

## Efeitos da dilatação térmica em torres

Este trabalho demonstra que após análise experimental criteriosa, através de medições com instrumentos laser, sem contato, nos postes instalados no laboratório da Seccional Tecnologia e Engenharia, que os parâmetros estabelecidos na dilatação térmica mostram que em torres monotubulares, postes, esbeltos de baixa relação d/t (diâmetro/espessura), metálicas ou de concreto, os efeitos térmicos provocados pelo sol, além de serem mais críticos que os do vento operacional são, numa ordem de grandeza, mais freqüentes.

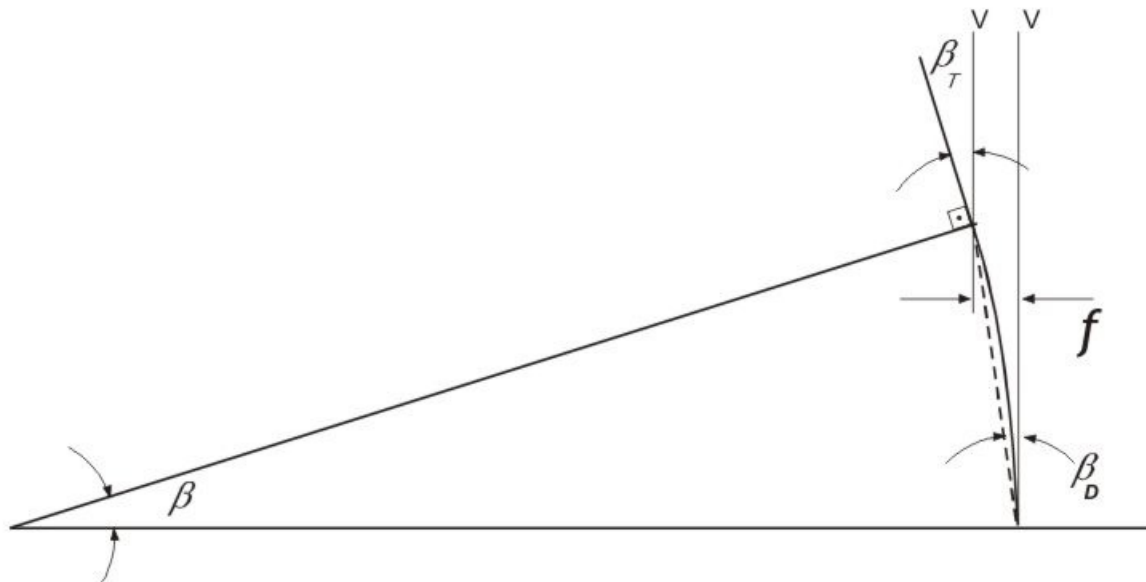
A torre monotubular é projetada para atender a um certo valor de "tilt" que é o ângulo de deformação da estrutura, determinado pela tangente ao topo do poste e a vertical, sendo efetivamente o ângulo em que as antenas estarão operando quando sujeitas ao vento operacional.

Para o cálculo do ângulo de "tilt", são adotados critérios de aerodinâmica e da teoria da elasticidade, analisando as estruturas com o carregamento de antenas e acessórios, para um determinado valor de vento operacional.

### 1 - Relação entre ângulos de "tilt" e ângulos de deflexão

São apresentadas três relações demonstrando que o ângulo de "tilt" é diferente do ângulo da deflexão, conforme:

#### 1.1 - Admitindo deformação da linha neutra da estrutura em circunferência:



$\beta_T$  = Tilt = Ângulo da tangente ao topo do poste com a vertical

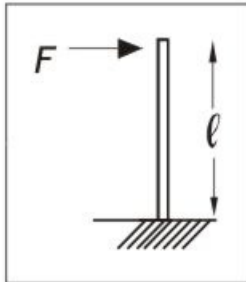
$\beta_D$  = Deflexão = Ângulo formado pela flecha e a vertical

Por construção tem-se que  $\beta_T = \beta$

Deflexão:  $\beta_D = 90^\circ - (180^\circ - \beta_T) / 2 = \beta_T / 2$

$$\frac{\beta_T}{\beta_D} = 2,0$$

**1.2 - Admitindo viga de seção constante engastada:**



$$\text{Flecha} = \frac{1}{3} \cdot \frac{Fl^3}{EI}$$

$$\beta_D (\text{rad}) = \frac{1}{3} \cdot \frac{Fl^2}{EI}$$

$$\beta_T (\text{rad}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{Fl^2}{EI}$$

Portanto:  $\frac{\beta_T}{\beta_D} = \frac{1/2}{1/3}$

$$\frac{\beta_T}{\beta_D} = 1,5$$

**1.3 - Adotando poste real de 40m**

Considerando o poste de 40m de altura, instalado no laboratório da Seccional, constituídos por seções tronco-cônicas, com espessuras variando de 3,00mm no topo a 6,35mm na base, conforme planilha de dimensionamento do anexo 1 obtemos:

Tilt:  $\beta_T = 1,0^\circ$

Deflexão: flecha = 431mm

$$\beta_D = \arctan 431/40000 = 0,62$$

$$\frac{\beta_T}{\beta_D} = 1,6$$

**Conclusão:**

Adotaremos a relação efetiva  $\beta_T / \beta_D = 1,6$  por ser a que melhor representa as torres monotubulares com carregamento real para telecomunicações.

**Notas:**

a) Sobre planilha de dimensionamento do anexo 1:

Faz parte da patente de invenção PI 9606177-4, que permite o desenvolvimento da solução otimizada para torres e postes metálicos. Concluída após 15 anos de pesquisa da equipe da Seccional Tecnologia e Engenharia.

b) Sobre o vento operacional:

Conforme NBR 6123:

$V_k$  = Velocidade característica do vento

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3$$

Sendo:

$V_0$  = Velocidade básica do vento, conforme isopleta local = 35 m/s

$S_1$  = Fator topográfico = 1,1

$S_2$  = Fator de rugosidade do terreno = Categoria IV, Classe B = 0,99

$S_3$  = Fator estatístico = 1,1

$$V_k = 35 \cdot 1,1 \cdot 0,99 \cdot 1,1 = 41,93 \text{ m/s} \times 3,6 = 150,95 \text{ km/h}$$

$$\text{Vento operacional} = 0,55 \cdot V_k = 0,55 \cdot 150,95 = 83 \text{ km/h}$$

## 2 - Relação entre o ângulo de "tilt" e os efeitos térmicos:

### 2.1 - Teoria

Adotando:

$\Delta\theta$  = Diferença de temperatura entre faces opostas "quente" e "fria" do poste ( $^{\circ}\text{C}$ )

$h$  = Altura do poste (mm)

$\bar{D}$  = Diâmetro médio do poste (mm)

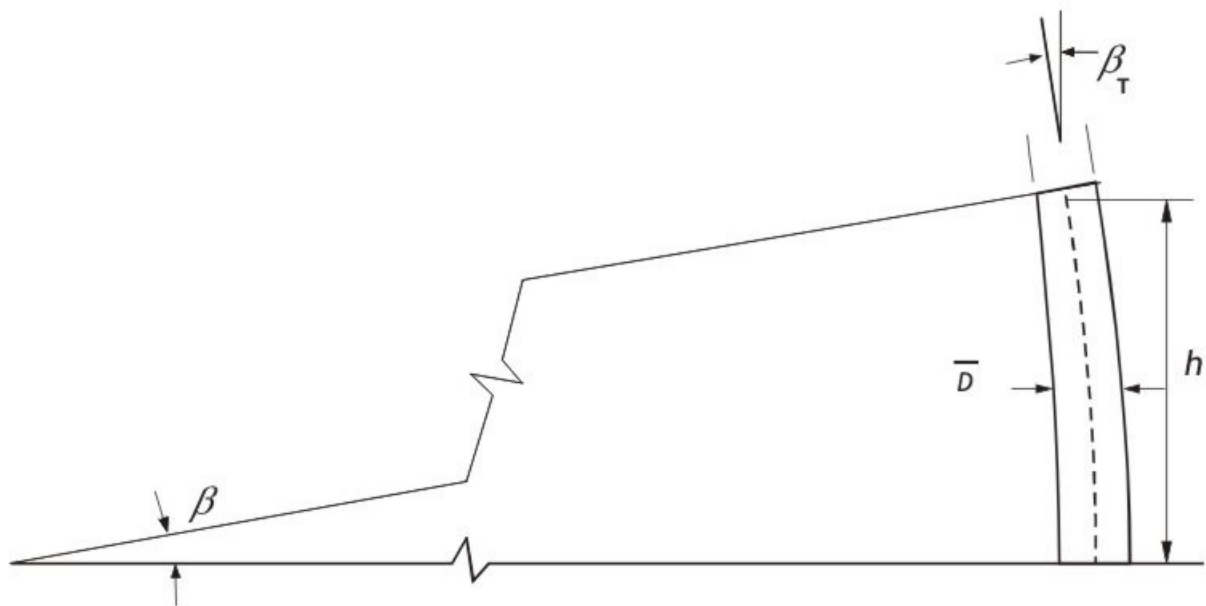
$\alpha$  = Coeficiente de dilatação linear do aço;  $\alpha = 1,17 \cdot 10^{-5} / ^{\circ}\text{C}$

Por este tipo de estrutura ser empregado em sistemas onde a frequência dos rádios está na faixa de SHF, o ângulo de "tilt" deve ser inferior a  $3^{\circ}$ .

Em casos onde o mini-link é crítico, adota-se  $0^{\circ}30'00''$

Para ângulos menores que  $3^{\circ}$  podemos adotar  $\text{sen } \beta = \beta$  em radianos pois o erro absoluto é desprezível, conforme:

$$\text{Erro} = \frac{(\beta - \text{sen } \beta)}{\text{sen } \beta} = 0,00046$$



$$\text{Portanto} \quad \Rightarrow \quad \left( \frac{h}{\beta} \pm \bar{D} \right) \beta_i = h \pm \Delta h \quad \Rightarrow \quad \Delta h = \bar{D} \cdot \beta_r$$

$$\Delta h = \pi \cdot \bar{D} \cdot \beta_r / 180 \quad \text{e tendo que } \Delta h = \alpha \cdot h \cdot \Delta\theta \quad \Rightarrow \quad \beta_r = 180 \cdot \alpha \cdot h \cdot \Delta\theta / \pi \cdot \bar{D}$$

$$\text{Adotando a relação } \beta_r = 1,6 \cdot \beta_D \quad \Rightarrow \quad \boxed{\beta_D = 36 \cdot \alpha \cdot h \cdot \Delta\theta / \bar{D}}$$

## 2.2 – Ensaio de laboratório

Utilizando os valores experimentais obtidos em 03 postes instalados no campo de testes da Seccional Tecnologia e Engenharia Ltda, localizado na cidade de Curitiba, PR, Brasil, coordenadas S25°26'25,2" e W49°21'48,4" foram obtidos os valores da tabela a seguir:

Estrutura	Altura (m)	Relação entre diâmetro médio e espessura média	Diferença média de temperatura face quente/fria	Diferença máxima de temperatura face quente/fria
		$\bar{D}/t$	$\Delta\theta_{med}$	$\Delta\theta_{max}$
Poste P	40	134	7,0°	11,0°
Poste C	30	68	7,2°	12,5°
Concreto	10,5	2	11,6°	19,0°

### Poste "P"

Poste "patenteado" metálico, galvanizado a fogo, com pintura refletiva na cor alumínio constituído por seções tronco-cônicas de alta relação  $\bar{D}/t$  construído de acordo com a patente PI 9606177-4.

### Poste "C"

Poste "convencional" metálico, galvanizado a fogo, com pintura refletiva na cor alumínio, constituído por seções tronco-cônicas de baixa relação  $\bar{D}/t$ , onde " $\bar{D}$ " é o diâmetro médio e " $t$ " a espessura, construído de acordo com as técnicas estabelecidas até então, obedecendo normas e práticas convencionais.

### "Concreto"

Poste de concreto armado, cônico, com 10,5m de altura, sem pintura.

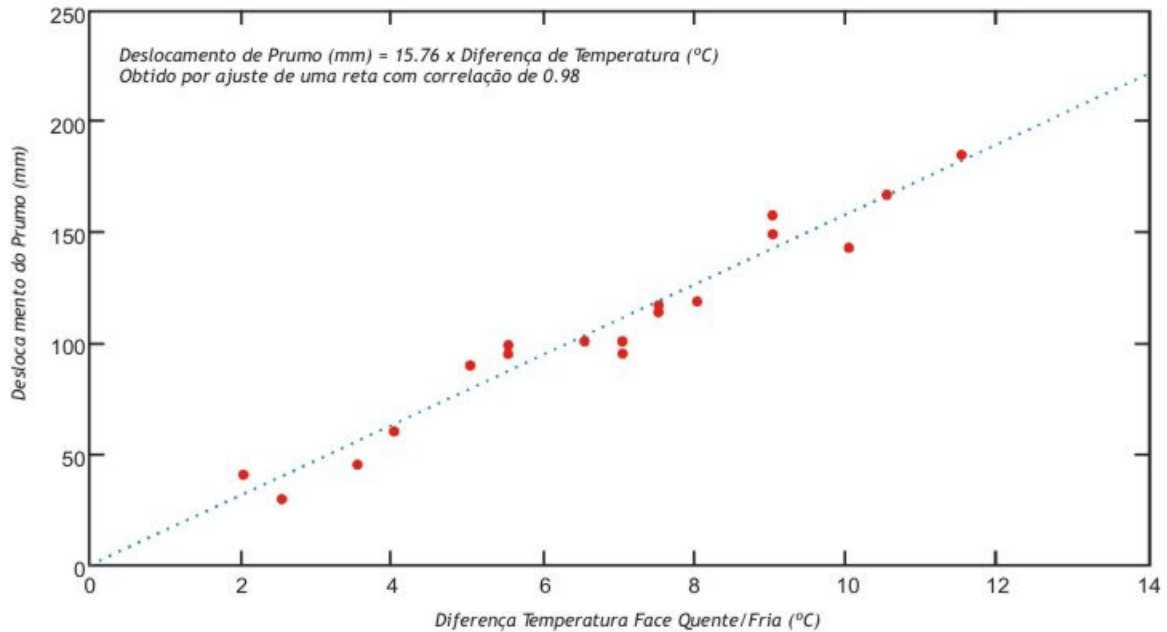
As variações médias das diferenças de temperatura foram medidas com mais de 100 leituras entre 29/Ago/01 e 04/Jan/02, entre às 08h00 às 18h00, horário local, considerando-se que neste período ocorreu o horário brasileiro de verão, mostraram-se **levemente decrescentes com a relação  $\bar{D}/t$**  conforme tabela acima.

Para verificar a perfeita verticalidade do poste e o deslocamento do centro do topo em função da incidência do sol, foi instalado internamente à estrutura, um "pêndulo" desde o centro do topo até a centro base, conforme foto 1.

Para eliminar os efeitos secundários da inclinação do sol na estrutura e avaliar os efeitos globais da deformação térmica provocada, foram efetuadas novas medições das variações das temperaturas no período do **solstício de verão**.

Na figura a seguir é apresentado o gráfico das diferenças de temperaturas entre a face "quente" e a face "fria" versus o deslocamento do pêndulo do prumo instalado internamente ao "poste P":

**Deslocamento do Prumo (mm) x Diferença de Temperatura Face Quente/Face Fria (°C)**



O pequeno espalhamento dos pontos se deve à dificuldade em se obter a eliminação total dos efeitos do ventos sobre a estrutura.

A equação da reta obtida **experimentalmente** é  $\Delta x = 15,76 \cdot \Delta\theta_{med}$

Da geometria tem-se que  $\Delta x = h \cdot \tan \beta_p$ ,

Como estamos utilizando pequenos ângulos  $\Delta x = h \cdot \beta_p = h \cdot \pi \cdot 36 \cdot \alpha \cdot h \cdot \Delta\theta_{med} / 180 \cdot \bar{D}$

$$\Delta x = ( \pi \cdot \alpha \cdot h^2 / 5 \cdot \bar{D} ) \cdot \Delta\theta_{med}$$

Adotando-se os parâmetros **teóricos** do poste "P" ensaiado, tem-se uma reta com praticamente o mesmo coeficiente angular de 15,70 conforme:

$$\Delta x = ( \pi \times 1,17 \cdot 10^{-5} \times 40.000^2 / 5 \times 749 ) \times \Delta\theta_{med} = 15,70 \cdot \Delta\theta_{med}$$

### **2.3 – Cálculo do coeficiente de dilatação do aço**

Portanto comprava-se que para pequenos ângulos, com os parâmetros estabelecidos da dilatação térmica, calcula-se com elevado grau de precisão e acuidade os ângulos devidos às variações térmicas provocadas pelo sol; e mais, pode-se determinar o coeficiente de dilatação térmica do material do poste, no caso:

$$\alpha_{aço} = 15,76 \times 5 \times 749 / \pi \times 40.000^2 = 1,17 \cdot 10^{-5} / ^\circ C$$

Comprovando experimentalmente a teoria proposta.

### **3 - Confrontando os valores do ângulo de "tilt" para o "Poste P – Patentado"**

Dados do poste:

Item	Descrição	Valor
$\alpha$	Coeficiente de dilatação linear do aço	$\alpha = 1,17 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
h	Altura poste	40.000 mm
$\Delta\theta$	Varição da temperatura entre faces opostas "quente" e "fria" do poste	11 $^\circ\text{C}$
$\bar{D}$	Da planilha do anexo 1 = (515+590+648+703+757+810+861+910+951)/9	749 mm

#### 3.1 – Cálculo do "tilt" através do gráfico anterior item 2.2, **obtido experimentalmente**

No ponto aonde a diferença máxima de temperatura entre as faces "quente" e "fria" é 11 $^\circ\text{C}$  obtemos flecha de 173mm. Adotando fórmula do item 1.3

$$\beta_T = (\text{arc tan flecha} / \text{altura}) \cdot 1,6 \Rightarrow \beta_T = (\text{arc tan } 173 / 40000) \cdot 1,6 \Rightarrow \boxed{\beta_T = 0,40^\circ}$$

#### 3.2 - Cálculo do "tilt" através da fórmula do item 2.1 **obtido pela teoria proposta** neste trabalho

$$\beta_T = 180 \cdot \alpha \cdot h \cdot \Delta\theta / \pi \cdot \bar{D} \Rightarrow \beta_T = 180 \times 1,17 \cdot 10^{-5} \times 40.000 \times 11 / 3,14 \times 749 \Rightarrow \boxed{\beta_T = 0,39^\circ}$$

Resumindo, os postes construídos a partir da patente PI 96.061.77-4 possuem os ângulos de "tilt" devido aos efeitos de insolação, calculados e medidos, que atendem às especificações

### **4 - Valor do ângulo de "tilt" para o "Poste C – Convencional"**

Dados do poste:

Item	Descrição	Valor
$\alpha$	Coeficiente de dilatação linear do aço	$\alpha = 1,17 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
h	Altura poste	30.200 mm
$\Delta\theta$	Varição da temperatura entre faces opostas "quente" e "fria" do poste	12,5 $^\circ\text{C}$
$\bar{D}$	Da planilha do anexo 2 = (155+188+212+236+257+278+298+334+369+402+434+466+495+524+552)/15	347 mm

$$\beta_T = 180 \cdot \alpha \cdot h \cdot \Delta\theta / \pi \cdot \bar{D} \Rightarrow \beta_T = 180 \times 1,17 \cdot 10^{-5} \times 30.200 \times 12,5 / 3,14 \times 347 \Rightarrow \boxed{\beta_T = 0,73^\circ}$$

Resumindo; apesar da menor altura, o ângulo de "tilt" do poste convencional devido a dilatação térmica, ultrapassa meio grau, que na maioria dos casos já é o limite máximo adotado pelas operadoras de telecomunicações.

Se possuísse a mesma altura de 40m; conforme a teoria proposta tem-se um valor ainda mais crítico:

$$\beta_T = (40.000 / 30.200)^2 \cdot 0,73 \Rightarrow \boxed{\beta_T = 1,28^\circ}$$

### **5. Conclusões:**

- 9 As antenas estarão sujeitas ao ângulo de "tilt" e não ângulo de deformação quando sujeitas a um certo vento operacional ou a uma determinada diferença de temperatura entre as faces "quente" e "fria" dos postes.
- 9 **O ângulo de "tilt" é 60% maior que o ângulo de deformação.**
- 9 Os efeitos do sol são muitos casos mais críticos que os efeitos dos ventos sobre as estruturas.
- 9 Os efeitos da dilatação térmica provocados pelo sol nos postes são mais intensos e freqüentes do que os do vento, o que pode ser comprovado pela maior incidência de fissuras na face norte dos postes de concreto instalados no hemisfério sul.
- 9 É essencial que as operadoras e fornecedores considerem os efeitos térmicos não previstos até então pela "boa prática" da engenharia, estabelecida nas normas convencionais, tendo em vista que compram "gato por lebre".
- 9 O efeito do sol é muito mais crítico em postes de concreto pois possuem maior coeficiente de dilatação linear:  $\alpha_{\text{aço}} = 1,17 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$   $\alpha_{\text{concreto}} = 1,26 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ , sendo agravados pelo menor diâmetro médio e maior média de diferença de temperatura entre as faces "quente" e "fria" conforme comprovado pelas medições efetuadas. Sumarizando: para determinada altura o fator  $(\alpha \cdot \Delta\theta / \bar{D})$  é sempre mais crítico no poste de concreto.

### **6. Recomendações**

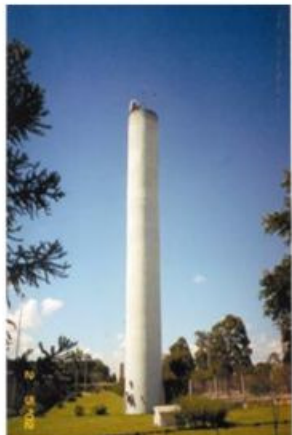
- 9 Incluir nas especificações técnicas de propostas de postes que a estrutura deve atender a um determinado ângulo "tilt" e não um ângulo de deformação.
- 9 **Incluir nas especificações técnicas de propostas de postes que a estrutura deve atender a um determinado ângulo "tilt" tanto para um certo vento operacional como para uma variação de temperatura de 12°C entre as faces.**
- 9 A prumada de estruturas ou laudo de verticalidade devem ser obtidos quando não existe diferenças de temperaturas entre as faces "quente" e "fria" devido ao sol, preferencialmente no período da manhã e sem incidência de vento.
- 9 A prumada pode ser efetuada com precisão e acuidade usando prumo interno em postes metálicos com janelas de inspeção.
- 9 Se for necessária a pintura da estrutura, deverá ser adotada tinta preferencialmente de cor clara e refletiva, pois a taxa de absorção de calor poste é diretamente proporcional à emissividade da superfície externa.

**7. Fotos dos ensaios**



**Foto 1**

Dispositivo de medição do deslocamento horizontal do topo da estrutura em relação ao centro da base da estrutura, instalado com o pêndulo no interior do "poste P"



**Foto 4**

Deseja saber a deformação provocada pelo sol na estrutura ao lado? Consulte-nos... Estamos à disposição!



**Fotos 2 e 3**

Leituras das temperaturas da face quente e face fria com a utilização do termômetro sem contato no "poste P" à esquerda e "poste C" à direita

