01mm, sendo: 02 instalados na direção vertical sobre o topo do fuste do protótipo, em extremidades opostas; 02

instalados na direção horizontal, lateralmente ao mesmo, em lados opostos e 02 instalados na direção vertical no topo de hastes ancoradas diretamente sobre a base da sapata do protótipo e que atingiram a superfície do terreno, em extremidades opostas (ver Figura 3). Um segundo sistema de medição dos deslocamentos, consistiu na utilização de estação total, visando prisma instalado diretamente no topo do fuste do protótipo.

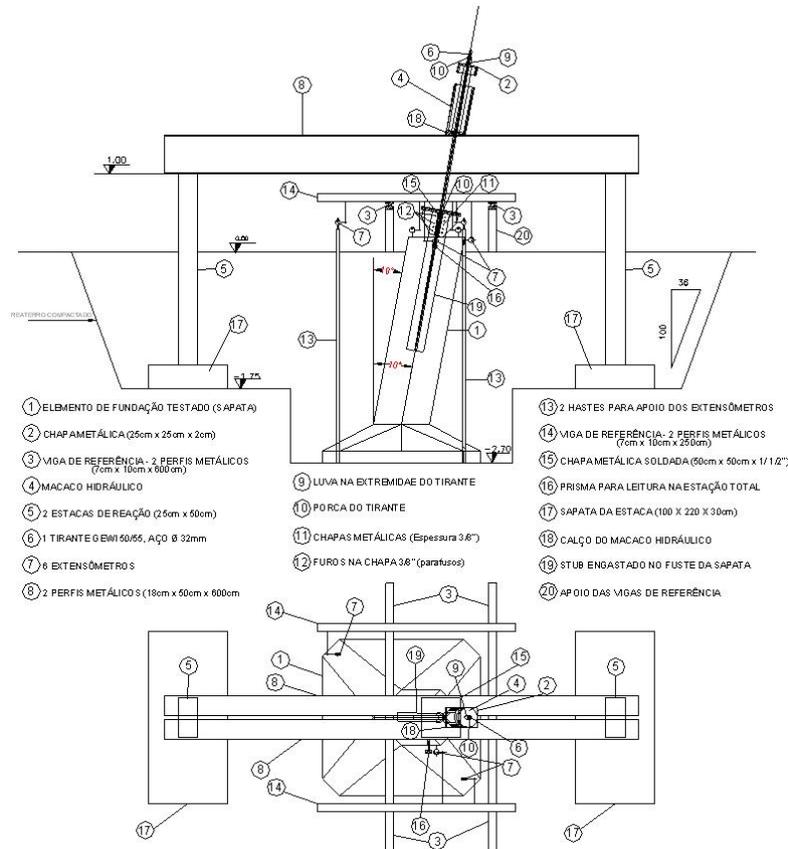


FIGURA 3 - Sistema De Aplicação de Cargas e Instrumentação de Ensaio

4.2 Execução do ensaio

A carga máxima de ensaio à tração foi de 600kN. Os ensaios foram executados de acordo com a seguinte seqüência de operações:

- I) **Ajuste do equipamento:** Aplicação de 10 % da carga máxima de ensaio à tração, efetuando após, a descarga para leitura inicial dos instrumentos;
- II) **Aplicação do 1º Ciclo de Carregamento:** As cargas de tração foram aplicadas em estágios de 20 % da carga máxima de ensaio até 100 %. Cada estágio foi mantido por 10 minutos, com carga constante, anotando-se as deformações em todas as direções, a cada minuto. O período de aplicação de carga de um estágio para o outro foi de 1 minuto com ritmo de carregamento constante. Quando o recalque total atingiu 25mm, a carga foi anotada, independentemente das leituras feitas a cada minuto. Após atingir 100 % da carga de ensaio, a descarga foi efetuada em estágios de 25 % da carga máxima atingida, num período de 1 minuto, com ritmo constante, sendo anotadas os deslocamentos a cada minuto, por 5 minutos, para todos os estágios. Após o descarregamento total, todas as deformações residuais foram lidas e anotadas;
- III) **Inspeção Visual do Protótipo Ensaiado:** Após aplicação do 1º Ciclo de Carregamento, o ensaio foi interrompido para abertura da cava de fundação, até a base da sapata, para inspeção visual da superfície do concreto. A seguir foi procedido o reaterro da cava e, somente após decorridas 24 h do encerramento dos trabalhos de reaterro, foi aplicado o 2º Ciclo de Carregamento;
- IV) **Aplicação do 2º Ciclo de Carregamento:** O carregamento inicial foi de 60 % da carga máxima de ensaio, aplicada em estágios de 20 % até 100 %. A partir desta carga os carregamentos foram incrementados em estágios de 10 % até a ruptura do solo de fundação, caracterizada pelo aumento incessante dos deslocamentos sob uma determinada carga, ou seja, na prática, correspondeu ao acionamento contínuo do macaco para manter determinada carga. Para este ciclo foram empregados os mesmos critérios de tempo de observação de deslocamentos e estabilização descritos para o 1º Ciclo. A descarga foi efetuada em estágios

de 25 % da carga máxima atingida, até zero, anotando-se as deformações em cada estágio, segundo o critério de estabilização descrito anteriormente.

4.3 Resultado dos ensaios

O resultado dos ensaios foi considerado satisfatório, pois, o comportamento das fundações obtido foi muito próximo ao calculado, como mostrado nos gráficos abaixo. Pode-se observar que após a carga de projeto foi iniciado o “escoamento” do solo, e quando a carga solicitante atingiu 400 kN foi possível observar a “olho nu” o colapso do solo.

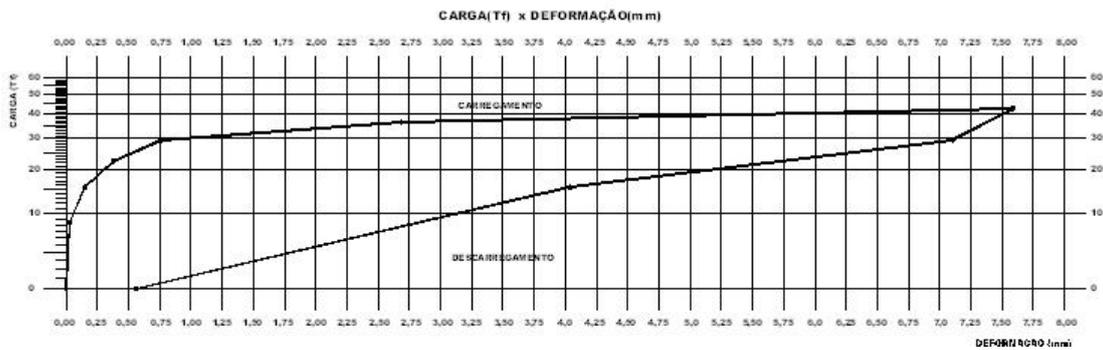


Gráfico 1 – Extensômetro 2 / Vertical Sobre o Topo do Fuste do Protótipo

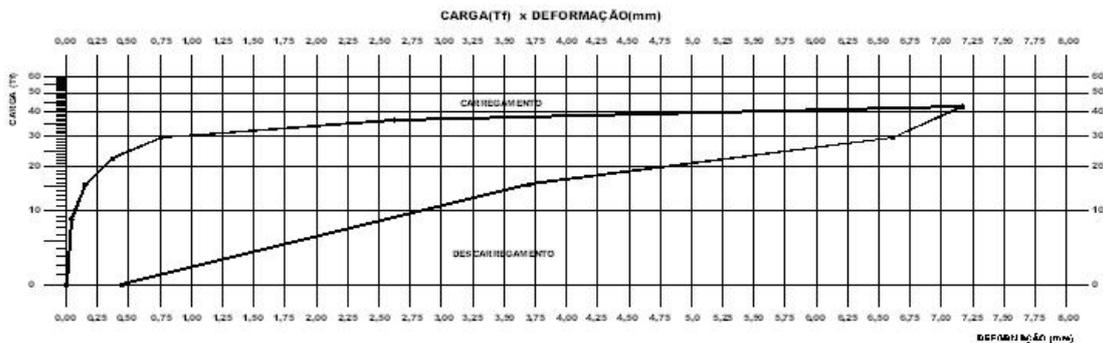


Gráfico 2 – Extensômetro 6 / Vertical Sobre o Topo do Fuste do Protótipo

5.0 - CONCLUSÕES

Após a realização de ensaios e aplicações práticas, acreditamos que o reforço de fundações em grelha utilizando sapata de concreto armado apresenta-se como uma alternativa viável para resolver o problema de corrosão em fundações em grelha metálica de suportes de linhas de transmissão.

6.0 - BIBLIOGRAFIA

[1] SÜSSEKIND, J. C. Curso de Concreto: Concreto Armado, Volume I, 7ª Edição, Editora Globo, São Paulo, 1993.

[2] ANDRADE, C. Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras, Tradução CARMONA A. e HELENE P., Editora Pini, São Paulo, 1992.