Alguns resultados experimentais sobre a acção do vento em linhas eléctricas aéreas

MÁRIO N. CASTANHETA
Engenheiro Civil (I.S.T.)
Especialista do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

INTRODUÇÃO

Como se sabe, o dimensionamento mecânico das linhas eléctricas aéreas está fortemente condicionado pelas solicitações que, devido ao vento, actuam as referidas estruturas.

Particularmente, é preciso conhecer, de forma tão aproximada quanto possível, as pressões que actuam sobre os cabos — condutores e cabos de guarda — de modo a poder realizar-se um dimensionamento económico dos elementos de apoio da linha.

A economia que se possa conseguir nestes apoios reflete-se fortemente sobre o custo total da instalação.

Dado o interesse do problema o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) tem-se dedicado, de alguns anos a esta parte, [9], [10], [11] e por solicitação directa da «Comissão para o Estudo e Revisão dos Regulamentos de Segurança das Instalações Eléctricas» (CORIEL), ao estudo das solicitações efectivas que, devido ao vento, actuam os cabos das linhas eléctricas aéreas.

No presente trabalho dá-se conta dos resultados experimentais conseguidos.

Até há cerca de uma dezena de anos, no projecto de linhas de alta tensão adoptava-se a hipótese simplificativa que consiste em desprezar a turbulência do vento atmosférico, e admitir que a sua velocidade é uniforme ao longo de todo o vão dos cabos e igual à velocidade máxima registada ou prevista na região da linha.

Como se tivesse posteriormente constatado que esta hipótese se afastava muito da realidade e encarecia desnecessàriamente as estruturas de apoio, tem-se procurado ùltimamente, com base em resultados de observações efectuadas, introduzir um coeficiente de redução que, afectando as pressões teóricas máximas previstas, conduza a pressões efectivas que traduzam melhor a acção realmente exercida pelo vento sobre os cabos, uma vez que a sua velocidade não é uniforme ao longo de frentes extensas. Esta tendência para a redução das pressões do vento, quando este actua em frentes muito extensas, já se encontra hoje expressa não só em diversos regulamentos estrangeiros mas também no projecto português do «Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão».

Foi com o objectivo de fornecer valores que servissem de base ao referido projecto de regulamento que o Laboratório Nacional de Engenharia Civil se ocupou do estudo do problema em questão.

Ao pretender-se dimensionar uma estrutura, para resistir com dada segurança a um certo tipo de solicitação aleatória, é necessário estudar a probabilidade de ocorrência da solicitação, realizando depois o dimensionamento de acordo com determinadas normas de decisão: económicas, estratégicas ou outras.

Na análise estatística da solicitação poderão seguir-se, fundamentalmente, dois métodos:

— Estudar directamente as probabilidades de ocorrência da solicitação;

— Determinar as relações de dependência entre a solicitação e os factores que fundamentalmente a condicionam e analisar estatìsticamente as ocorrências destes factores.

No primeiro caso tem-se uma forma directa de abordar o problema enquanto no segundo a questão é abordada por via indirecta, se bem que duma maneira que evidencia um maior conhecimento do fenómeno em estudo.

No caso presente o primeiro método conduz à análise estatística da ocorrência de pressões efectivas nas linhas, independentemente das velocidades do vento que as originaram, enquanto que o segundo método consiste na determinação da dependência entre as pressões e as velocidades do vento e na análise das probabilidades de ocorrência das várias velocidades do vento.

PARTE I

PRESSÕES EFECTIVAS NAS LINHAS, DEVIDAS À ACÇÃO DO VENTO

1 — GENERALIDADES

A determinação das pressões, que efectivamente actuam as linhas eléctricas aéreas, foi feita em tramos de alinhamento a partir da medição do ângulo de inclinação das cadeias isoladoras de suspensão.

Para o efeito projectaram-se clinómetros de tipo especial que foram montados em várias linhas do país (fig. 1).

Estes aparelhos permitem registar, durante um determinado intervalo de tempo, as inclinações máximas experimentadas pelas cadeias de suspensão. Do conhecimento destas inclinações e das características geométricas e mássicas do sistema oscilante — condutor e cadeia de suspensão — é possível determinar qual a pressão efectiva máxima que, durante o referido intervalo de tempo actuou o sistema.

As leituras dos clinómetros montados foram efectuadas quinzenalmente, sendo os ponteiros indicadores das inclinações máximas conduzidos a zero no final de cada leitura.

Fig. 1 — Localização dos clinómetros montados

2 — DESCRIÇÃO DOS APARELHOS UTILIZADOS

Para a medição das inclinações das cadeias de isoladores projectaram-se dois tipos de aparelhos que se designam, no que se segue, por clinómetros do tipo A e clinómetros do tipo B.

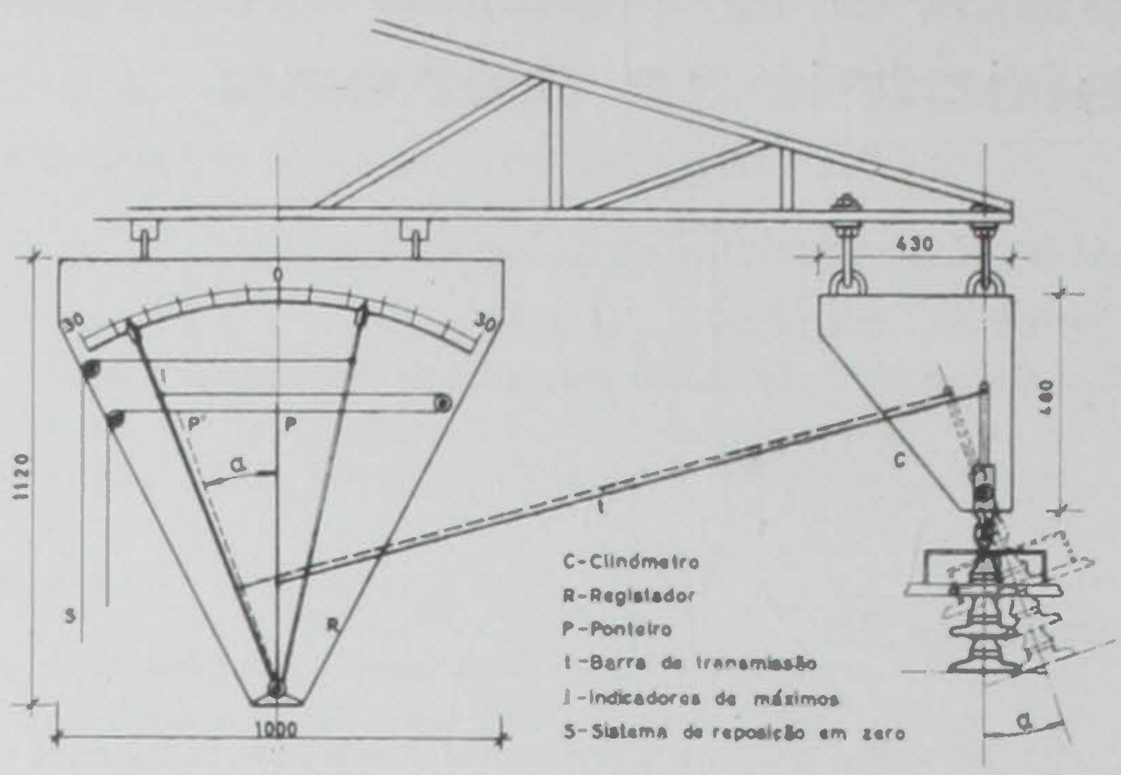

Fig. 2 — Esquema dos clinómetros tipo A

O clinómetro do tipo A (fig. 2) compõe-se essencialmente de um órgão medidor de inclinações, que constitui o clinómetro pròpriamente dito e que é montado em substituição do gancho de suspensão da cadeia de isoladores, e dum órgão registador provido de uma escala graduada com dois ponteiros de máximos. A ligação entre o clinómetro e o registador é feita por meio de uma barra de transmissão que acciona um ponteiro, o qual arrasta, no seu movimento, os dois indicadores de máximos. Por meio de um sistema de trinquete e mola estes indicadores, que se deslocam sobre uma cremalheira, conservam a posição para onde foram deslocados. O retorno a zero dos ponteiros de máximos, realizado no final de cada período de observação, faz-se por intermédio de dois cabos actuados da base do poste, operação que é praticada sem necessidade de interrupção da corrente na linha.

Com a experiência colhida com o funcionamento dos aparelhos deste tipo projectou-se ou outro tipo de clinómetro — clinómetro tipo B — de dimensões mais reduzidas e de funcionamento mais eficiente.

Estes aparelhos, que se apresentam esquemàticamente na fig. 3, constam essencialmente do clinómetro pròpriamente dito, montado no braço do poste em substituição da suspensão da cadeia de isoladores, e de um registador instalado na base do poste. No clinómetro existe um sistema de biela e manivela que permite transformar o movimento de rotação da cadeia em movimento linear o qual é transmitido ao registador por meio de um tubo estreito que se desloca no interior de outro tubo de maior diâmetro. Na zona das curvas o tubo interior é substituído por uma bicha flexível.

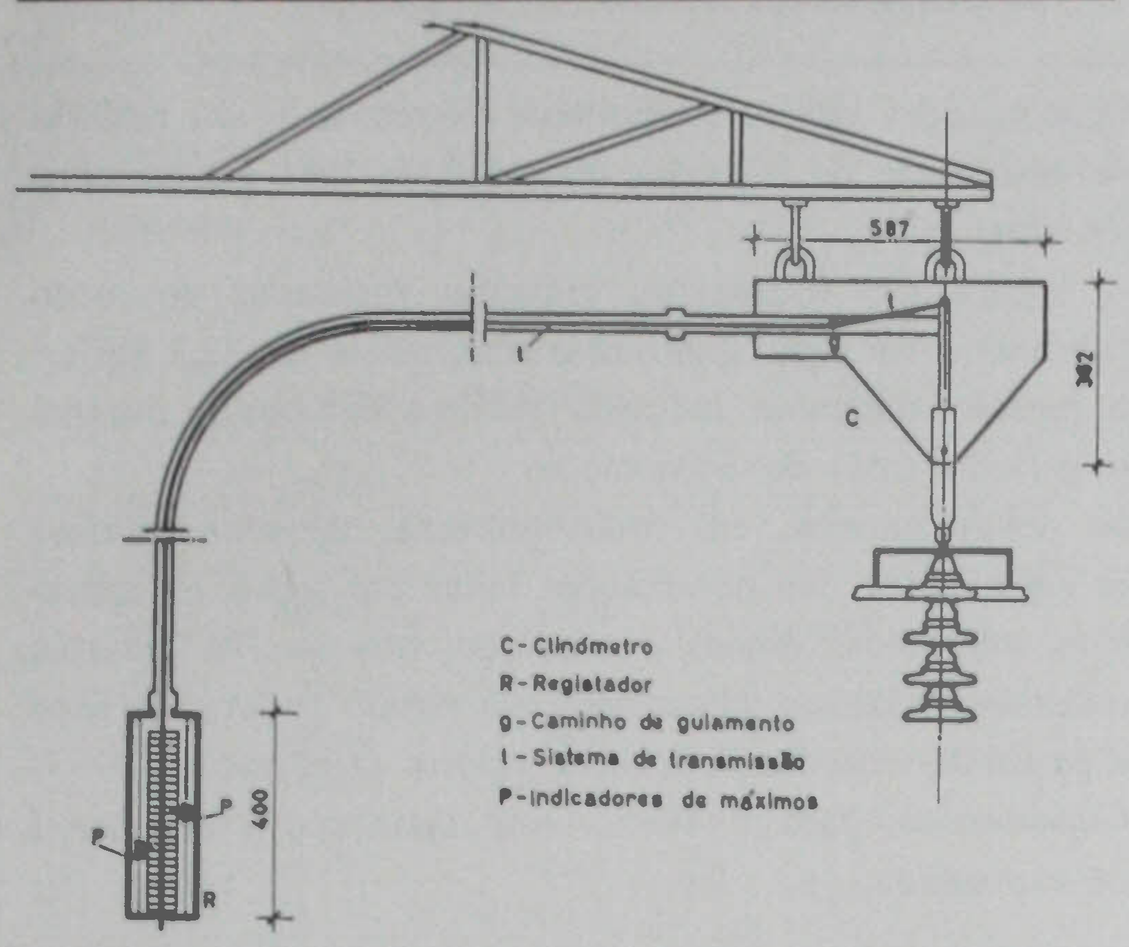

Fig. 3 — Esquema dos clinómetros tipo B

O registador possui uma escala graduada, que permite registar as inclinações da cadeia para um e outro lado, e dois indicadores de máximos accionados por um ponteiro ligado ao tubo interior do sistema de transmissão. A reposição em zero, no final de cada período de observação, é feita deslocando manualmente os referidos indicadores de máximos.

3 — DETERMINAÇÃO DAS PRESSÕES EFECTIVAS A PARTIR DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DAS CADEIAS DE SUSPENSÃO

Considere-se a fig. 4 em que se representa esquemàticamente um troço de linha com apoios desnivelados.

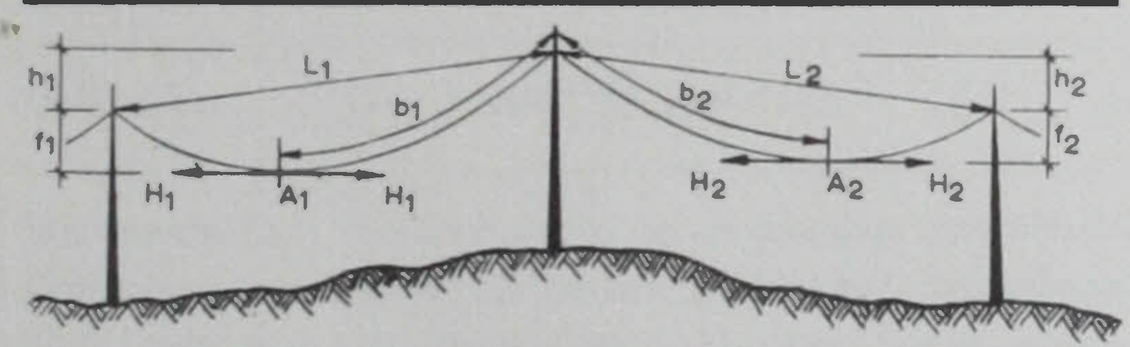

Fig. 4

H_2 e H_2 são os esforços axiais que actuam os condutores nos pontos do vão com tangente horizontal: pontos A_1 e A_2.

Sejam

p_o — o peso do condutor por unidade de comprimento

p_i — o peso da cadeia de suspensão suposto concentrado no seu centro de gravidade

f_H — a resultante da acção do vento sobre a cadeia de suspensão

F_H — a resultante da acção do vento sobre a semi-soma do comprimento dos tramos de condutor situados nos vãos adjacentes à suspensão

D — o diâmetro do condutor

ψ — o ângulo de inclinação da cadeia de isoladores.

Admitindo que a cadeia de suspensão permanece rectilínea para as várias inclinações, dado o seu reduzido peso em relação à força que se exerce na sua extremidade, o equilíbrio estático das forças aplicadas ao sistema pode traduzir-se por:

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{F_H + \dfrac{f_H}{2}}{P + \dfrac{p_i}{2}} \qquad (I.1)$$

em que P representa o peso da porção de condutor interessada na componente vertical ($P = p_o\,(b_1 + b_2)$).

Dado que as relações flechas-vão são muito reduzidas, poderá estudar-se a geometria das catenárias assimilando-as a parábolas.

Assim, para as condições correntes das referidas relações, tem-se:

$$F_H = \alpha\, C\, q\, \frac{L_1 + L_2}{2}\, .\, D \qquad (I.2)$$

α — é o coeficiente de redução de frente

C — é o coeficiente de resistência aerodinâmica

q — é a pressão dinâmica ($q = \dfrac{1}{2}\,\rho\, V^2$, sendo ρ a massa específica do ar e V a sua velocidade).

No que respeita à porção de condutor interessada na componente vertical, isto é, o peso do troço de linha compreendida entre os dois pontos das catenárias com tangente horizontal, tem-se:

$$P = p_o\left[L_1\left(\frac{f_1}{h_1} + 1 \pm \sqrt{\frac{f_1}{h_1} + \left(\frac{f_1}{h_1}\right)^2}\right) + L_2\left(\frac{f_2}{h_2} + 1 \pm \sqrt{\frac{f_2}{h_2} + \left(\frac{f_2}{h_2}\right)^2}\right)\right] = p_o\left[\frac{L_1 + L_2}{2} + a_1\left(\frac{h_1}{L_1}\right) + a_2\left(\frac{h_2}{L_2}\right)\right] \qquad (I.3)$$

em que $a_1 = \dfrac{H_1}{p_o}$ e $a_2 = \dfrac{H_2}{p_o}$.

Estes valores de a_1 e a_2 são característicos das catenárias e exprimem a relação entre a componente horizontal do

esforço axial no cabo — H — e o peso deste por unidade de comprimento.

Entrando com (I.2) e (I.3) em (I.1) e fazendo $a_1 = a_2 = a$ ter-se-á, desprezando por ser muito pequena a parcela $f_H/2$ relativa à acção do vento sobre a cadeia de isoladores,

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\alpha\, C\, q \dfrac{L_1 + L_2}{2} D}{\left[p_o \dfrac{L_1 + L_2}{2} + a \left(\dfrac{h_1}{L_1} + \dfrac{h_2}{L_2} \right) \right] + \dfrac{p_i}{2}} \qquad (I.4)$$

ou

$$P_{ef} = \alpha\, C\, q = K \operatorname{tg} \psi \qquad (I.5)$$

com

$$K = \frac{p_o \left[\dfrac{L_1 + L_2}{2} + a \left(\dfrac{h_1}{L_1} + \dfrac{h_2}{L_2} \right) \right] + \dfrac{p_i}{2}}{\dfrac{L_1 + L_2}{2} D} \qquad (I.6)$$

Obtém-se assim uma expressão simples que relaciona a pressão efectiva média, que actua sobre o condutor, com a inclinação da cadeia de suspensão.

Deve notar-se que a porção de condutor interessada na componente vertical, no caso dos apoios desnivelados, é afectada pelas variações de temperatura do cabo e bem assim pela variação do seu estado de solicitação devido à acção do vento. No entanto o efeito destes factores é perfeitamente desprezável para as condições correntes de solicitação da linha.

Dado que os vãos, da linha, adjacentes aos apoios em que se instalaram os clinómetros eram sensìvelmente de nível, calculou-se, para cada caso, o valor de K dado pela expressão simplificada,

$$K = \frac{p_o \dfrac{L_1 + L_2}{2} + \dfrac{p_i}{2}}{\dfrac{L_1 + L_2}{2} D}$$

Por outro lado, uma vez que as medições foram feitas em linhas com resistências aerodinâmicas diferentes, não teria interesse o conhecimento directo das pressões efectivas (P_{ef}) mas sim a determinação das pressões dinâmicas reduzidas ($\alpha\, q$) que se obtêm multiplicando $\operatorname{tg}\psi$ pelo valor $K' = K/C$ (Quadro I).

Para valores de C consideraram-se, neste caso, os preconizados pelas normas VDE 0210/2.51.

4 — RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados que se apresentam referem-se a um período de observação de 39 meses (Outubro de 1961 a Dezembro de 1964).

A leitura das inclinações máximas registadas em cada clinómetro foi feita quinzenalmente, sendo de 32,2 kgf/m² a pressão dinâmica reduzida máxima constatada durante o período total de observações.

Se determinarmos, em cada quinzena, o valor máximo de $\alpha\, q$ a partir das observações feitas em todos os aparelhos montados, obtém-se um conjunto de 78 pressões reduzidas máximas quinzenais cujo estudo poderá ser feito a partir de uma distribuição de valores extremos.

Considera-se, para o efeito, uma distribuição do tipo I de expressão.

$$P\ (\xi \leqslant x) = F\ (x) = e^{-e^{-x}} \qquad (I.7)$$

em que os xx representam as pressões reduzidas e $F\ (x)$ a probabilidade de ocorrência de valores inferiores a um dado x.

Adoptando um factor de escala γ e uma origem arbitrária U, a expressão anterior transforma-se em

$$F\ (X) = e^{-e^{-\gamma(X-U)}}$$

que poderá escrever-se na forma

$$X = U + \frac{1}{\gamma}\, Y \qquad (I.8)$$

em que Y é uma variável reduzida expressa por

$$Y = -\log_e \left[-\log_e F\ (X) \right] \qquad (I.9)$$

Verifica-se assim que, se exprimirmos $F\ (X)$ em excala duplamente logarítmica, mantendo os XX em escala uniforme, a expressão (I.7) será traduzida pela recta (I.8) bastando para a sua determinação o conhecimento dos parâmetros γ e U.

Para a estimativa destes parâmetros poderão adoptar-se vários critérios, entre os quais o da máxima verosimilhança.

Porém, dado que a aplicação deste critério à distribuição em causa se apresenta bastante trabalhosa, os valores de γ e U foram determinados por meio de tabelas elaboradas por «Watson Computing Laboratories» da Universidade da Columbia. Tais tabelas indicam os valores dos parâmetros $\overline{Y}\ (n)$ e $\sigma\ (n)$ que permitem obter γ e U em função dos dois primeiros momentos da distribuição de valores extremos ($\overline{X}$ — valor médio e S — desvio padrão) e do

QUADRO I — CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS

Clip/metro N.º	Data de Montagem	Linha		Poste N.º	Vãos $\frac{L1 + L2}{2}$ (m)	Peso da linha po (kgf/m)	Peso da cadeia pi (kgf)	Diâmetro do condutor D (m)	Coef. de forma C	$K = \frac{(L1+L2)\ po + pi}{(L1+L2).C.\ D}$ (kgf/m²)	% DESNIVEIS h1/L1	% DESNIVEIS h2/L2
1	16-7-61	150 kV Sacavém	CNE Porto Alto	20	288,5	1,222	65	0,02345	1,0	56,9	— 0,8	+ 0,3
3	21-10-61	150 kV Zêzere	CNE Pereiros II	199	347,0	1,222	65	0,02345	1,0	56,1	— 4,6	+ 7,2
4	22-10-61	220 kV Picote	CNE Pereiros	457	429,5	1,623	102	0,02862	1,0	60,9	— 2,8	+ 1,6
5	24-10-61	220 kV Picote	CNE Vermoim I	501	366,0	1,623	102	0,02862	1,0	61,6	+ 1,1	— 3,0
6	28-10-61	220 kV Picote	CNE Vermoim I	12	427,0	1,623	102	0,02862	1,0	60,9	+ 3,1	— 0,4
7	8-11-61	150 kV Pereiros	CNE Ermesinde	324	297,5	1,222	65	0,02345	1,0	56,8	— 2,7	— 4,0
8	15-11-61	150 kV Porto Alto	CNE Setúbal I	5	393,5	1,222	65	0,02345	1,0	55,6	0,0	+ 0,1
9	20-11-62	150 kV Porto Alto	CNE Setúbal I	99	451,5	1,222	65	0,02345	1,0	55,2	+ 0,2	+ 0,6
10	22-9-61	220 kV Picote	CNE Pereiros	308	440,5	1,623	102	0,02862	1,0	60,8	— 0,9	— 2,7
11	4-10-62	220 kV Pereiros	CNE Alto de Mira	415	499,5	1,623	102	0,02862	1,0	60,3	+ 6,5	— 2,8
12	16-12-62	60 kV Sacavém	CRGE Alhandra	38	213,0	0,609	66,8	0,01724	1,0	44,4	— 0,6	+ 2,5
13	20-1-62	60 kV Sacavém	CRGE Alhandra	26	249,0	0,609	31,8	0,01724	1,0	39,0	— 1,6	— 1,4
15	25-8-63	60 kV Porto	UEP Coimbra	534	216,2	0,545	21	0,01628	1,0	36,5	+ 0,7	+ 0,5
21	29-7-62	60 kV Ferreira	CEAL Loulé	52	229,5	0,543	27,5	0,01628	1,0	37,0	+ 0,9	— 1,4
22	29-7-62	60 kV Ferreira	CEAL Loulé	335	327,2	0,543	27,9	0,01628	1,0	36,0	+ 0,5	+ 0,2
25	15-9-62	30 kV T. V. na Serra de Montejunto	SEOL	3	131,5	0,089	15,5	0,0041	1,2	30,1	+ 3,6	— 0,8
26	23-9-62	60 kV V. do Conde	CHENOP Portuzelo	117	355,0	0,820	35	0,01955	1,0	44,5	— 1,6	— 0,6
27	8-8-62	142 kV Lindoso	El. del Lima Porto	8	149,9	0,550	42	0,01575	1,1	39,8	— 3,2	— 1,3

número total de observações realizadas n [3], por meio das relações

$$\gamma = \frac{\sigma(n)}{S} \quad \text{e} \quad U = \overline{X} - \frac{\overline{Y}(n)}{\gamma}$$

Quando $n \to \infty$, $\overline{Y}(n) = c = 0{,}577216$ (constante de Euler) e $\gamma = \frac{\pi}{S\sqrt{6}}$.

Na fig. 5 apresenta-se a tradução gráfica dos resultados obtidos.

As várias pressões dinâmicas reduzidas foram marcadas no gráfico, tomando para ordenadas os valores expressos pela relação aproximada:

$$F(X_m) \simeq \frac{m}{n+1}$$

em que m é o número de ordem das diversas pressões má-

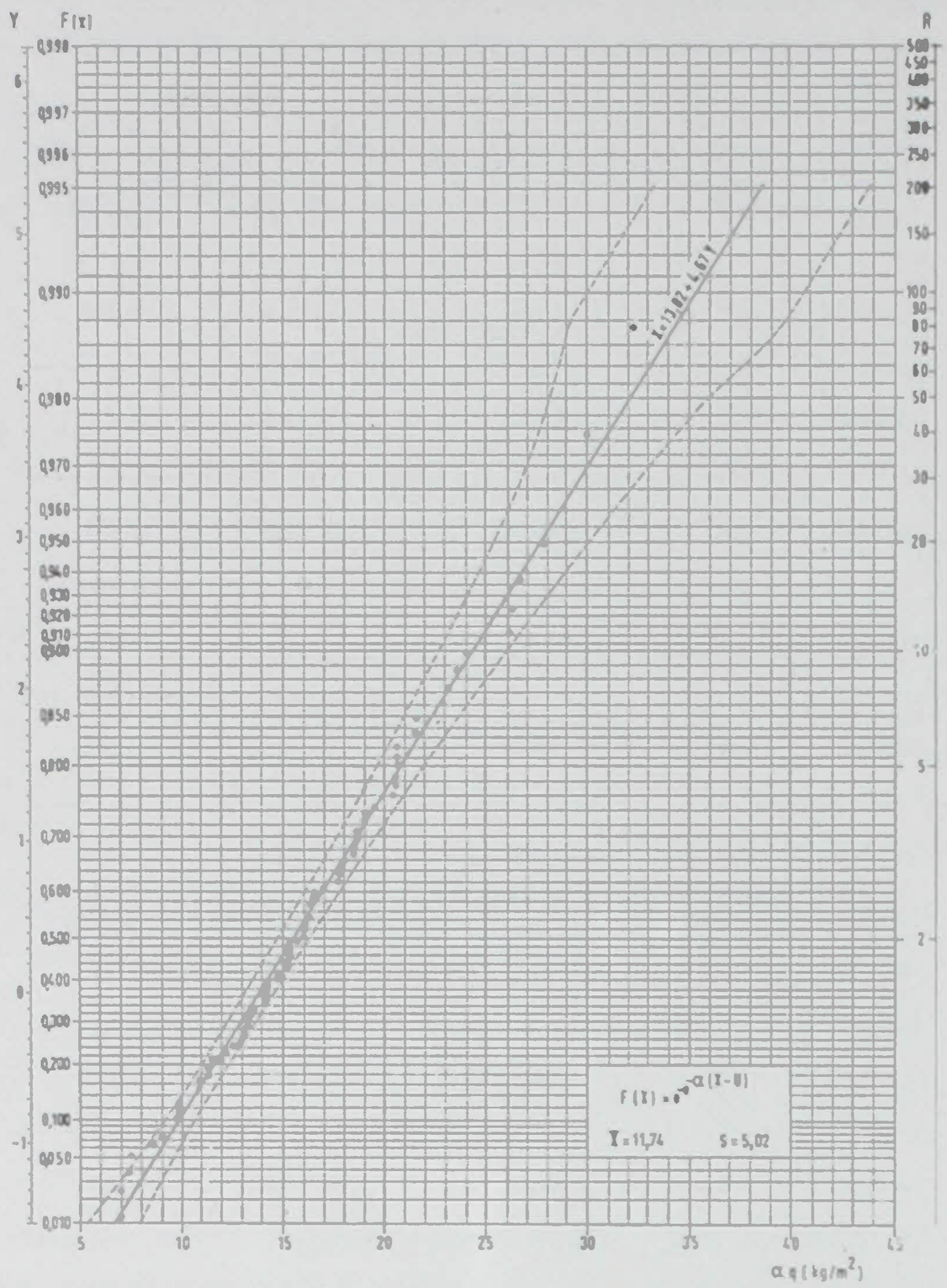

Fig. 5 — Distribuição das pressões reduzidas máximas quinzenais

ximas numa sucessão em que estas são ordenadas por valores crescentes.

No caso presente a distribuição em estudo tem por valor médio e desvio padrão respectivamente

$$\overline{X} = 16{,}42$$

$$S = 5{,}57$$

e, como $n = 78$ ter-se-á,

$$\sigma\ (78) = 1{,}1923$$

$$\overline{Y}\ (78) = 0{,}5565$$

resultando

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{S}{\sigma\ (78)} = 4{,}67$$

$$U = \overline{X} - \frac{\overline{Y}\ (78)}{\gamma} = 13{,}82$$

pelo que a equação (I.8) tem, no caso em estudo, a expressão

$$X = 13{,}82 + 4{,}67\ Y$$

As linhas a tracejado representadas na fig. 5 correspondem aos limites de confiança para uma probabilidade de 68,3%.

Analisando os resultados obtidos para o conjunto dos clinómetros montados que, para efeitos práticos, poderão ser considerados, em média, como em número de oito (dado que nem todos foram montados na mesma data e que as observações em alguns destes tiveram de ser interrompidas para reparação) poderá concluir-se que, em média, pressões reduzidas da ordem dos 36 kgf/m² são previsíveis pelo menos uma vez em cinco anos para o conjunto dos oito clinómetros. A obtenção deste resultado pode ser feita com auxílio da fig. 5, entrando em ordenadas com o período de repetição $R = 5 \times 24 = 120$, ou através da equação que traduz a distribuição de extremos em estudo,

$$X = 13{,}82 - 4{,}67\ Y$$

tendo em conta (I.11) e que

$$R = \frac{1}{1 - F\ (X)} = 5 \times 24$$

Uma extrapolação mais longa, embora de maior risco dado o reduzido período de observações, permitiria concluir que pressões reduzidas da ordem de 45 kgf/m² seriam previsíveis, para o conjunto de oito clinómetros montados, em média, pelo menos uma vez em cerca de 20 anos. Portanto, nestas condições, seriam de esperar, em cada poste, ocorrências de pressões reduzidas desta ordem de grandeza pelo menos uma vez em cada 160 anos, na medida em que uma distribuição de extremos do tipo I traduzir o conjunto dos resultados obtidos nas observações realizadas.

Se considerarmos que, de certo modo, o número de postes em que se fizeram observações constitui uma amostragem suficiente das situações que se apresentam em todos os postes existentes nas linhas aéreas de alta tensão do país, o período de 160 anos relativo à ocorrência de pressões reduzidas da ordem de 45 kgf/m² poderá ser aplicado a cada um dos postes existentes.

Convêm notar que esta pressão reduzida corresponde à que se obtém por aplicação do projecto do «Regulamento de Segurança das Linhas Eléctricas de Alta Tensão», para o caso do coeficiente de redução de frente $\alpha = 0{,}6$ e da pressão dinâmica $q = 75$ kgf/m².

Claro que estas extrapolações realizadas nos domínios do tempo e do espaço envolvem grandes riscos de previsão, não só pelo facto do período de observações considerado ser relativamente pequeno em relação ao período de repetição para que se pretende extrapolar, mas também devido ao pequeno número de elementos que constituem a amostra não permitir considerá-la como suficientemente significativa.

A primeira limitação apontada poderá ser atenuada com o prosseguimento das observações enquanto que a extrapolação no domínio do espaço poderá tornar-se, dentro de certa medida, mais representativa com a montagem de maior número de clinómetros.

Embora os resultados obtidos estejam sujeitos às limitações acima referidas, eles permitiram, obter um primeiro índice do que se poderá prever no país para as pressões exercidas pelo vento sobre as linhas eléctricas aéreas.

(continua)

resumo

ALGUNS RESULTADOS EXPERIMENTAIS SOBRE A ACÇÃO DO VENTO EM LINHAS ELÉCTRICAS AÉREAS

Apresentam-se alguns resultados experimentais de observações sobre os efeitos da acção do vento em linhas eléctricas de alta tensão.
Descrevem-se as técnicas adoptadas e interpretam-se os resultados obtidos.

résumé

SOME EXPERIMENTAL RESULTS ON THE ACTION OF THE WIND ON OVERHEAD POWER LINES

Some experimental results concerning the wind effects on overhead power lines are presented.
The technics used are described and the results obtained are interpreted.

synopsis

QUELQUES RESULTATS EXPERIMENTAUX DE L'ACTION DU VENT SUR LES LIGNES ELECTRIQUES AERIENNES

On présente des résultats expérimentaux de quelques observations concernant l'effet du vent sur les lignes électriques à haute tension.
On décrit les techniques employées et on fait l'interpretation des résultats obtenus.