



São Paulo, 10/15 de abril de 1972

GRUPO DE ESTUDOS DA TRANSMISSÃO - GTR

FUNDAÇÕES PARA AS TORRES, DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Eng^o Ladislau Paladino
THEMAG ENGENHARIA

1.0 - INTRODUÇÃO

Neste trabalho, será apresentado um comentário geral sobre as fundações para torres das linhas de transmissão. Serão analisados assuntos que consideramos mais importantes do ponto de vista técnico. Com relação ao ponto de vista econômico, faremos apenas algumas citações. Sendo as fundações das torres das linhas de transmissão uma obra descontínua e as vezes de difícil acesso, a escolha da fundação mais econômica, entre aquelas que atendam ao ponto de vista técnico irá depender da disponibilidade e preços de materiais, mão de obra e equipamentos.

2.0 - PARTICULARIDADES E IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DAS FUNDAÇÕES PARA AS LINHAS DE TRANSMISSÃO

A fundação de uma torre para linhas de trans

missão, considerada isoladamente, não deixa de ser uma obra de pequeno porte. Entretanto se, considerarmos que essa fundação será utilizada centena ou milhares de vezes ao longo de uma linha de transmissão, esse conjunto passa a ser uma obra de grande porte, daí a sua importância e justificativa para esse assunto ser incluído no presente seminário.

Outro fato peculiar, as fundações das torres, geralmente feitas para cada pé isolado da torre, é tratar-se de uma fundação que ora está sujeita a esforços de compressão, ora sujeita a esforços de arrancamento, devendo ser dimensionada para as duas condições que é uma agravante quase que exclusiva das fundações das torres.

3.0 - CONHECIMENTO DO SOLO NA FAIXA ATRAVESSADA PELA LINHA DE TRANSMISSÃO E CARACTERÍSTICAS DO PROJETO

3.1. - Conhecimento do Solo - De um modo geral, pode se dizer que os dados, que o projetista dispõe, das características do solo na faixa de uma determinada linha de transmissão são incompletos. Geralmente dispõem-se apenas de sondagens a percussão e alguns ensaios executados em solos considerados tipos. O estudo pormenorizado das características do solo no local de cada torre, demandaria maior faixa de tempo nos cronogramas e um acréscimo de custo, deixando então, de ser executado.

Nessas condições o projetista é obrigado a fazer o projeto em base a índices simples, que representam o solo, como por exemplo, a resistência a penetração. Esse índice seria correlacionado estatisticamente com as propriedades do solo. Por meio dessa correlação estatística é que se faria a previsão de carga admissível e recalque no local de cada torre.

O projeto também deve ter indicações as mais simples possíveis, de forma a se poder verificar se o projeto pode ou não ser aplicado num determinado local, devido as condições do solo.

3.2 - Esforços Atuantes nas Fundações - Geralmente o projetista recebe para dimensionamento das fundações os esforços máximos que podem ocorrer nos pés das torres. Esses esforços são os provenientes do peso próprio da torre mais os cabos, devido à ação dos cabos e à ação do vento sobre a torre e os cabos.

Em vista da indeterminação de direção dos esforços, devido à ação do vento e de ruptura de cabos, a fundação para cada pé da torre deve ser dimensionada para suportar o esforço da compressão máxima ou de arrancamento máximo, combinados com os esforços horizontais resultantes para qualquer um dos pés da torre.

Normalmente da ordem de 80% dos esforços máximos, correspondem a esforços acidentais devido a ação do vento e ruptura de cabos.

Os esforços atuantes na fundação dependem do tipo de torre, altura e espaçamento entre torres. Apenas para ter uma ordem de grandeza desses esforços em torres de suspensão para LT 460 kV, a compressão varia de 25,0 a 70,0 ton., e o arrancamento de 20,0 a 60,0 ton.

3.3 - Coeficientes de Segurança - Os coeficientes de segurança para o cálculo das fundações, se forem elevados acarretam um super dimensionamento, devendo ser reduzidos a um mínimo, para que de acordo com as hipóteses de cálculo, possam dar cobertura as variações que podem ocorrer ao longo de uma linha de transmissão, principalmente nas características do solo.

Usualmente tem-se considerados fatores de segurança de 1,5 a 2,0 em relação à ruptura, para os esforços considerados normais, correspondendo a 1,2 ou mais para esforços considerados excepcionais.

4.0 - COMPORTAMENTO DA FUNDAÇÃO NA COMPRESSÃO E NO ARRANCAMENTO -

Sendo a maior parte do esforço acidental e devido a ação do vento, uma pequena deficiência da fundação com relação a compressão, poderá ocasionar ao longo do tempo um recalque pequeno e sem consequências para a torre. As deformações do solo submetidas a compressão, desde que essa compressão não seja exagerada em relação ao que o solo resiste, serão lentas. Dessa forma sempre haverá tempo e possibilidade de reforçar a fundação caso venha a ocorrer um recalque excessivo.

Com relação ao arrancamento o aspecto é completamente diferente. Uma deficiência da fundação com relação ao arrancamento, por ocasião da solicitação máxima, após um levantamento rápido e pequeno da ordem de 3,0 cm, passa para a situação de ruptura.

5.0 - PRINCIPAIS TIPOS DE FUNDAÇÕES PARA TORRES DE L.T.

Na ilustração 5.1 está apresentado um esquema dos tipos de fundações mais frequentemente realizadas.

5.1. - Fundações em Tubulações de Concreto - Para solo de tipo "poroso" do interior do Brasil Centro-Sul, a THEMAG - vem propondo em seus projetos, fundações por tubulações de concreto armado escavados a céu aberto. Esse tipo tem-se demonstrado ser - além de tecnicamente adequado, também o mais econômico.

Os tubulões desse tipo são caracterizados por um fuste de profundidade normalmente variável de 4,0 a 10,0 m, podendo ser de base alargada ou não, dependendo do solo e da grandeza dos esforços.

Quando executados manualmente, o fuste é vertical e o diâmetro mínimo exequível é de 70 cm.

Atualmente já existem equipamentos para execução da escavação, que executam tubulões verticais ou inclinados com ou sem base alargada.

Os tubulões inclinados desde que sua inclinação - acompanhe a indicação dos pés das torres podem ser considerados como sujeitos apenas a esforços exiais de compressão ou arrancamento.

Os tubulões verticais estão sujeitos a esforços - horizontais, de compressão e de arrancamento.

5.1.1. - Dimensionamento ao Arrancamento - Uma - das maneiras de cálculo para o dimensionamento ao arrancamento, cita das em várias publicações (1, 2, 3 e 5) consiste em:

$$T = P_t + P_s$$

sendo: T = esforço de arrancamento

P_t = peso do tubulão

P_s = peso do solo contido num tronco de cone de base menor, igual à base do tubulão, com geratriz inclinada de um ângulo α e sendo a base maior a intersecção da superfície gerada com a superfí-
cie do terreno.

O valor do ângulo α é um valor empérico que varia com as características do solo e com a profundidade da fundação. Convém lembrar que não deve ser confundido o ângulo α com o ângulo ϕ (ângulo de atrito interno do solo). O valor do ângulo α depende - de ϕ e de outras características do solo.

Nas biografias já citadas o valor de α aparece com variações de 10° a 25° . Seu valor exato para cada caso particular, só pode ser determinado através de ensaios de arrancamento.

5.1.2. - Dimensionamento a Compressão -

$$P = S_b \times \bar{\sigma}_s + S_l \times \bar{\sigma}_a$$

sendo: P a força da compressão
 S_b a superfície da base do tubulão
 $\bar{\sigma}_s$ a tensão admissível a compressão do solo na base do tubulão
 S_l a superfície lateral do fuste do tubulão.
 $\bar{\sigma}_a$ a aderência admissível concreto solo.

Nos casos de solos de $\bar{\sigma}_s$ elevado ou estruturas que não admitem recalque, o valor $S_l \bar{\sigma}_a$ geralmente é desprezado. Para as fundações das torres geralmente fixadas em solos de resistência média e sendo estruturas que admitem recalque, essa parcela pode ser considerada.

O valor de $\bar{\sigma}_a$ geralmente varia de 0,5 a 4,0 t/m², dependendo do tipo do solo e da profundidade.

5.1.3. - Dimensionamento aos Esforços Horizontais -

Ao ser solicitado por um esforço horizontal o tubulão transmite pressões laterais ao solo.

A resistência do tubulão ao esforço horizontal, e os valores das pressões laterais aplicadas ao solo, podem ser determinadas considerando-se uma distribuição de pressões triangular (4) ou parabólica (5).

Detalhes do dimensionamento podem ser vistos nas bibliografias acima citadas.

Obtidas as pressões atuantes, elas devem ser verificadas se são compatíveis com as resistidas pelo solo e permitem analisar o momento fletor a que o tubulão será solicitado.

5.1.4 - Considerações Finais sobre o Dimensionamento do Tubulão -

O dimensionamento do tubulão consiste em determi

nar os valores da profundidade, diâmetro do fuste e diâmetro da base. Essa determinação é feita por tentativas, de modo a atender as três solicitações (arrancamento, compressão e esforço horizontal) e que seja o tubulão mais econômico.

A profundidade e o diâmetro da base estão ligados ao dimensionamento do arrancamento e compressão, devendo também a profundidade ser compatível para atingir a resistência do solo considerada. Com o acréscimo da profundidade há considerável aumento na resistência ao arrancamento, e com o alargamento da base é considerável o aumento na resistência a compressão. Definido o diâmetro da base e a profundidade mais conveniente, o diâmetro do fuste fica condicionado ao método executivo e ao dimensionamento ao esforço horizontal.

5.2. - Fundações Superficiais em Concreto (blocos ou sapatas) - Essas fundações são constituídas geralmente de um pilar saindo de uma base alargada, com profundidades até da ordem de 3,0 m. Um dos critérios para distinção entre blocos e sapatas é que os blocos em vista das dimensões da base não levam armadura na base, acarretando grande volume de concreto, ao passo que as sapatas são constituídas inteiramente de concreto armado.

5.2.1. - Dimensionamento ao arrancamento - A resistência ao arrancamento pode ser calculada considerando-se como sendo igual ao peso da fundação mais o peso do solo contido num tronco de cone ou tronco de pirâmide com geratriz inclinada com um ângulo α , envolvendo a base da fundação. Considerações a respeito do valor do ângulo α já foram feitas para o caso das fundações em tubulações.

5.2.2. - Dimensionamento a Compressão - O dimensionamento a compressão consiste em verificar a taxa de compressão na base resultante da força de compressão atuante acrescida do peso da fundação mais o peso do solo sobre a fundação. A taxa de compressão deve ser compatível com a resistência do solo.

5.2.3. - Dimensionamento ao esforço horizontal - A verificação ao esforço horizontal é feita considerando-se ou não as pressões laterais resistidas pelo solo e o acréscimo das pressões acarretadas na base.

5.3. Fundações Superficiais em Grelhas Metálicas
As grelhas metálicas são constituídas de uma treliça em forma de pirâmide, que ficam enterradas, tendo um prolongamento no qual é fixado o pé da torre.

A verificação da compressão é feita calculando-se a taxa de compressão resultante da força de compressão atuante dividida pela área da base.

O dimensionamento ao arrancamento é feito considerando o peso do solo contido num tronco de pirâmide com geratriz inclinada do ângulo α (já comentado) e envolvendo a base das grelhas.

A grelha é uma fundação que não deve ser utilizada em áreas sujeitas a erosão. Outra consideração que deve ser levada em conta é a corrosão que pode ocorrer, apesar das mesmas serem feitas de aço galvanizado.

5.4. - Fundações Ancoradas em Rocha - As fundações ancoradas em rocha podem ser de várias formas, com relação aos seus detalhes. Elas são usadas quando a rocha está relativamente rasa, impedindo a escavação, e portanto o peso do bloco resultaria suficiente para suportar esforços de arrancamento.

Geralmente são constituídas de peças metálicas ancoradas na rocha, tendo um bloco de concreto onde ocorre a transferência dos esforços do pé da torre para as ancoragens.

5.5. - Fundações Estaqueadas - As fundações estaqueadas podem ser de dois tipos, ou seja, considerando as estacas resistente a tração ou não.

Caso as estacas devido as condições do solo resistam a tração devido ao atrito solo-estaca, as fundações são constituídas de blocos de concreto, transferindo os esforços dos pés das torres às estacas.

Para se ter as estacas trabalhando só a compressão é necessário poder se contar na fundação com uma carga de concreto e solo para neutralizar o esforço de arrancamento. Geralmente essa fundação é constituída de uma caixa em concreto armado, preenchida com solo e apoiada nas estacas.

6.0. - DIMENSIONAMENTO DE CONCRETO ARMADO PARA AS ESTRUTURAS DA FUNDAÇÃO

O dimensionamento do concreto armado para as fundações das torres é calculado normalmente como para os demais tipos de estruturas, sendo obedecido as normas técnicas vigentes. Normalmente aumentando as dimensões do concreto obtem-se uma redução na ferragem, o que deve ser analisado economicamente, desde que esteja satisfeita as exigências técnicas.

7.0. - ENSAIOS EM FUNDACÕES PARA TORRES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Com a finalidade de verificar fundações já executadas e obter dados para dimensionamento de linhas futuras, o IPT por solicitação da CESP e sugestão da THEMAG realizou alguns ensaios em tubulações na cidade de Bauru - S. Paulo. Também foram feitos ensaios geotécnicos sobre amostras indeformadas do solo. O solo local na camada atingida pelas fundações ensaiadas é constituído de areia "porosa" fina e média, siltosa, pouco argilosa de compactidade crescente com a profundidade de fofa a medianamente compacta, de cor avermelhada. Esse solo é representativo de uma grande parte do interior do Estado de São Paulo, o que motivou esse local para os ensaios.

A seguir faremos uma breve exposição dos resultados obtidos nos ensaios.

7.1. - Ensaio de Arrancamento - Foram ensaiados tubulões de dimensões variadas. Profundidades de 4,0 a 8,0 m, com diâmetros de fuste de 0,50 a 1,20, bases sem alargamento, e com alargamento até 1,65m. Na ilustração 7.1.1. aparecem os gráficos de carga deformação.

Os tubulões entraram em regime de ruptura ao atingirem deformação da ordem de 3,0 cm. A carga para deformação de 0,5 cm. correspondeu a cerca de 80% da carga necessária para deslocamento de 2,5 cm.

O esforço para deslocamento de 2,5 cm, correspondeu a valores de ângulo α variável de 11° a 18° . Esses valores encontram-se indicados na ilustração 7.1.2.

Os ensaios de arrancamento de tubulões sem alargamento da base também forneceram valores da aderência entre concreto e solo. Para profundidade de 6,0 m obteve-se uma aderência média ao longo do fuste de $2,65 \text{ t/m}^2$ e para 8,0 m de profundidade $3,45 \text{ t/m}^2$.

7.2. - Ensaio de Carregamento Horizontal - Foram ensaiados tubulões com fuste de 0,50 a 1,20 m e profundidades de 4,0 a 8,0 m neste tipo de carregamento, após deslocamento de 1,0 cm, observa-se um acréscimo mais acentuado na deformação, relativo ao acréscimo de carga, porém não se tem uma ruptura ditadamente caracterizada.

Os valores calculados teoricamente correspondem a valores de esforços que causaram deslocamentos inferiores ou da ordem de 1,0 cm.

Na ilustração 7.2.1. estão indicados os gráficos - carga de formação relativa aos ensaios executados.

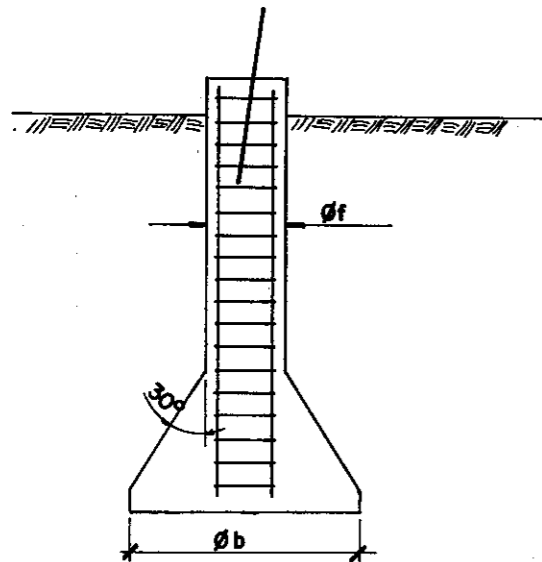
7.3. - Ensaio de Arrancamento em Grelha Metálica - Foi executado um ensaio de arrancamento em uma grelha metálica, com base de 2,10 x 2,10 m e aprofundada 2,30 m.

Para levantamento de até 2,5 cm, a grelha resistiu um esforço de 24,0 ton, entretanto posteriormente no regime de ruptura. Esse esforço correspondeu ao cálculo do arrancamento considerando-se o ângulo α aproximadamente de 14° ; na ilustração 7.1.1, está indicado o gráfico de carga recalque referente a esse ensaio.

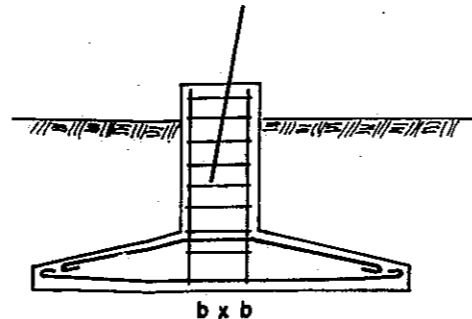
São Paulo, fevereiro de 1972.

B I B L I O G R A F I A

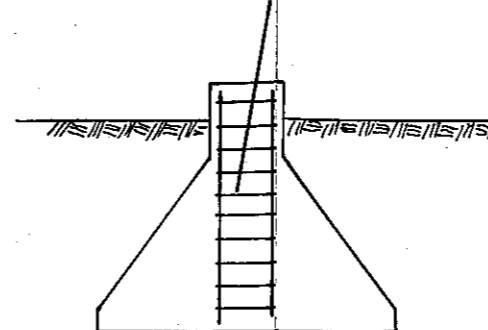
1. Dallas I Downs and Robert Chieurzzi
Transmission Tower Foundations. Journal of the Power
Division A.S.C.E. April, 1966.
2. Hermann Rieger - Der Ereileitungsbau - 1960
3. Richard L. Wiggins - Analysis and Design of Tower
Foundations - Journal of the Power Division, A.S.C.E.
March 1969.
4. Karl Terzaghi - Theoretical Soil Mechanics, 1943.
5. Manuale dei Conduttori Nudi e Delle Linee Elettriche Aeree.



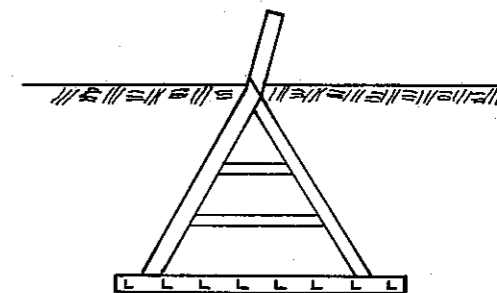
FUNDAÇÃO EM TUBULÃO DE CONCRETO ARMADO



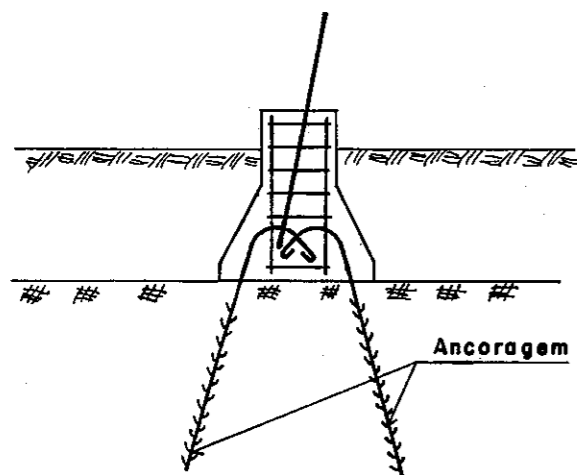
FUNDAÇÃO EM SAPATAS DE CONCRETO ARMADO



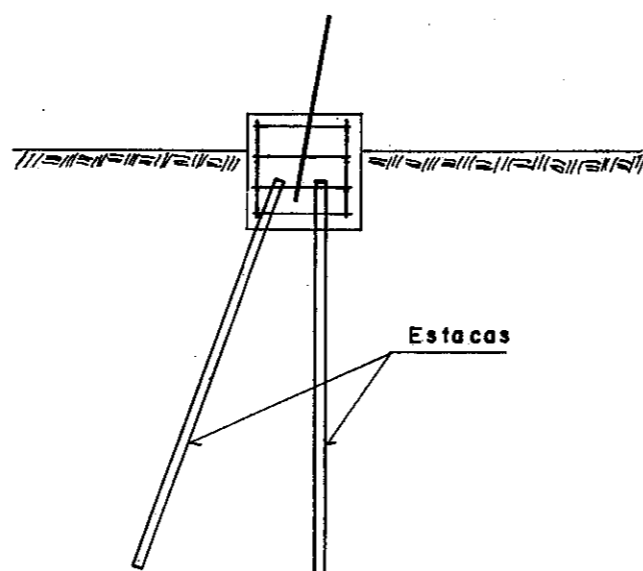
FUNDAÇÃO EM BLOCO



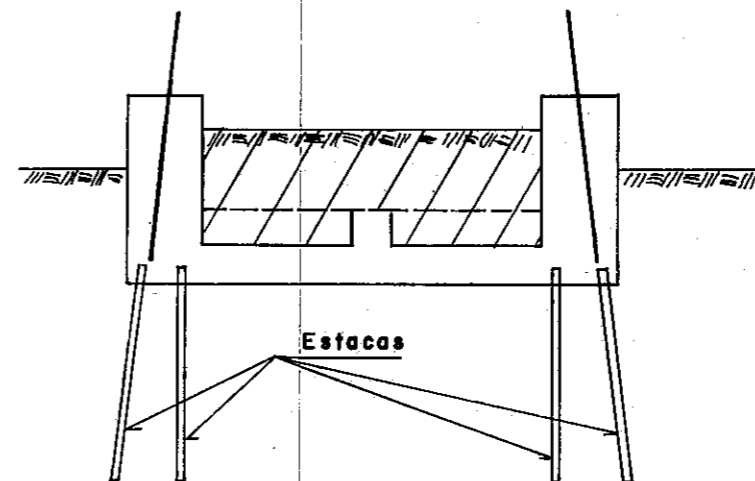
FUNDAÇÃO C/ GRELHA



FUNDAÇÃO ANCORADA EM ROCHA



FUNDAÇÃO ESTACUEADA (Estacas resistindo compressão ou arrancamento)



FUNDAÇÃO ESTACUEADA (Estacas trabalhando só à compressão)

SP/GTR/05

SEMIN.NAC.DE PRODUC.E TRANSM.DE ENERG.ELETRIC.

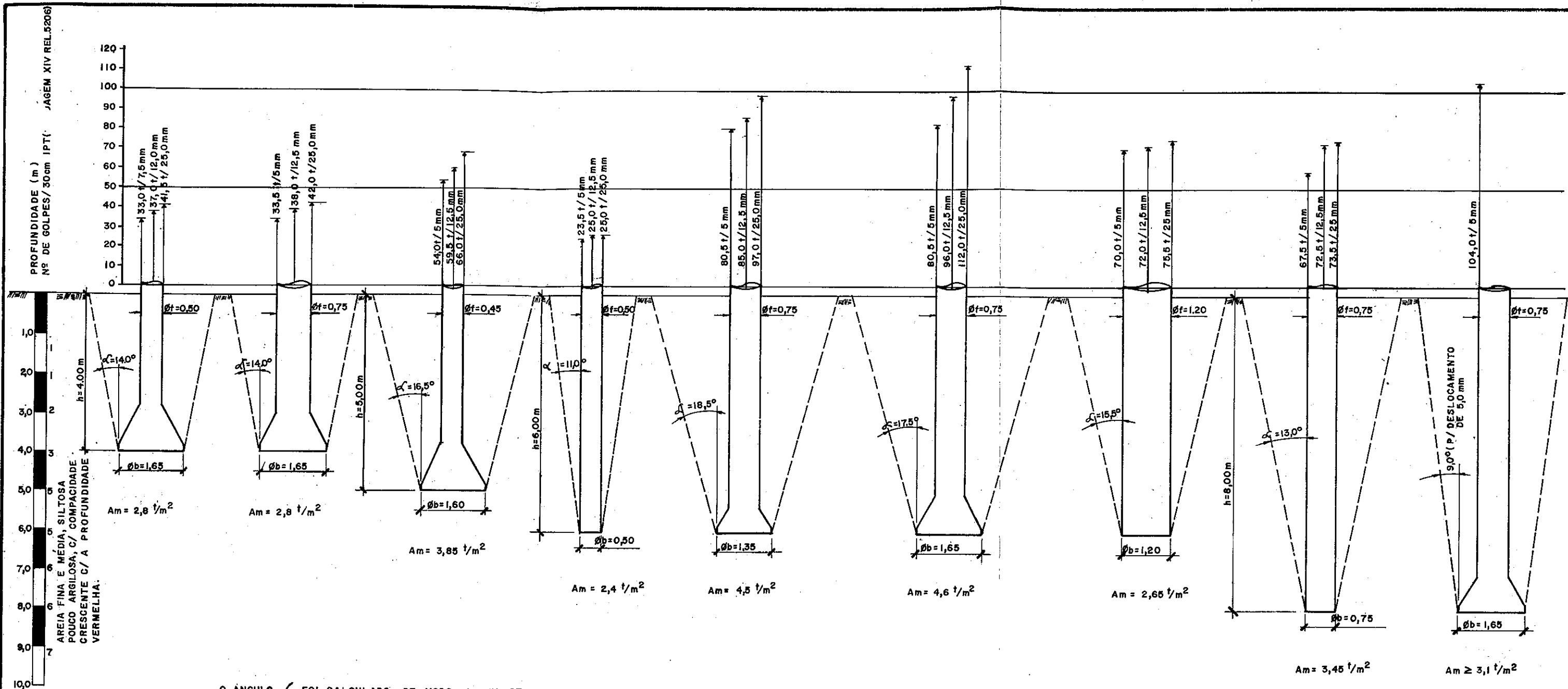
CROQUIS DE TIPOS DE FUNDAÇÃO PARA TÔRRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

ESCALA R

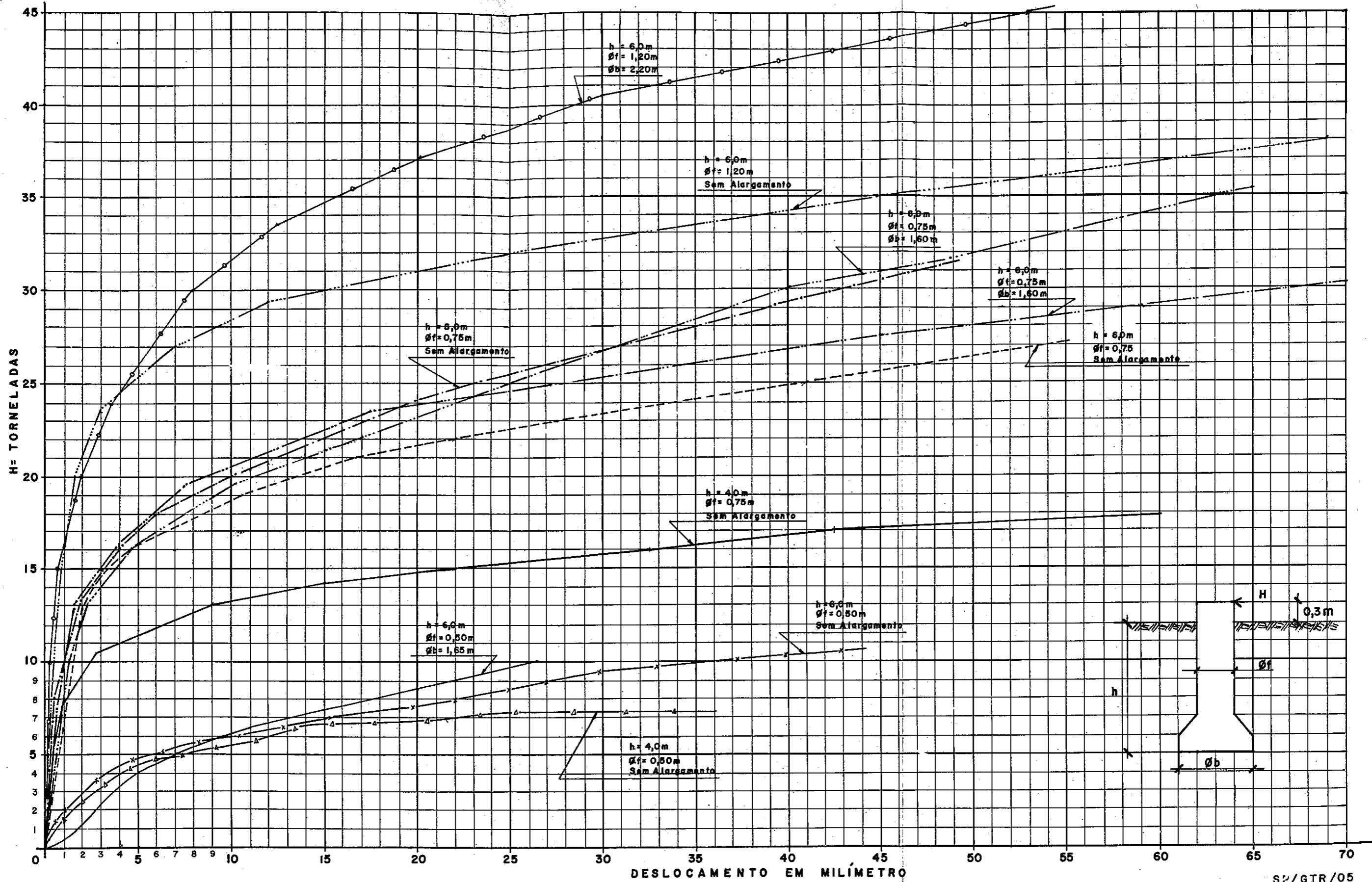
DESENHO N.º ILUSTRAÇÃO

5.1

FORMATO A3



- O ÂNGULO α FOI CALCULADO DE MODO A TER-SE $T = P + Q$
- SENDO: T = ESFORÇO P/ ARRANCAMENTO DE 25mm
 $P =$ PÊSO DO TUBULÃO C/ $\gamma_c = 2,4 \text{ t/m}^3$ (DENSIDADE DO CONCRETO)
 $Q =$ PÊSO CONTIDO NO TRONCO DO CONE C/ GERATRIZ INCLINADA
 COM ÂNGULO α , CONSIDERANDO $\gamma_s = 1,6 \text{ t/m}^3$ (DENSIDADE DO SOLO)
- O ATRITO MÉDIO (A_m) FOI OBTIDO PELA FÓRMULA $A_m = \frac{T(25\text{mm}) - P}{\frac{f+b}{2} \times \pi \times h}$
- SENDO: T = O ESFORÇO P/ ARRANCAMENTO DE 25mm
 $P =$ PÊSO DO TUBULÃO
 $f =$ DIÂMETRO DO FUSTE
 $b =$ " DA BASE
 $h =$ PROFUNDIDADE DO TUBULÃO



CARACTERÍSTICAS DO SOLO

AREIA FINA E MÉDIA POUCA ARGILOSA, COMPACIDADE CRESCENTE COM A PROFUNDIDADE DE FOFA A MEDIANAMENTE COMPACTA, VERMELHA.
 $\gamma_{NAT.} 1,6 \gamma/m^3$; ϕ (ANG. ATRITO INTERNO) 26° a 30° ; c (COESÃO) $0,0$ a $1,0 \gamma/m^2$

SEMÍN. NAC. DE PRODUÇ. E TRANSM. DE ENERG. ELÉTR.	ESCALA	R.
ENSAIOS DE TUBULÃO A ESFÔRÇO HORIZONTAL REALIZADOS EM BAURÚ		DESENHO N.º
		ILUSTRAÇÃO
		7.2.1