



**XXI SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
23 a 26 de Outubro de 2011  
Florianópolis - SC

**GRUPO -GLT**

**GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT**

**NOVA METODOLOGIA DE CÁLCULO DE FUNDAÇÕES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO BASEADA EM GRENOBLE E ENSAIOS DE CAMPO - ESTUDO DE CASO EM SOLO BRASILEIRO**

**Crysthian Purcino Bernardes Azevedo(\*)  
PREMO/ADONAI/FUMEC**

**RESUMO**

Para este trabalho foram executados 738 testes de carga à tração em campo nas fundações de 246 torres (3 ensaios por torre).

O objetivo principal deste trabalho é estudar o comportamento da resistência à tração de fundações com base em ensaios de protótipos em verdadeira grandeza executados em solo brasileiro com vistas à descrição probabilística para utilização no desenvolvimento de normas técnicas.

**PALAVRAS-CHAVE**

Confiabilidade estrutural, ensaios de protótipos, métodos probabilísticos, projeto de fundações de Linhas de Transmissão

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A alta competitividade entre as diversas alternativas energéticas sustentáveis implica na necessidade de minimizar os custos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Dentro deste contexto, o aumento das distâncias entre os pontos de geração e distribuição, aliado ao fato de que o custo das fundações de linhas de transmissão (LT's) pode chegar a 50% do custo total das mesmas, vê-se que estes componentes têm um papel de destaque.

A despeito da necessidade da redução dos custos de fundações, esta se depara com inúmeros desafios, a saber: (i) a identificação das incertezas associadas às diversas variáveis que afetam o comportamento das fundações de LT's; (ii) a consolidação de metodologia para determinação da capacidade de carga à tração destes elementos estruturais; (iii) o tratamento adequado das incertezas que afetam o comportamento das fundações de LT's a partir dos conceitos e métodos da confiabilidade estrutural; (iv) o desenvolvimento de projeto semi-probabilístico, ou seja, projeto baseado em confiabilidade.

O método desenvolvido pela Universidade de Grenoble é o mais empregado para verificação de capacidade de carga à tração em linhas de transmissão no Brasil e também no exterior, embora o Método do Cone ainda seja utilizado. Porém, estas metodologias não levam em consideração a presença de incertezas que afetam suas variáveis. A consolidação neste meio técnico de uma metodologia que leve em consideração tratamento de incertezas sob enfoque probabilístico é um desafio. As variáveis que afetam o comportamento das fundações de LT's são, dentre outras, as propriedades mecânicas dos solos, os métodos de ensaios e análise de resultados, os modelos de comportamento, a interação solo-estrutura, etc.

(\*) Rua Wups de Oliveira, n° 375 – sala 302 – CEP 30.662-450 Belo Horizonte, MG, – Brasil  
Tel: (+55 31) 8865-9094 – Fax: (+55 31) 3381-1081 – Email: [crysthian@engenhariaadonai.com.br](mailto:crysthian@engenhariaadonai.com.br)

Para este trabalho foram executados 738 testes de carga à tração em campo nas fundações de 246 torres (3 ensaios por torre). O acompanhamento e coordenação do autor desta tese na execução das fundações e dos ensaios bem como a escolha dos locais permitiram uma avaliação mais completa dos resultados levando a conclusões mais consistentes. Não havia dúvidas em relação à qualidade da execução das fundações e dos ensaios.

O objetivo principal deste trabalho é estudar o comportamento da resistência à tração de fundações com base em ensaios de protótipos em verdadeira grandeza executados em solo brasileiro com vistas à descrição probabilística para utilização no desenvolvimento de normas técnicas. A parcela de solicitação ( $S$ ) e o fator de majoração do carregamento da equação de projeto do método semi-probabilístico não foram objeto deste estudo.

## 2.0 - PROJETO BASEADO EM CONFIABILIDADE

No desenvolvimento dos projetos de engenharia, freqüentemente são tomadas decisões a despeito do grau de totalidade e qualidade da informação disponível. As conclusões são emitidas sob condições de incerteza. Muitos problemas envolvem processos e fenômenos naturais inerentemente aleatórios. Os dois lados da equação de projeto (Resistências e Solicitações) são influenciados qualitativa e quantitativamente pela falta de informações suficientes. O problema se dá em como projetar fundações seguras a partir de conhecimento incompleto. Encontrar ferramentas que levem em consideração os efeitos destas incertezas se torna fundamental para uma melhor compreensão do processo na fase de projeto. Mas, evidentemente, qualquer proposição matemática passará de forma obrigatória e antecipadamente por um estudo das incertezas que envolvem o projeto de fundações de linhas de transmissão.

O lado das solicitações nas equações de projetos já apresenta inúmeras incertezas que podem ser estudadas em diversos trabalhos. A grande variabilidade das ações tais como comportamento, incidência e até mesmo os módulos não serão alvo deste trabalho. O objetivo neste estudo é a descrição probabilística da resistência a tração de fundações em sapatas de linhas de transmissão.

Do lado da resistência em fundações duas capacidades de carga deverão ser avaliadas: capacidade de carga estrutural e capacidade de carga geotécnica. A capacidade de carga estrutural envolve resistência do concreto armado e suas propriedades mecânicas. A capacidade de carga geotécnica envolve a interação solo-estrutura e as propriedades dos solos que são responsáveis pela forma como a fundação trabalha sob determinado carregamento.

### 2.1 Incertezas

O reconhecimento do subsolo constitui pré-requisito para projetos de fundações seguros e econômicos. As principais origens para as incertezas nas propriedades dos solos são três: variabilidade espacial, ensaios de solo limitados e imprecisão no método de investigação do solo. A variabilidade espacial relaciona-se à variação das propriedades dentro de uma mesma unidade de solo. Pode ser caracterizada por uma tendência média de variação dos parâmetros. Dessa forma, os parâmetros de uma análise geotécnica referem-se, usualmente, às médias das propriedades sobre uma superfície ou volume e suas incertezas referem-se às incertezas em torno dessas médias. Dos ensaios de solos são obtidos dados que são geralmente avaliados para uma pequena porção de um volume significativo de substrato, tornando possível a reprodução das condições reais de campo em laboratório. Isto implica necessariamente em incertezas que podem ser reduzidas a partir de uma quantidade significativa de ensaios, porém impossível eliminá-las.

Em engenharia de fundações para LT's toma-se o valor  $N_{SPT}$ . Através de correlações empíricas (obtidas de literaturas americanas e européias) são determinados os parâmetros geotécnicos das formulações sem levar em consideração nenhum tipo de correção. Os parâmetros principais obtidos nestas correlações são ângulo de atrito interno,  $\phi$ , intercepto de coesão,  $c$ , e peso específico do solo,  $\gamma$ , que entram em todas as formulações de capacidade de carga. O argumento levantado da diferença existente entre os tipos de sondagens executados nos países origem das correlações conjuntamente a não correção proposta em alguns estudos já evidencia a incerteza na obtenção destes valores. As principais discrepâncias podem ser oriundas desta incoerência e precisam ser tratadas.

Além disso, existem outras incertezas que influenciam diretamente a capacidade de carga das fundações e podem ser classificadas como: fenomenológicas, de decisão, de modelagem, de predição, físicas, estatísticas, devido a erros humanos, de acordo com (MELCHERS, 1999).

Segundo ANG e TANG (1990), com o intuito básico de trabalhar com as incertezas envolvidas no problema em questão, as variáveis são modeladas como variáveis aleatórias. O problema básico da Confiabilidade Estrutural é o de garantir que a resistência,  $R$ , será superior às solicitações,  $S$ , ao longo do tempo. A confiabilidade de uma estrutura deve ser medida em termos da probabilidade de sobrevivência,  $P(R \geq S)$ , ou da probabilidade de falha,  $P(R < S)$ .

O problema básico considerado no parágrafo anterior envolve especificamente um único modo de falha definido por um único estado limite. Problemas de engenharia, contudo, freqüentemente envolvem múltiplos modos de falha; isto é, podem existir vários modos de falha, nos quais a ocorrência de algum destes constituirá falha ou não funcionamento do sistema ou componente. Por exemplo, um elemento estrutural pode falhar por flexão, ou cisalhamento, ou flambagem, ou uma combinação destes. Para um sistema estrutural multicomponente, falhas de diferentes conjuntos de componentes podem constituir diferentes modos de falha. No caso de fundações, falhas podem ser causadas por capacidade de carga inadequada ou recalque excessivo.

## 2.2 Normas

A calibração de normas técnicas é geralmente uma grande tarefa; veja-se, por exemplo, a calibração dos fatores de majoração de cargas para a norma norte-americana e a calibração dos fatores de minoração de resistências da norma ACI 318-02. Um dos maiores problemas na calibração de normas é a definição numérica do objetivo a ser atingido, ou seja,  $\beta_{\text{objetivo}}$  (ou  $P_{\text{f(objetivo)}}$ ). Assim, a idéia é calibrar o método de nível mais elevado a partir dos índices de confiabilidade (ou probabilidades de falha) correspondentes à prática anterior que tenham conduzido a estruturas com desempenho considerado como satisfatório.

Atualmente, muitos estudos de confiabilidade de LT's, por exemplo, MENEZES (1988), MENEZES e SILVA, (2000) e MENEZES e SILVA (2003) vêm sendo conduzidos em âmbito nacional. Porém, no mais das vezes, tais estudos destacam o desempenho elétrico e as estruturas de suporte metálico sendo raros aqueles que tratam o problema da confiabilidade de fundações de LT's (AZEVEDO, 2009) e (VELOZO, 2010). Porém nacionalmente, em decorrência das especificidades do problema das fundações de LT's (características geotécnicas dos solos, práticas de projeto e construtivas, etc.), o Brasil ainda carece de estudos nesta área.

A proposta de pesquisa e estudos na área de confiabilidade é uma alternativa para evolução das especificações técnicas em fundações. A utilização destes conceitos e estudos na área estrutural já é bem conhecida no Brasil sendo ainda um campo bastante fértil para desenvolvimento. Em fundações, estes estudos estão ainda bem no início dos desenvolvimentos. O projeto de fundações de LT's tem conceitos específicos e no Brasil ainda não existe uma norma específica sobre o assunto.

Nos projetos de fundações executados no Brasil, a verificação ao estado limite último deve atender simultaneamente à norma de estruturas de concreto ABNT NBR 6118/2003 e a norma de fundações ABNT NBR 6122/2010, além da norma de ações e segurança nas estruturas ABNT NBR 8681/2003. Pela ABNT NBR 6122/2010, existem atualmente duas maneiras de se introduzir segurança: pelo método das cargas admissíveis (fator de segurança global) e pelo método dos estados limites (fatores parciais de segurança). A norma NBR 6122/2010 trata dos critérios gerais que regem o projeto e a execução de fundações de todas as estruturas convencionais da engenharia civil, compreendendo: residências, edifícios de uso geral, pontes, viadutos, etc. Obras especiais, como plataformas *offshore*, linhas de transmissão etc., são também regidas por esta norma no que for aplicável, todavia obedecendo às normas específicas para cada caso particular (NBR 6122/2010). No caso brasileiro ainda não existe norma específica, daí a importância de estudos que levem em consideração as especificidades. 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 de sua publicação (NBR 6122/2010). Ao se desenvolver projetos de engenharia, freqüentemente decisões são tomadas a despeito do grau de totalidade e qualidade da informação disponível. Portanto, conclusões são definidas sob condições de incerteza, no sentido de que a consequência destas resoluções não pode ser determinada com total confiança.

O problema gerado, portanto, é como projetar estruturas seguras a partir de conhecimento incompleto. Torna-se possível minimizar incertezas, mas nunca eliminá-las. Muitos problemas envolvem processos e fenômenos naturais inerentemente aleatórios. Por esses motivos, os processos de planejamento e projeto em engenharia requerem decisões a serem tomadas sob condições de incerteza. Desta forma, as incertezas presentes nos sistemas de engenharia avaliadas por conceitos estatísticos e probabilísticos estão adquirindo conotação de grande importância nos projetos atuais por representarem modelos de comportamentos mais próximos dos reais. A falha de um sistema estrutural somente poderá ser descrita de forma correta e coerente quando se adotam conceitos probabilísticos tratados em Confiabilidade Estrutural.

O projeto é composto basicamente de três etapas: concepção, análise e aplicação dos critérios de segurança. Após o projeto concebido, para uma estrutura econômica e ao mesmo tempo segura deve-se avaliar seu comportamento sob ações aplicadas à estrutura em sua vida útil. Esta fase é chamada de análise, onde é quantificado o comportamento das estruturas. Este comportamento é definido por grandezas que são submetidas aos critérios de segurança. Os critérios de segurança são regulamentados pelas normas técnicas vigentes. Para o caso de fundações de linhas de transmissão ainda não existe uma norma específica. O desempenho de qualquer tipo de fundação é avaliado com ensaios em protótipos de verdadeira grandeza onde é verificado o cálculo e os parâmetros utilizados bem como as metodologias. Uma razoável quantidade de ensaios executados em uma

mesma região pode gerar informações suficientes para avaliação de erros de modelos e para uma descrição mais apurada de determinada variável, tal como a resistência à tração das fundações.

Linhas de transmissão são sistemas em série tais que a falha de qualquer um dos seus componentes ou mais de um constitui a falha do sistema. Em outras palavras, a confiabilidade deste tipo de sistema requer que nenhum dos componentes falhe. Portanto, a falha do subsistema fundação constitui falha no subsistema torre que por sua vez implica em falha do sistema de transmissão de energia elétrica. Os últimos anos têm assistido a uma evolução constante no sentido de se dar um melhor tratamento às incertezas presentes nos sistemas. Para que tais métodos sejam implantados especificamente em fundações de linhas de transmissão é requerida a implementação de métodos probabilísticos.

### 3.0 - ENSAIOS DE FUNDAÇÕES

Na grande maioria das linhas de transmissão (onde não existam restrições ambientais e de topografia), a incidência de torres estaiadas é bem maior do que as autoportantes. Isto ocorre devido ao menor peso e conseqüentemente menores custos das torres estaiadas. Tais torres apresentam um ou dois mastros e quatro estais. Desta maneira, a grande maioria das fundações de uma linha de transmissão é de estais, cujo esforço solicitante é de tração. Além disso, dada a complexidade da interação solo-estrutura, tem sido reconhecido que o comportamento destas fundações demanda estudos mais aprofundados. Adicionalmente as fundações de torres autoportantes em algum momento de sua vida útil estarão sob ação do esforço de tração. O esforço de tração é a solicitação que controla o dimensionamento das fundações. Os estudos relativos a estes esforços são escassos o que ressalta a importância de um aprofundamento nesta questão.

Normalmente, é disponibilizada por empreendimento uma quantidade reduzida de ensaios. Poucos e reduzidos são os trabalhos baseados em um grande número de ensaios como, por exemplo, em (AZEVEDO, 2007). Neste trabalho, os resultados de 738 ensaios de tração (ver Figura 1) em fundações de LT formam a base para a avaliação do erro do modelo empregado bem como a descrição probabilística da resistência à tração apresentados no próximo capítulo.



FIGURA 1 – Ensaio de Fundação

## 4.0 - DESCRIÇÃO PROBABILÍSTICA DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO DE FUNDAÇÕES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

## 4.1 Introdução

O dimensionamento de fundações exige o conhecimento de parâmetros dos solos que não são diretamente determinados através das sondagens. Entretanto, correlações entre estes parâmetros e valores de  $N_{SPT}$  medidos em sondagens, são obtidas, permitindo que estimativas razoavelmente confiáveis sejam feitas. Estas estimativas, embora representando valores aproximados, em geral, a favor da segurança, constituem a base para a grande maioria dos dimensionamentos de fundações executadas na prática da engenharia. Assim seu conhecimento é de fundamental importância e a seguir serão apresentadas as principais correlações empregadas, tomando-se como base os valores do SPT e na presença ou não do Nível d'água (NA).

Na Tabela 1 são apresentados os valores de ensaio e quando comparados aos valores fornecidos pela Metodologia de Grenoble apresentam valores entre 37 e 66% superiores (erro do modelo). A questão levantada com ensaios anteriores a este trabalho foi confirmada o que gerou a necessidade de correção da Metodologia de Grenoble.

Tabela 1 – Resistência a Tração das Fundações na Profundidade de 3,00 metros – 50 torres

ITEM	PROFUNDIDADE (m)											
	3,00											
	R <sub>CALC</sub>	R <sub>EXP</sub>			R <sub>EXP_Méd</sub>	ε <sub>R</sub> = R <sub>EXP</sub> /R <sub>CALC</sub>			R <sub>CORR</sub>	ε <sub>CORR</sub> = R <sub>EXP</sub> /R <sub>CORR</sub>		
		ENSAIOS				ENSAIOS				ENSAIOS		
		A	B	C		A	B	C		A	B	C
1	23,95	34,54	35,55	34,56	34,88	1,44	1,48	1,44	31,33	1,10	1,13	1,10
2	23,95	33,37	35,65	34,43	34,48	1,39	1,49	1,44	31,33	1,07	1,14	1,10
3	30,59	42,23	44,55	45,43	44,07	1,38	1,46	1,49	40,13	1,05	1,11	1,13
4	23,95	34,35	35,66	33,87	34,63	1,43	1,49	1,41	31,33	1,10	1,14	1,08
5	24,51	35,66	36,09	35,96	35,90	1,45	1,47	1,47	32,08	1,11	1,13	1,12
6	23,37	33,45	33,65	33,87	33,66	1,43	1,44	1,45	30,57	1,09	1,10	1,11
7	23,95	34,04	35,77	33,99	34,60	1,42	1,49	1,42	31,33	1,09	1,14	1,08
8	23,95	35,65	34,56	33,54	34,58	1,49	1,44	1,40	31,33	1,14	1,10	1,07
9	23,95	34,88	34,86	34,05	34,60	1,46	1,46	1,42	31,33	1,11	1,11	1,09
10	26,18	38,88	37,33	37,09	37,77	1,49	1,43	1,42	34,29	1,13	1,09	1,08
11	25,07	35,97	35,88	35,99	35,95	1,43	1,43	1,44	32,82	1,10	1,09	1,10
12	24,51	35,45	36,13	35,78	35,79	1,45	1,47	1,46	32,08	1,11	1,13	1,12
13	25,07	35,96	35,99	35,98	35,98	1,43	1,44	1,44	32,82	1,10	1,10	1,10
14	24,51	35,53	36,31	35,68	35,84	1,45	1,48	1,46	32,08	1,11	1,13	1,11
15	23,37	33,00	33,73	33,89	33,54	1,41	1,44	1,45	30,57	1,08	1,10	1,11
16	24,51	35,43	36,22	35,18	35,61	1,45	1,48	1,44	32,08	1,10	1,13	1,10
17	25,07	36,09	36,99	35,58	36,22	1,44	1,48	1,42	32,82	1,10	1,13	1,08
18	24,51	35,44	36,02	35,67	35,71	1,45	1,47	1,46	32,08	1,10	1,12	1,11
19	23,37	33,72	33,68	33,33	33,58	1,44	1,44	1,43	30,57	1,10	1,10	1,09
20	23,37	33,66	33,62	33,27	33,52	1,44	1,44	1,42	30,57	1,10	1,10	1,09
21	23,37	33,63	33,59	33,24	33,49	1,44	1,44	1,42	30,57	1,10	1,10	1,09
22	22,79	33,60	33,56	33,21	33,46	1,47	1,47	1,46	29,79	1,13	1,13	1,11
23	23,37	34,57	34,53	34,18	34,43	1,48	1,48	1,46	30,57	1,13	1,13	1,12
24	23,37	34,54	34,50	34,15	34,40	1,48	1,48	1,46	30,57	1,13	1,13	1,12
25	23,95	33,99	35,60	34,46	34,68	1,42	1,49	1,44	31,33	1,08	1,14	1,10
26	23,37	34,44	34,65	34,99	34,69	1,47	1,48	1,50	30,57	1,13	1,13	1,14
27	23,37	34,41	33,43	34,59	34,14	1,47	1,43	1,48	30,57	1,13	1,09	1,13
28	23,95	34,55	34,99	34,87	34,80	1,44	1,46	1,46	31,33	1,10	1,12	1,11
29	23,37	34,55	34,65	34,65	34,62	1,48	1,48	1,48	30,57	1,13	1,13	1,13
30	23,37	34,32	33,33	34,78	34,14	1,47	1,43	1,49	30,57	1,12	1,09	1,14
31	23,95	35,00	34,88	33,99	34,62	1,46	1,46	1,42	31,33	1,12	1,11	1,08
32	23,37	33,00	33,06	33,21	33,09	1,41	1,41	1,42	30,57	1,08	1,08	1,09
33	23,37	33,57	33,03	33,18	33,26	1,44	1,41	1,42	30,57	1,10	1,08	1,09
34	23,37	33,54	33,00	33,15	33,23	1,44	1,41	1,42	30,57	1,10	1,08	1,08
35	23,37	33,51	32,97	33,12	33,20	1,43	1,41	1,42	30,57	1,10	1,08	1,08
36	23,37	33,48	32,94	33,09	33,17	1,43	1,41	1,42	30,57	1,10	1,08	1,08
37	23,95	33,45	35,01	34,77	34,41	1,40	1,46	1,45	31,33	1,07	1,12	1,11
38	23,95	33,98	34,55	35,06	34,53	1,42	1,44	1,46	31,33	1,08	1,10	1,12
39	23,37	34,44	34,65	34,99	34,69	1,47	1,48	1,50	30,57	1,13	1,13	1,14
40	23,37	34,41	33,43	34,59	34,14	1,47	1,43	1,48	30,57	1,13	1,09	1,13
41	23,95	35,00	35,67	35,17	35,28	1,46	1,49	1,47	31,33	1,12	1,14	1,12
42	26,66	38,08	37,83	37,59	37,83	1,43	1,42	1,41	34,92	1,09	1,08	1,08
43	23,95	35,66	33,09	34,59	34,45	1,49	1,38	1,44	31,33	1,14	1,06	1,10
44	24,51	36,24	35,42	34,97	35,54	1,48	1,45	1,43	32,08	1,13	1,10	1,09
45	25,63	37,03	37,02	37,05	37,03	1,44	1,44	1,45	33,56	1,10	1,10	1,10
46	24,51	36,21	34,72	35,95	35,63	1,48	1,42	1,47	32,08	1,13	1,08	1,12
47	24,51	35,26	36,12	34,99	35,46	1,44	1,47	1,43	32,08	1,10	1,13	1,09
48	23,37	35,03	35,02	35,05	35,03	1,50	1,50	1,50	30,57	1,15	1,15	1,15
49	24,51	35,20	35,52	35,33	35,35	1,44	1,45	1,44	32,08	1,10	1,11	1,10
50	23,37	36,27	37,26	35,29	36,27	1,55	1,59	1,51	30,57	1,19	1,22	1,15

Tabela 2 – Resistência a Tração das Fundações na Profundidade de 3,00 metros – Resumo todas as torres

ITEM	PROFUNDIDADE (m)											
	3,00											
	R <sub>CALC</sub>	R <sub>EXP</sub>			R <sub>EXP_Méd</sub>	ε <sub>R</sub> = R <sub>EXP</sub> /R <sub>CALC</sub>			R <sub>CORR</sub>	ε <sub>CORR</sub> = R <sub>EXP</sub> /R <sub>CORR</sub>		
		ENSAIOS				ENSAIOS				ENSAIOS		
A		B	C	A		B	C	A		B	C	
Média	23,94	35,07	35,22	34,65	34,98	1,47	1,47	1,45	31,33	1,12	1,13	1,11
Desvio	1,409	1,855	2,017	2,030	1,909	0,041	0,052	0,032	1,867	0,032	0,040	0,025
Cov	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05	0,03	0,04	0,02	0,06	0,03	0,04	0,02
MÁXIMO	33,34	48,11	48,58	48,08	48,21	1,62	1,66	1,57	43,76	1,24	1,28	1,20
MÍNIMO	21,83	33,00	32,78	32,41	33,03	1,38	1,37	1,38	28,45	1,05	1,05	1,05
Média	23,94	34,98			34,98	1,46			31,29	1,12		
Desvio	1,409	1,981			1,909	0,044			1,791	0,034		
Cov	0,06	0,06			0,05	0,03			0,06	0,03		
MÁXIMO	33,34	48,58			48,21	1,66			43,76	1,28		
MÍNIMO	21,83	32,41			33,03	1,37			28,45	1,05		

Neste capítulo será apresentada a correção proposta para a metodologia de Grenoble com sua formulação aplicada às sapatas tracionadas em solos arenosos e determinado o erro do modelo existente e do corrigido, conforme apresentado na Tabela 1. Aqui também serão comparados os valores para resistência calculada segundo método de Grenoble clássico,  $R_{CALC}$ , e a resistência de cálculo segundo a correção proposta nesta tese,  $R_{CORR}$ , ambos com a resistência da fundação definida nos ensaios adotada como o valor de carga aplicada para deslocamentos superiores a 20 mm ou a ruptura,  $R_{TESTE}$ .

#### 4.2 Descrição das Variáveis

Em cada uma das 246 torres escolhidas foram ensaiadas 3 das 4 fundações existentes. Os valores obtidos com a correção do modelo ( $R_{CORR}$ ) foram comparados aos valores experimentais ( $R_{EXP}$ ) e obtido o erro do modelo corrigido ( $\epsilon_{CORR}$ ) pela Equação 1.

$$\epsilon_{CORR} = \frac{R_{EXP}}{R_{CORR}} \quad (1)$$

De posse dos valores dos erros corrigidos de cada ensaio com a utilização do software MATLAB®, foi elaborado um histograma correspondente aos erros corrigidos. Por inspeção, foram selecionadas algumas distribuições de probabilidade (Normal, LogNormal e Gamma) que visualmente aparentavam ser as mais representativas (ver Figura 2). O teste de aderência do qui-quadrado foi executado para resolver qual das três opções será a mais representativa para o erro do modelo corrigido. Além disso, o mesmo teste verificou a validade da escolha por inspeção. A seguir são expostos os cálculos e verificações procedentes do teste realizado. Para a distribuição Normal, LogNormal e Gamma, o teste de aderência do qui-quadrado com nível de significância,  $\alpha$ , de 1% foi executado. Como 16,303 (LogNormal) < 18,144 (Normal) < 20,031 (Gamma) < 21,7, então a distribuição LogNormal é adotada como a mais representativa do erro do modelo entre as três escolhidas por inspeção. As três distribuições são apresentadas na Figura 2.

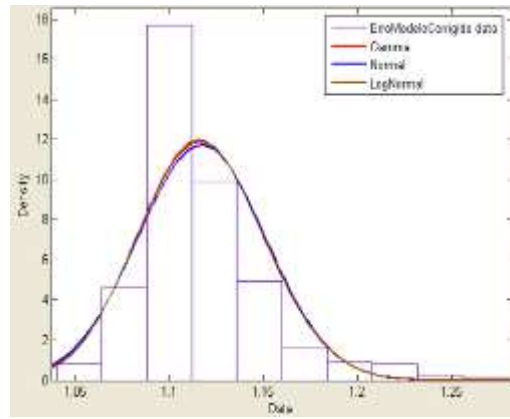


FIGURA 2 – Distribuição Normal, LogNormal e Gamma – Comparativo

#### 4.3 Método de Grenoble Corrigido

A partir da comparação entre os valores calculados pela metodologia de Grenoble,  $R_{CALC}$ , e os valores obtidos nos ensaios de tração são verificados valores de até 66% superiores aos valores ensaiados,  $R_{TESTE}$ , com desvio padrão de 1,409 e covariância de 0,06 (ver Tabela 2). A partir dos resultados de ensaios já conhecidos o caminho contrário foi percorrido. Um processo iterativo (tentativa e erro) foi instaurado para verificação de correções que reduzissem o erro do modelo. Em uma grande quantidade de iterações realizadas com auxílio do computador a partir de uma planilha de cálculo elaborada no Excel foi definida a melhor combinação de correções para os coeficientes de capacidade de carga  $\phi_{c\_corr}$ ,  $\phi_{(\phi+\gamma)\_corr}$  e  $\phi_{q\_corr}$  além da correção global do valor da capacidade de carga,  $\phi_{ft\_corr}$ , os quais serão apresentados a seguir. O objetivo inicial era aproximar  $\epsilon_{CORR}$  da unidade. Mas, considerou-se satisfatório neste trabalho o valor mínimo de 1,05 (5%) para este erro como ponto de partida. Novos ensaios deverão ser executados e estes coeficientes poderão ser melhor refinados.

A comparação entre os valores corrigidos calculados pela metodologia de Grenoble corrigida,  $R_{CORR}$ , com os valores obtidos nos ensaios de tração é verificada valores mínimo de apenas 5% até no máximo 28% superiores aos valores ensaiados,  $R_{TESTE}$ , com desvio padrão de 1,791 e covariância de 0,06 (ver Tabela 2).

As expressões abaixo apresentam os coeficientes de resistência ao arrancamento corrigidos utilizados na expressão geral da capacidade de carga à tração proposta neste trabalho. O coeficiente corrigido de capacidade de carga à tração relacionada à coesão,  $M_{c\_corr}$ , é calculado pela seguinte expressão:

$$M_{c\_corr} = \phi_{c\_corr} \times \left[ -\frac{tg\alpha}{tg\phi} + \frac{f}{H} \cos\phi \times \left( 1 + \frac{tg\alpha}{tg\phi} \right) \right] \times \left( 1 - \frac{1}{2} tg\alpha \times \frac{D}{R} \right) \quad (2)$$

$$\phi_{c\_corr} = 1,03 \quad (3)$$

O coeficiente de capacidade de carga à tração, relacionado ao atrito e à gravidade,  $M_{\phi} + M_{\gamma}$ , é calculado pela seguinte expressão:

$$(M_{\phi} + M_{\gamma})_{corr} = \phi_{(\phi+\gamma)\_corr} \times \left[ \frac{\sin\phi \times \cos(\phi + 2\alpha)}{2 \cos^2 \alpha} \times \left( 1 - \frac{1}{3} tg\alpha \times \frac{D}{R} \right) \right] \quad (4)$$

$$\phi_{(\phi+\gamma)\_corr} = 1,15 \quad (5)$$

O coeficiente de capacidade de carga à tração, relacionado à sobrecarga,  $M_q$ , é calculado pela seguinte expressão:

$$M_{q\_corr} = \phi_{q\_corr} \times \left[ M_{c\_corr} tg\phi + \left( 1 - \frac{1}{2} tg\alpha \times \frac{D}{R} \right) . tg\alpha \right] \quad (6)$$

$$\phi_{q\_corr} = 1,08 \quad (7)$$

#### 5.0 - CONCLUSÃO

Para elaboração deste trabalho foram executadas 948 (novecentas e quarenta oito) sondagens à percussão tipo SPT. Após executadas as fundações nos próprios locais de implantação das torres foram executados 738 (setecentos e trinta oito) ensaios de arrancamento em fundações tracionadas de torres autoportantes como critério de melhoria e aprovação das fundações. Os limites de deslocamentos adotados como critério de ruptura a partir da

experiência dos profissionais envolvidos no projeto foram de um máximo de 20mm, ou a própria ruptura do solo observada a partir de trincas na superfície do solo.

O fato é que os resultados destes experimentos foram explorados e avaliados em conjunto fornecendo informações consistentes a respeito de fundações tracionadas em solos arenosos.

O objetivo do presente trabalho foi exatamente definir uma correção na metodologia de cálculo deste tipo de fundação baseada no método da Universidade de Grenoble e nos resultados destes ensaios em verdadeira grandeza.

No acompanhamento das sondagens e construção destas fundações foram levantados locais onde os ensaios fossem representativos do solo arenoso da região. Cálculos eram realizados concomitantemente à execução dos ensaios procurando uma correção na formulação que representasse o comportamento destas fundações. Após a realização destes ensaios e um estudo que foi concluído com uma correção na formulação da Metodologia de Grenoble para cálculo de capacidade de carga à tração de fundações em sapatas executadas em solos arenosos.

Em dezembro de 2010, um ano após a conclusão do empreendimento que serviu como base de dados para esta nova formulação, foram ensaiadas 6 fundações executadas como modelo em terrenos com características geotécnicas similares na região de implantação de uma nova LT. Os cálculos das fundações foram concebidos com a nova formulação. Os resultados dos ensaios foram excelentes para validar esta metodologia.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ANG, A. H-S.; TANG, W. H. Probability Concepts in Engineering Planning and Design – Basic Principles, Vol. I, New York , John Wiley & Sons, Inc., 1975.
- (2) ABNT NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.
- (3) AZEVEDO, C.P.B. Avaliação da Confiabilidade de Fundações de Torres Estaiadas em Linhas de Transmissão. Dissertação de Mestrado UFMG. Belo Horizonte: 150p, 2007.
- (4) AZEVEDO, C.P.B. Fundações para Linhas de Transmissão, Belo Horizonte, Editora FUNDARC, 2009.
- (5) MELCHERS, R. E. Structural Reliability Analysis and Prediction, John Wiley & Sons, 1999.
- (6) MENEZES, RCR. Estudos de Confiabilidade de Linhas de Transmissão Submetidas à Ação do Vento. Dissertação de Mestrado UFRGS. Porto Alegre: 85p, 1988.
- (7) MENEZES, RCR. e SILVA, JBGF. 2000. "On the variability of mechanical properties of materials for transmission line steel towers". Artigo revista ELECTRA Abril/2000 - CIGRÉ. França.
- (8) VELOZO, L.T. Metodização do Estudo das Fundações para Suportes de Linhas de Transmissão. Tese de Doutorado PUC-Rio. Rio de Janeiro: 153p, 2010.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Crysthian Purcino Bernardes Azevedo

Nascido em Pará de Minas MG em 1976

Doutor em Engenharia de Estruturas pela UFMG em 2011

Engenheiro calculista de estruturas e fundações, Professor de Mecânica dos Solos e Fundações da FUMEC e Gerente Técnico da Premo Construções e Empreendimentos, autor do livro Fundações para Linhas de Transmissão – Dimensionamento e Execução, diversas publicações na área de fundações