CDU 621.315.62:621.315.1
Isoladores
Linhas aéreas

RUI HUMBERTO CORDEIRO
Engenheiro Electrotécnico
ACTA — Actividades Eléctricas Associadas, S. A. R. L.

Estabilidade das cadeias de isoladores de linhas eléctricas aéreas

1 — OBJECTO

O presente trabalho visa apresentar, resumidamente, a teoria da estabilidade das cadeias de isoladores de linhas aéreas e descrever um método expedito de verificação dessa estabilidade.

Este trabalho não pretende formular uma concepção inédita, relativa à matéria versada, mas apenas efectuar uma síntese actualizada da posição do problema e das soluções concretas que poderão ser adoptadas.

2 — TEORIA

2.1 — CONSIDERAÇÕES GERAIS

A acção do vento transversal à linha determina que as cadeias de suspensão se inclinem, podendo aproximar-se perigosamente dos apoios. Por outro lado, o esforço vertical actuante nos pontos de fixação dos condutores — normalmente dirigido no sentido da gravidade —, poderá, em determinadas circunstâncias, devir muito reduzido, nulo, ou até dirigido de baixo para cima, dificultando a estabilidade das cadeias, ou mesmo impossibilitando-a.

Deste modo impõe-se a verificação destas condições de estabilidade.

Começaremos por deduzir as fórmulas que suportam o método de verificação dessa estabilidade.

2.2 — ESFORÇO VERTICAL APLICADO A UM APOIO

Consideremos (fig. 1) três apoios consecutivos, sendo os extremos designados por A e C e o intermédio por B′ ou B″, consoante:

a) B′ localizado acima de B; caso de um apoio particularmente sujeito à carga vertical;

b) B″ localizado abaixo de B; caso de um apoio suportando carga vertical anormalmente pequena.

Caso a)

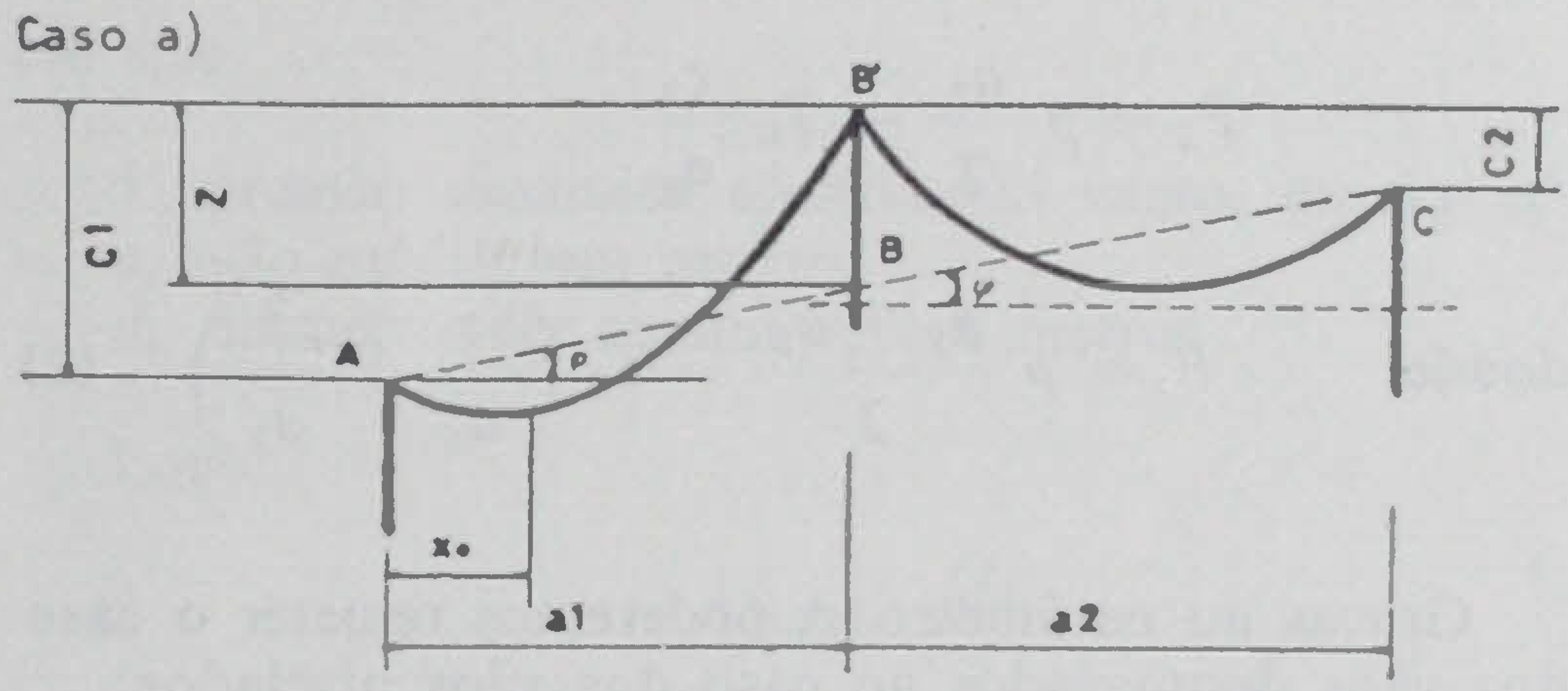

Fig. 1

Determinemos o valor da força vertical aplicada a B′. A componente dessa força, devida à parábola AB′, é igual ao peso do cabo compreendido entre B′ e o ponto de ordenada mínima, seja, aproximadamente, $p.(a_1 - x_0)$, sendo $x_0 = \frac{a_1}{2} - h\frac{c_1}{a_1}$ (h, parâmetro da parábola; p, peso unitário do cabo).

$$\text{Logo } P_1 = p\,\frac{a_1}{2} + ph\,\frac{c_1}{a_1} = p\,\frac{a_1}{2} + T_0\,\frac{c_1}{a_1}$$

(T_o componente horizontal da tensão do cabo)

Da mesma forma, o esforço devido à parábola B′C será:

$$P_2 = p\,\frac{a_2}{2} + T_0\,\frac{c_2}{a_2}$$

Por outro lado:

$$c_1 = a_1\text{tg}\varphi + z \qquad c_2 = z - a_2\text{tg}\varphi$$

Logo, a soma das cargas verticais $P = P_1 + P_2$ será:

$$P = p\,\frac{a_1 + a_2}{2} + T_0\left(\frac{z}{a_1} + \frac{z}{a_2}\right) \qquad (1)$$

O termo tgφ foi eliminado e obtivemos directamente o esforço P em função de z e dos vãos a_1 e a_2

Caso b)

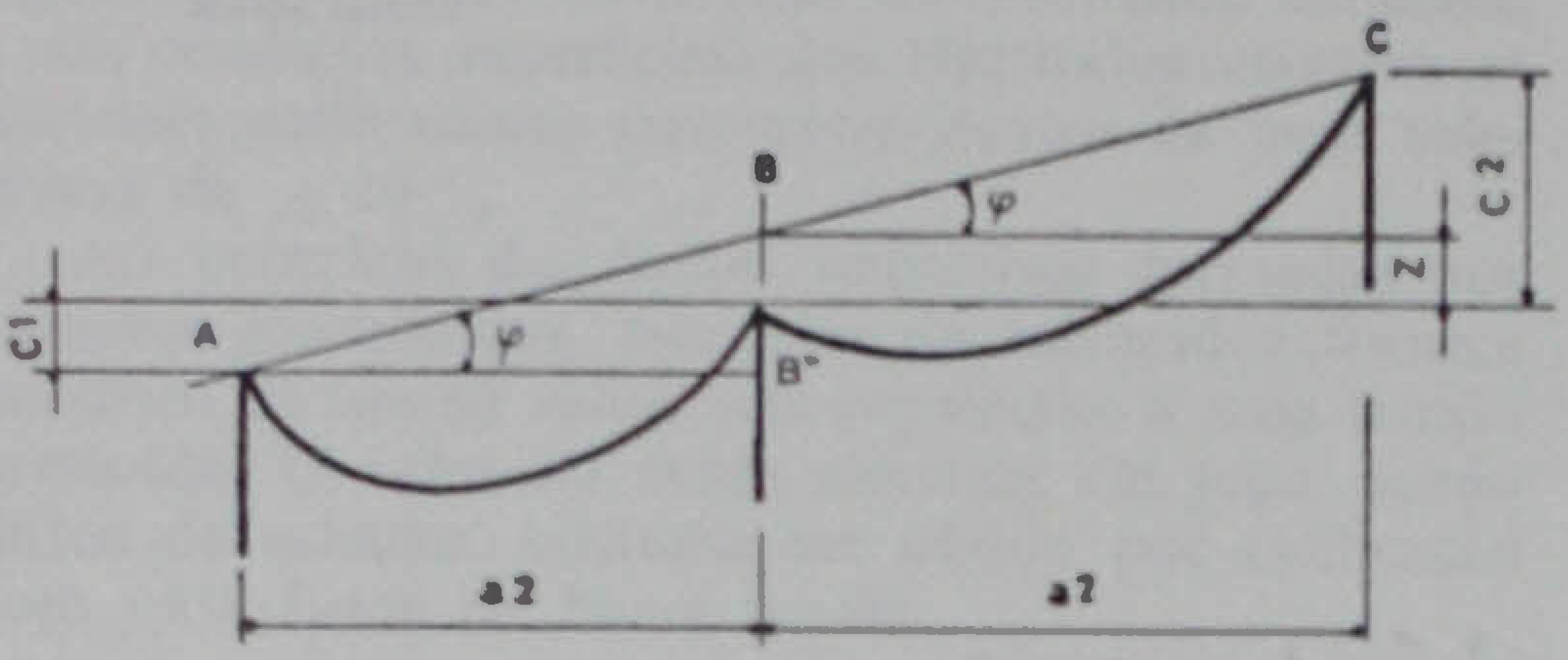

Fig. 2

Utilizando o mesmo procedimento, teremos:

$$c_1 = a_1 \operatorname{tg}\varphi - z$$

$$c_2 = a_2 \operatorname{tg}\varphi + z$$

Os esforços verticais aplicados a B" serão:

$$P_1 = p\,\frac{a_1}{2} + T_0\,\frac{c_1}{a_1}$$

$$P_2 = p\,\frac{a_2}{2} - T_0\,\frac{c_2}{a_2}$$

donde $$P = p\,\frac{a_1 + a_2}{2} - T_0\left(\frac{z}{a_1} + \frac{z}{a_2}\right) \qquad (2)$$

Graças ao parâmetro z, poderemos remeter o caso dos vãos desnivelados ao caso dos vãos nivelados.

Poder-se-á assim dispor de um meio rápido e seguro para:

— verificar, na distribuição dos apoios no perfil, se um apoio está submetido a um esforço vertical superior, igual ou inferior àquele que corresponde à média dos vãos que o enquadram:

$$P_m = p \cdot \frac{a_1 + a_2}{2}$$

— calcular, em função de z, o esforço vertical resultante.

Se o parâmetro z se mede acima da recta AC, o apoio situado em B" suporta uma sobrecarga e a parcela $T_0\left(\frac{z}{a_1} + \frac{z}{a_2}\right)$ deverá ser afectada do sinal $+$

Se o parâmetro z se mede abaixo da recta AC, o apoio situado em B" encontra-se descarregado e a parcela $T_0\left(\frac{z}{a_1} + \frac{z}{a_2}\right)$ deverá ser afectada do sinal menos.

A partir da expressão (2) poderemos determinar o abaixamento limite de B" de tal forma que o esforço P devenha nulo. Deverá verificar-se:

$$p \cdot \frac{a_1 + a_2}{2} = T_0\,\frac{a_1 + a_2}{a_1 a_2}\,z \qquad (3)$$

Designando por z_1 este abaixamento limite e T_1 a correspondente tensão, teremos $z_1 = \frac{p a_1 a_2}{2T_1}$. É fácil de demonstrar que este valor corresponde à flecha do vão AC, de comprimento $a_1 + a_2$, no ponto de localização do apoio intermédio.

Com efeito, a cota yB deduz-se da equação da parábola:

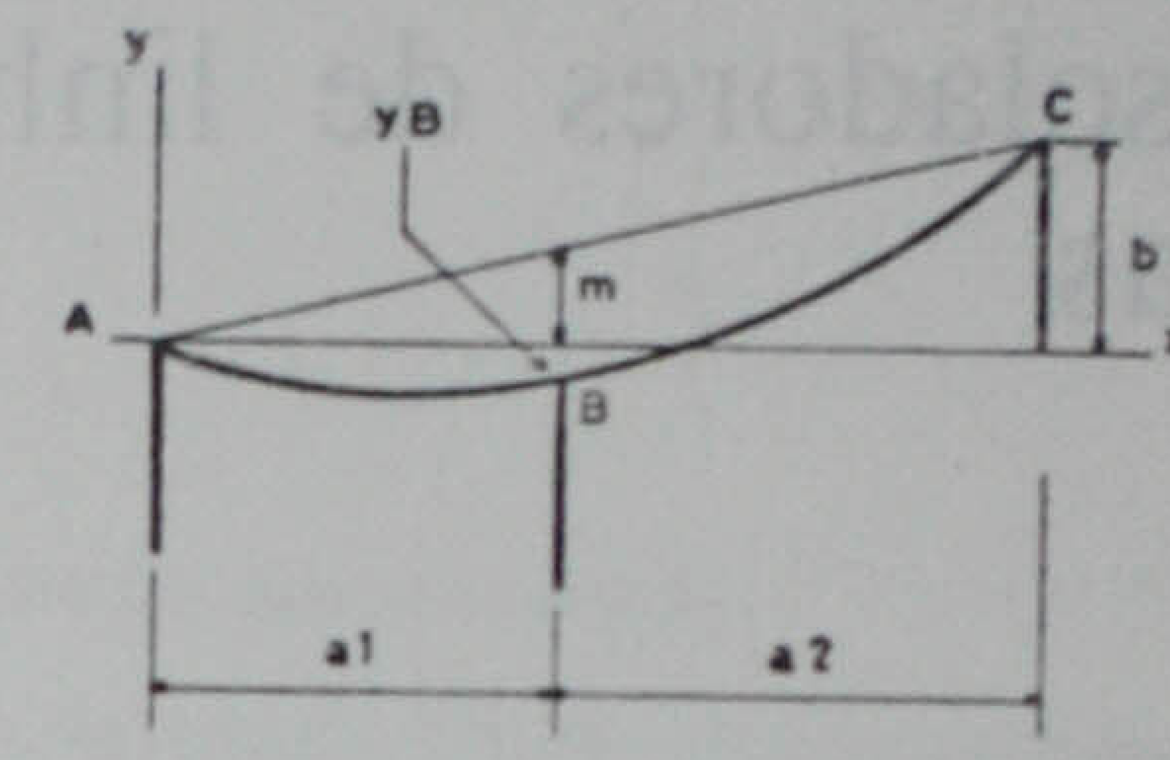

Fig. 3

$$yB = \frac{a_1^2}{2h} - \frac{a_1 xo}{h} \quad \text{sendo} \quad x_0 = \frac{a_1 + a_2}{2} - h\,\frac{b}{a_1 + a_2}$$

A cota $m = \frac{a_1}{a_1 + a_2} \cdot b \cdot$ Logo:

$$z_1 = -yB + m = -\frac{a_1^2}{2h} + \frac{a_1}{h}\left(\frac{a_1 + a_2}{2} - \frac{hb}{a_1 + a_2}\right) +$$

$$+ \frac{a_1 b}{a_1 + a_2} = \frac{a_1 a_2}{2h} = \frac{p a_1 a_2}{2T_1} \qquad (4)$$

2.3 — Verificação da estabilidade das cadeias

Do exposto na alínea anterior infere-se que, ao estudarmos a repartição dos apoios no perfil da linha, se observarmos que num determinado apoio o valor de z resulta negativo, será necessário verificar, para diversas hipóteses de vento e de temperatura (diferentes valores de T_1), as condições de equilíbrio das cadeias de suspensão e constatar se as distâncias mínimas à massa são observadas.

Nota-se que a mobilidade das cadeias de suspensão será tanto mais elevada quanto menor for a carga vertical aplicada ao apoio, do que resulta uma maior usura das peças em contacto, pelo efeito do atrito mútuo.

Sem vento, a carga vertical P de cabo, suportada por uma cadeia de isoladores, será:

$$P = p\,\frac{a_1 + a_2}{2} - T_0\left(\frac{z}{a_1} + \frac{z}{a_2}\right) \qquad (2)$$

Em caso de vento transversal, de velocidade constante, o peso composto do cabo devem mp (m, coeficiente de sobrecarga) e a tensão passa de T_0 a T_1. Admitimos, por simplificação, que as parábolas sucessivas permanecem num plano fazendo um ângulo α com a vertical, tal que $\cos\alpha = \frac{1}{m}$ (o que só é rigoroso em caso de apoios de nível). A carga vertical aplicada à cadeia será então aproximadamente igual a:

$$P = \left[mp \frac{a_1 + a_2}{2} - T_1 \cos \alpha \left(\frac{z}{a_1} + \frac{z}{a_2} \right) \right] \cos \alpha \quad (5)$$

ou:

$$P = p \frac{a_1 + a_2}{2} - T_1 \cos^2 \alpha \left(\frac{z}{a_1} + \frac{z}{a_2} \right) =$$

$$= \frac{a_1 + a_2}{2} \left(p - \frac{2T_1 z \cos^2 \alpha}{a_1 a_2} \right) \quad (6)$$

Por outro lado, a flecha em B, correspondente ao duplo vão AC é $f = p \dfrac{a_1 a_2}{2T_1 \cos \alpha} \cos \alpha$ donde:

$$P = p \cdot \frac{a_1 + a_2}{2} \left(1 - \frac{z \cos \alpha}{f} \right) \quad (7)$$

Se fizermos:

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2}$$

$$K = 1 - \frac{z \cos \alpha}{f} \quad (8)$$

teremos $P = p.a.K$ (9)

Determinaremos agora a expressão que nos permite calcular o desvio das cadeias de suspensão, supostas de alinhamento.

Seja:

P, esforço vertical, em quilogramas
Q, peso da cadeia e dos seus acessórios, em quilogramas
λ, comprimento da cadeia, em metros
P_v, acção do vento sobre o condutor, em quilogramas
Q_v, acção do vento sobre a cadeia, em quilogramas

A posição de equilíbrio do sistema de forças encontra-se representada no desenho seguinte, supondo que a cadeia é completamente rígida, hipótese que não é correcta, mas suficientemente aproximada.

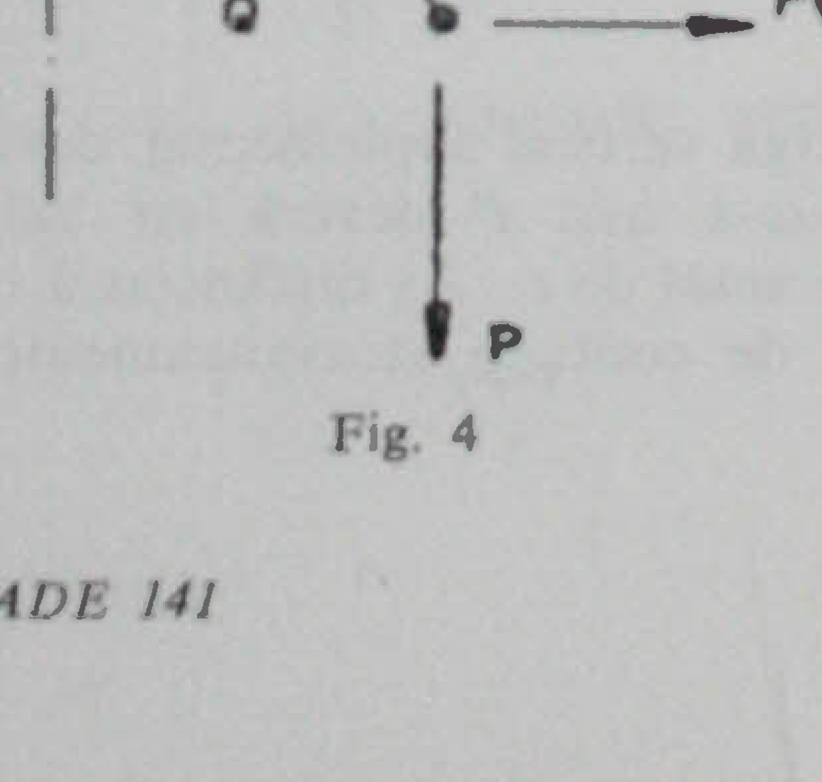

Fig. 4

As forças Q e Q_v supõem-se aplicadas no ponto médio da cadeia. O sistema estará em equilíbrio quando for nulo o momento resultante das forças aplicadas, relativamente ao ponto 0. Esta condição traduz-se por:

$$\left(P_v + \frac{Q_v}{2} \right) \lambda \cos i = \left(P + \frac{Q}{2} \right) \lambda \operatorname{sen} i$$

donde

$$\operatorname{tg} i = \frac{P_v + \dfrac{Q_v}{2}}{P + \dfrac{Q}{2}} \quad (10)$$

Este ângulo deverá ser inferior ao ângulo limite que é admitido pelo tipo de estrutura adoptado, tendo em consideração a distância mínima à massa regulamentar.

A acção do vento sobre o condutor pode ser dada por:

$$P_v = V.a.d$$

em que

V, pressão dinâmica efectiva do vento, em kg/m²
a, vão médio, em metros
d, diâmetro do condutor, em metros

Logo

$$\operatorname{tg} i = \frac{Vad + \dfrac{Q_v}{2}}{paK + \dfrac{Q}{2}} \quad (11)$$

Haverá um valor de z, a partir do qual não se poderá utilizar o apoio, por ser o ângulo de desvio da cadeia superior ao limite admissível.

Para um determinado vão, será necessário que o valor de K, determinado com o auxílio da parábola, seja superior ao obtido da curva $K = f(a)$, para esse vão, condição sem a qual não poderá utilizar-se o apoio.

Da expressão que define o desvio da cadeia, obtém-se:

$$K = \frac{Vad + \dfrac{Q_v}{2} - \dfrac{Q}{2} \operatorname{tg} i}{pa \operatorname{tg} i} \quad (12)$$

É assim fácil estabelecer uma curva $K = f(a)$

2.4 — CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

Levanta-se agora o problema de estabelecer quais as condições climáticas a adoptar nas expressões anteriores. Os ensaios experimentais realizados com diferentes cadeias de isoladores suspensos, submetidos à acção dos ventos, demonstraram que o maior ângulo de desvio por elas sofrido, era provocado por uma pressão dinâmica do vento sempre inferior a 50 % da pressão máxima determinada pelo Regulamento. Considera-se assim geralmente este valor como limite e admite-se que a temperatura correspondente será a média de 15° C. Com estes dados, desenha-se a cércea da parábola respectiva, com a qual poderá estudar-se a estabilidade das cadeias em qualquer vão, ao longo do perfil.

Em determinadas circunstâncias, deverá efectuar-se a verificação para a hipótese do vento máximo à temperatura de 15° C. Trata-se, por exemplo, de linhas cujo traçado se desenvolve em vertente, onde o vento poderá possuir uma componente vertical ascendente (negativa).

Se o ângulo de inclinação da cadeia for superior ao limite calculado, quatro soluções são possíveis:

— juntar um contrapeso à pinça, a fim de aumentar o valor de P
— utilizar um apoio sobreelevado, para diminuir (em valor absoluto), o valor de z
— modificar a repartição dos apoios
— utilizar cadeias de amarração

A primeira solução, embora pareça mais simples, não é sempre a mais favorável. Com efeito, a sobreelevação do apoio determina uma modificação da repartição, que permitirá alongar, pelo menos, um dos vãos a_1 ou a_2, seja, de aumentar o vão médio da linha e de compensar, deste modo, o suplemento de peso do apoio sobreelevado. Nota-se ainda que os contrapesos, sobretudo se atingem valores elevados, são pouco estéticos e que o seu preço, montagem incluída, é sempre superior ao da estrutura metálica do mesmo peso.

A utilização de cadeias de amarração, que infelizmente prolifera nas linhas nacionais, deve ser limitada aos casos estritamente necessários, dados os inconvenientes técnicos e económicos que advêm dessa utilização.

Poderá ainda perguntar-se se o equilíbrio das cadeias se mantém para os apoios a nível inferior ($z < 0$), sem vento e no caso de temperaturas próximas do mínimo da região. Esta hipótese é geralmente menos desfavorável do que a do vento reduzido, pelo menos no caso de linhas de tensão igual ou superior a 220 kV. Contudo, a verificação impõe-se no caso de linhas de média tensão, frequentemente equipadas com condutores muito leves e dotados de vãos médios de pequeno comprimento.

Poderá ainda considerar-se a hipótese de vento reduzido, actuando sob uma baixa temperatura (abaixo de 0° C). Este caso poderá apresentar-se em altitudes médias e em certas regiões particularmente expostas.

É interessante notar a importância dos ângulos de desvio, obtidos em linhas equipadas com condutores leves, que poderão atingir valores superiores a 60°, para pequenos valores de z. Será necessário ter em consideração este facto na selecção das travessas para linhas até 30 kV.

3 — RESUMO DO MÉTODO

O método exposto pode resumir-se como segue:

1) estabelecer a curva $K = f(a)$, a partir da expressão (12); para o efeito, interessa designadamente definir a pressão dinâmica do vento (V) e o ângulo de desvio máximo das cadeias, limitado pela distância regulamentar dos condutores à estrutura dos apoios ($\mathrm{tg}\,i$).
2) estabelecer a curva das flechas (f) correspondentes aos vãos (a) definidos pelos apoios adjacentes.
3) determinar z, distância medida na vertical do apoio, entre o ponto de suspensão do condutor e o segmento de recta definido pelos pontos fixação do condutor nos apoios adjacentes.
4) calcular $K = 1 - \dfrac{z \cos\alpha}{f}$ e compará-lo com o obtido através da curva $K = f(a)$.

4 — PEQUENOS ÂNGULOS

O estudo da estabilidade das cadeias de suspensão, submetidas a vento reduzido, aplica-se igualmente ao caso dos apoios de suspensão utilizados em pequenos ângulos. Neste caso, teremos ainda que considerar que a acção do vento sobre o cabo será dada por

$P_v \cos^2 \dfrac{\beta}{2} = Vad \cos^2 \dfrac{\beta}{2}$ (β, ângulo do traçado),

e adicionar aos esforços horizontais a componente transversal devida ao ângulo $2T \operatorname{sen} \dfrac{\beta}{2}$. Será então:

$$\mathrm{tg}\,i = \frac{Vad \cos^2 \dfrac{\beta}{2} + \dfrac{Q_v}{2} + 2T \operatorname{sen} \dfrac{\beta}{2}}{P + \dfrac{Q}{2}} \tag{13}$$

Esta expressão generaliza a expressão (10).

O limite de utilização habitual dos pequenos ângulos situa-se próximo dos 15°. Com frequência, as cadeias de suspensão utilizadas nos pequenos ângulos são equipadas com contrapesos, a fim de se limitar a sua inclinação transversal. Com a finalidade de reduzir a importância destes contrapesos torna-se preferível evitar o emprego de apoios de suspensão em nível inferior.

É útil imporem-se dois limites aos desvios angulares das cadeias de isoladores utilizadas em ângulos pequenos. O primeiro, respeita os desvios angulares, sem vento, à temperatura média da região. O ângulo de desvio a respeitar não deverá ultrapassar 30°, nesta hipótese. O segundo, resulta da aplicação das condições de distância à massa, com vento transversal. Impõe-se geralmente neste caso a utilização de contrapesos, a fim de se reduzir o ângulo de desvio a um valor aceitável. A fórmula a aplicar será:

$$\mathrm{tg}\,i = \frac{Vad \cos^2 \dfrac{\beta}{2} + \dfrac{Q_v}{2} + 2T \operatorname{sen} \dfrac{\beta}{2}}{P + \dfrac{Q}{2} + C} \tag{14}$$

sendo C a carga vertical suplementar devida ao contrapeso. Notar-se-á que P deverá ser calculado tendo em atenção o sinal de z. As distâncias à massa deverão ter em linha de conta o atravancamento próprio dos contrapesos. ■