



São Paulo, 10/15 de Abril de 1972

GRUPO DE ESTUDOS DA TRANSMISSÃO

OTIMIZAÇÃO DE FUNDAÇÕES TIPO TUBULÃO PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO

Engº Claudio Renato Penteado de Luca

THEMAG ENGENHARIA

1. INTRODUÇÃO

Procuraremos apresentar, neste trabalho, um resumo dos principais fatores que influem no custo de fundações tipo tubulão para linhas de transmissão, sob o ponto de vista estrutural.

Será sugerida marcha de cálculo para o dimensionamento e otimização sem e com o emprego de Computador Eletrônico.

2. ASPECTOS PRINCIPAIS

A otimização do dimensionamento de tubulões, quando aplicada à fundação de torres de linhas de transmissão é importante principalmente por se ter grande repetição.

Como se trata de obra linear, ou seja, de grande extensão, o transporte dos materiais é fator preponderante no custo -

-quilo-colocado. Deste fato depreende-se que o concreto será muito mais afetado do que o ferro, resultando, como solução mais econômica, em princípio, a de menor volume de concreto.

A redução do volume é limitada inferiormente pela execução, pois diâmetros muito pequenos não são exequíveis manualmente estando o maquinário apropriado ainda pouco difundido. Em outros casos as tensões no solo, limitam as dimensões do tubulão em valores maiores do que os mínimos de execução.

A melhoria da qualidade do concreto, no que diz respeito à sua tensão de ruptura, deve ser analisada, levando-se naturalmente em conta a elevação de custo que isto acarreta, não só pelo aumento de consumo de cimento como também no maior controle que será exigido, controle êste bastante dificultado pelo deslocamento contínuo da frente de serviços. Não se adianta melhorar a qualidade do concreto em tubulões solicitados predominantemente à tração.

Pode-se pensar no emprêgo de ferro especial (CA50) no lugar do comum (CA24) para se reduzir o peso transportado. Não se pode esquecer, entretanto, que a tensão de trabalho do ferro também é limitada pelo fissuramento do concreto. A bitola de ferro esta intimamente ligada ao fissuramento sendo que para o ferro CA50, nas condições exigidas pela EB3/67, apenas as bitolas até 12,5 mm podem atingir a tensão de escoamento, reduzindo-se sensivelmente para as demais.

O emprêgo de barras finas, decorrente do que foi dito acima, acarreta maior número de barras, portanto maior mão de obra de colocação e conseqüentemente menor espaçamento entre barras. Êste menor espaçamento exige que o concreto seja dosado com agregados menores, o que conduz a aumento de cimento para se dotar a mesma resistência, com conseqüentemente aumento de custo.

Outro aspecto importante para a otimização, não do tubulão - em si, mas da obra em conjunto é o de definir tubulões tipo-que abranjam a grande maioria dos casos que possam surgir ao longo da linha. Isto pode ser feito definindo-se, a priori, uma profundidade mínima e outro máxima para o emprêgo do tubulão. O intervalo entre as profundidades limites deve ser - dividido, por exemplo, de metro em metro. Para cada uma das profundidades assim obtidas deve-se distinguir os diversos - afloramentos necessários. O valor e número de afloramentos a serem utilizados dependerá da topografia da região e também - do serviço de terraplenagem que se pretende executar.

Deste modo, pode-se condensar em uma tabela, para cada tipo- de torre, dezenas de tipos de tubulões.

### 3. CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA

Fundações de torres de linhas de transmissão são solicitadas alternadamente, dependendo do sentido do vento atuante. Isto significa que devem ser dimensionadas para suportarem tanto - aos esforços de compressão como aos de tração. O estudo eco- nômico encontra neste fato (cargas alternadas) um campo bas- tante vasto, pois os esforços de tração podem ser predomina- tes para um tubulão com determinado diâmetro, tipo de concre- to e de ferro, passando a ser os de compressão quando se va- ria uma ou mais características do tubulão. Deve-se procurar a situação em que não haja predominância nem de um nem do ou- tro conjunto de esforços. Isto dificilmente é conseguido por se ter que respeitar dimensões e características limites.

Um tubulão, como estrutura enterrada, está sujeito às reações do solo. A que nos interessa particularmente é a pressão la- teral proveniente do esforço horizontal. Conhecendo-se a dis- tribuição das pressões laterais, pode-se determinar a secção onde o momento é máximo e o seu valor. Esta secção será a do dimensionamento.

4. CONSIDERAÇÕES SOBRE FISSURAÇÃO

A EB3/67 indica duas fórmulas para a verificação da fissura, sendo necessário satisfazer apenas uma delas, ou seja, a bi tola máxima a ser utilizada deve ser menor do que o maior dos dois valores resultantes das duas fórmulas.

$$\phi_1 \leq \frac{\eta K_1 \mu_o}{\bar{\sigma}_f} \quad \text{com } \mu_o \geq 0,01$$

$$\phi_2 \leq \frac{\eta K_2 \mu_e}{\bar{\sigma}_f (4,5 \mu_e + 0,4)}$$

$$\phi \leq \max(\phi_1, \phi_2)$$

onde as letras tem os seguintes significados:

$\eta$  = coeficiente de aderência da barra

$\mu_o$  = relação entre a área de ferro tracionado e a área de concreto

$\mu_e$  = relação entre a área total de ferro e a área de concreto que envolve as barras

$\bar{\sigma}_f$  = tensão na armadura de tração

$K_2 = K_1/5,7$  constante que depende da abertura máxima permitida

Para estruturas não protegidas, a mesma EB3/67 fixa como abertura máxima das fissuras o valor 0,2 mm e o valor correspondente de  $K_1$  como sendo 240.000 kgf/cm.

Pode-se colocár  $\mu_o$  e  $\mu_e$  em função de  $\mu_i$  (relação entre a área total de ferro e área total de concreto). No caso de  $\mu_o$ , que é a relação entre a área de ferro tracionada e a área de concreto, teremos uma dependência com a posição da linha neutra ou ainda da tensão no concreto. Pode-se construir gráficos -

como o da ilustração 4.1 no qual se determina a tensão máxima a ser usada na barra em questão ( $\bar{\sigma}_f$ ), em função da porcentagem de ferro ( $\mu_i$ ) e a tensão no concreto ( $\sigma_c$ ).

Constatou-se, em inúmeros casos estudados, que foi a primeira fórmula indicada na EB3/67 a determinante da bitola máxima a ser utilizada.

Fazendo-se, nesta fórmula,  $\mu_o = 1\%$  obtém-se para o ferro CA50, cujo valor da aderência é 1,5, e nas condições de abertura máxima de 0,2 mm os seguintes valores das tensões máximas permissíveis para as diversas bitolas:

$\varnothing 12,5$ mm	$\bar{\sigma}_f = 2.880 \text{ kg/cm}^2$
$\varnothing 16,0$ mm	$\bar{\sigma}_f = 2.250 \text{ kg/cm}^2$
$\varnothing 20,0$ mm	$\bar{\sigma}_f = 1.800 \text{ kg/cm}^2$
$\varnothing 25,0$ mm	$\bar{\sigma}_f = 1.440 \text{ kg/cm}^2$

Estes números mostram claramente a influência da bitola na tensão máxima a ser admitida. Estes valores máximos crescem para porcentagens maiores, podendo-se, por exemplo, para a bitola de 25 mm, atingir o limite de  $3.000 \text{ kg/cm}^2$  somente quando  $\mu_i$  for superior a 3%.

Para o ferro CA 24 esta restrição não é importante, pois afetaria apenas as barras muito grossas.

$\varnothing 25$ mm	$\bar{\sigma}_f = 1.350 \text{ kg/cm}^2$
$\varnothing 32$ mm	$\bar{\sigma}_f = 1.350 \text{ kg/cm}^2$
$\varnothing 40$ mm	$\bar{\sigma}_f = 1.080 \text{ kg/cm}^2$

E assim mesmo com pequena redução da tensão limite, que é  $1.400 \text{ kg/cm}^2$ .

#### 5. FATORES QUE INFLUEM NO CUSTO

Influem no custo do tubulão o volume e o tipo de concreto; o peso, tipo e bitola do ferro; o volume de escavação e a área de formas para a parte aflorante. Os preços fornecidos para a otimização devem ser bem detalhados, pois caso contrário, as conclusões podem se afastar muito da realidade.

Portanto, deve-se fornecer preços dos diversos tipos de concreto possíveis de serem empregados, considerando todos os acréscimos que a melhora de tipo acarreta; os preços dos tipos de ferro, por bitola, considerando os gastos secundários com a redução da bitola como o aumento na mão de obra de colocação e amarração de estribos e redução do agregado do concreto; os preços de escavação se possível correlacionando profundidade e diâmetro do fuste e o preço da forma.

#### 6. FATORES QUE INFLUEM NO DIMENSIONAMENTO

Influem no dimensionamento do tubulão o conjunto de carregamentos a que poderá estar sujeito; toda sua geometria e em particular o diâmetro do fuste; o tipo de concreto; o tipo de ferro; a bitola e o recobrimento dos ferros; a abertura máxima permitida para as fissuras e a armadura mínima.

Partindo-se dos carregamentos e características do solo, determinar-se a geometria mínima do tubulão bem como a seção de dimensionamento e o momento fletor atuante. Os esforços normais, são os mesmos aplicados no topo do tubulão corrigidos do peso próprio do trecho de fuste acima da seção considerada. Assim, dependem do diâmetro do fuste, mas pode-se perfeitamente desprezar sua variação visto que a otimização conduz a diâmetros próximos ou mesmo iguais aos iniciais.

Comparando-se diversos tubulões da mesma seção, solicitados por esforços crescentes, verifica-se que as porcentagens de ferro também são crescentes e na mesma relação. Isto aconte-

ce até um valor de esforço, a partir do qual a porcentagem - cresce mais rapidamente do que ele próprio. Esta mudança é devido a ter-se atingido a tensão máxima à compressão do concreto, sendo necessário colocar-se armadura também para a compressão. Para estes casos a variação do tipo de concreto, normalmente conduz a resultados mais econômicos do que a varia-  
ção do diâmetro.

Entende-se por armadura mínima, aquela que determina a secção a mesma resistência que a da secção não armada, considerada-trabalhando no estágio I. A tensão máxima de tração do concreto deve ser tomada igual a um décimo da de compressão. Como se trata de secções solicitadas a flexo-tração ou a flexo-compressão, deve-se supor que a determinação seja feita tam-  
bém para flexo-tração ou flexo-compressão, de mesma excentri-  
cidade que a dos esforços aplicados.

É mais simples determinar-se os esforços máximos que a sec-  
ção suposta no estágio I e comparar com os esforços aplica-  
dos. O dimensionamento deverá ser feito com o maior dos dois  
valores, resultando sempre ferragem maior ou igual a mínima.

## 7. DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento pode ser feito sem ou com o auxílio do computador eletrônico.

No primeiro caso, teremos evidentemente uma otimização apro-  
ximada, para a qual se admite constante uma ou mais das va-  
riáveis que determinam o custo do tubulão. Isto pode ser fei-  
to por meio de uma análise prévia dos preços existentes, ele-  
gendo as variáveis mais importantes.

Pode-se, por exemplo, seguir a seguinte marcha de cálculo:

1 - Calcular a porcentagem de ferro necessária para satisfa-

zer aos esforços de compressão ( $M_c$ ), com o raio mínimo - definido anteriormente e para o tipo de concreto de menor tensão à compressão;

- 2 - Calcular a porcentagem de ferro necessária para satisfazer aos esforços de tração ( $M_T$ ), também com o raio mínimo, obrigando que no ferro se tenha a tensão admissível;
- 3 - Comparar as porcentagens  $M_c$  e  $M_T$ . Se  $M_T > M_c$ , determinar a bitola máxima que permite atingir-se a tensão admissível, utilizando-se gráficos como o da ilustração - 4.1. Se  $M_T < M_c$ , calcular a tensão de tração no ferro quando se tem  $M_c$  e os esforços de tração, e com esta - tensão determinar nos gráficos referidos acima, a bitola máxima a ser utilizada;
- 4 - Calcular o custo do tubulão;
- 5 - Repetir os itens 1 a 4 até que o custo deixe de diminuir, com diâmetro maior se  $M_T > M_c$  ou com concreto melhor se  $M_T < M_c$ .

No segundo caso, a otimização será completa, usando-se todas as variáveis, verificando-se ferragem mínima e espaçamento máximo de estribos.

Deve ser fornecido ao computador a geometria mínima do tubulão; os limites de variação do raio do fuste; os tipos de concreto, definidos por suas tensões à compressão; os tipos de furo, definidos por suas tensões à compressão, tensões à tração e coeficientes de aderência por bitola; o recobrimento das barras de ferro; a abertura máxima das fissuras; a bitola do estribo; os limites de variação das bitolas para a armadura principal; os custos unitários de todos os serviços e materiais e os esforços já reduzidos à secção de dimensionamento.

A pesquisa do custo mínimo pode ser feita seguindo-se a seguinte marcha de cálculo:

- 1 - Fixar como ponto de partida o raio mínimo do fuste, o tipo de concreto de menor tensão à compressão e o tipo de aço de menor tensão à tração;
- 2 - Calcular os esforços máximos que a secção suporta, no estágio I e corrigir os esforços atuantes quando necessário;
- 3 - Admitir uma porcentagem inicial e verificar se as tensões, tanto no ferro como no concreto são inferiores às admissíveis. Havendo sucesso na verificação, determinar a bitola máxima e o espaçamento dos estribos. Calcular o custo do tubulão;
- 4 - Dar incrementos a porcentagem inicial até varrer todo o campo de variação (0 a 6%) e sempre que houver sucesso na verificação de tensões recalcular o novo custo e comparar com o anterior, ficando sempre com o menor;
- 5 - Reiniciar o processo dando incrementos ao raio do fuste;
- 6 - Após varrer todo o intervalo de variação do raio, alterar o tipo de concreto e reiniciar o processo;
- 7 - Após percorrer os diversos tipos de concreto, alterar o tipo de ferro e reiniciar o processo.

A determinação da porcentagem que conduz ao menor custo para cada uma das etapas, pode ser bastante acelerada se se fizer a varredura no intervalo de porcentagens por reiteraões sucessivas. Pode-se, por exemplo, fazer do seguinte modo:

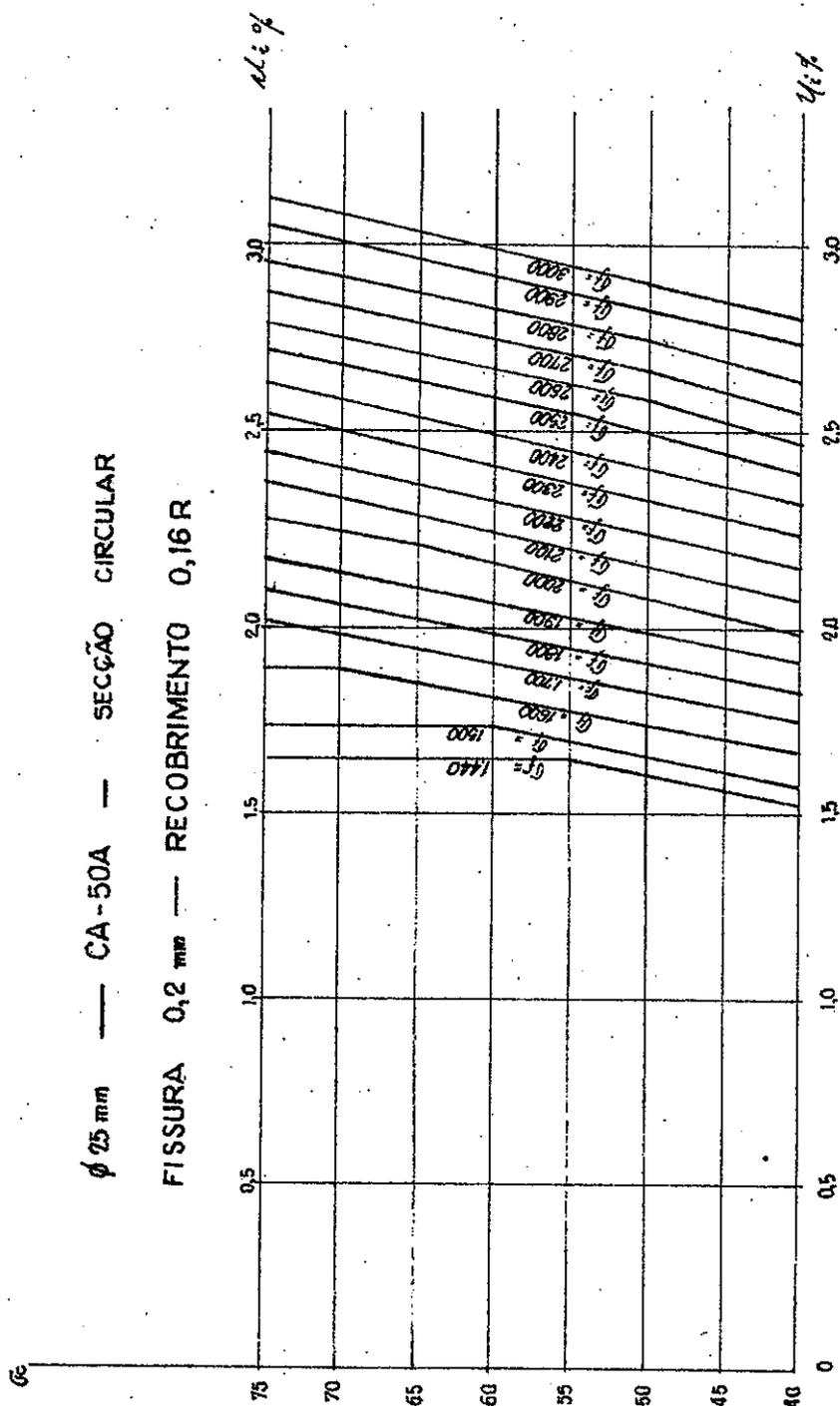
- 1 - Dividir o intervalo inicial em 12 resultando passo de

0,5%.

- 2 - Localizado o ponto de menor custo, toma-se apenas o trecho que contém este ponto com dimensão dupla do passo, e para novo passo um décimo do novo intervalo;
- 3 - Refazendo o item 2 mais duas vezes, teremos com 42 pesquisas valores de porcentagens defazados de 0,004% o que representa uma boa precisão.

O relatório do computador dará como resultado, o custo mínimo do tubulão indicando para quais condições o foi conseguido e ainda as tensões que realmente irão aparecer no concreto e na armadura.

São Paulo, fevereiro de 1972



SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

GRÁFICO PARA CÁLCULO DA TENSÃO MÁXIMA NA ARMADURA

ILUSTRAÇÃO

4.1