

Cezar Piedade Jr*
 Gertrudes C.R. Piedade**
 Sérgio H. Benez**

RESUMO

Num país de dimensões continentais, como o nosso, onde a normalização dos projetos de linhas aéreas de eletrificação rural não pode cobrir todo o território nacional por insuficiência de dados, há necessidade de se aprofundarem os conhecimentos relativos ao comportamento dos padrões utilizados e dos critérios de elaboração de projetos.

As linhas rurais são constituídas de um conjunto de acessórios tais como pinos, cruzetas, isoladores, emendas de cabos e amarrações, que participam de todo o seu traçado. Para utilização desses elementos, as nossas normas ressentem-se de dados de pesquisas e oferecem um número limitado de informações, baseadas na maioria das vezes, no comportamento de padrões de outros países.

No presente trabalho, objetivou-se, mediante ensaios de campo, estabelecer o efeito do esforço de tração vertical que ocorre em casos específicos de arrancamento e tomando-se por referência os critérios de cálculo mecânico de linhas rurais, em postos pelas normas brasileiras.

SUMMARY

The research was carried out in the case when the cold curve (50°C) falls above the point of support of the conductor indicating uplift on pin.

A outdoor research with several ruling span (V_p) was designed with ACSR conductor to examine where the cold curve falls above the point of the conductor indicating removal of the pin. The function $V_p = f(R)$, where R is the effort by meter of vertical height difference is an hyperbole of type:

$$\ln R = \ln 0,01 + 1,37 \ln V_p$$

INTRODUÇÃO

A execução de projetos de linhas de transmissão e distribuição no meio rural está intimamente ligada a dois aspectos bastante distintos: o seu comportamento elétrico e o seu comportamento mecânico.

Para o aspecto elétrico tem prevalecido, nos diversos países, a existência de um sistema misto de eletrificação rural que, partindo de uma linha tronco trifásica, permite derivações monofásicas dos tipos: fase-fase, neutro-fase e retorno por terra. Este último ocorre em regiões de baixíssima densidade demográfica, como na Austrália, onde o solo é utilizado como condutor neutro.

(*) Professor Livre Docente do Departº de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônomicas - Campus de Botucatu - SP - UNESP

(**) Professores Assistentes Doutores do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônomicas do Campus de Botucatu - SP - UNESP.

O exame do aspecto mecânico mostra que as linhas rurais são constituídas de um conjunto de acessórios tais como pinos, cruzetas, isoladores, emendas de cabos e amarrações, que participam de todo o seu traçado. Para utilização desses elementos as nossas normas construtivas ressentem-se de dados de pesquisas e oferecem um número limitado de informações baseadas na maioria das vezes, no comportamento de padrões de outros países.

Na execução de um projeto mecânico de linha rural deve-se verificar a possibilidade de arrancamento que pode ocorrer na estrutura central de dois vãos consecutivos.

No presente trabalho objetivou-se estudar o comportamento de vãos consecutivos onde a força de arrancamento do cabo condutor do isolador foi medida em condições ambientes que simulavam as exigências de normas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Na Europa, após a Segunda Guerra Mundial, em diversos países, iniciaram-se a construção de linhas com condutores de alumínio, conforme ressaltam PETIT & HERMANS (1971). O objetivo era dotar as regiões rurais de energia elétrica com serviços seguros e que reduzissem o valor do investimento por km.

No Brasil, as grandes jazidas de minério exigiram o uso de alumínio nas redes de transmissão e distribuição de energia elétrica. A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1972a) estabeleceu para os cabos de alumínio a designação CA e para os cabos de alumínio com alma de aço a designação CAA.

Sendo a linha de eletrificação rural constituída de condutores distribuídos sobre uma posteação, cujos vãos são variáveis, deve-se estabelecer qual o vão característico do traçado que assegura a tensão mais adequada no trecho. Esse vão é designado pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1971) por Vão Regulador (V_{reg}).

$$V_{reg} = V_{med} + \frac{2}{3}(V_{max} - V_{med}) \quad (1)$$

onde:

V_{med} = vão médio, média aritmética do vão existente no trecho considerado

V_{max} = vão máximo, maior dos vãos existentes no trecho considerado.

Os condutores, além da tração de montagem, aplicada conforme o vão regulador do trecho, ficam sujeitos a esforços decorrentes do seu peso próprio, da ação do vento e das variações de temperatura. A associação desses fatores, de acordo com as características climatológicas próprias de cada país delimitam as condições de operação da linha.

A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1972) divide o nosso país para efeito de cálculo mecânico, em regiões onde a velocidade máxima dos ventos varia de 105 a 130 km/h.

A tendência atual, em todos os países, é considerar 3 regiões limites, para linhas leves, médias e pesadas. FINK & CARROL (1969) apresentam para os Estados Unidos a divisão dos distritos de carga estabelecidos pela NATIONAL ELECTRICAL SAFETY CODE.

Na execução de um projeto de linha rural onde existam isoladores com possibilidade de arrancamento, utiliza-se um reforço da estrutura, mediante o emprego de cruzeta dupla, por exemplo. Esse procedimento é meramente qualitativo, deixando a desejar em termos racionais.

Nos ensaios de arrancamento procurou-se sugerir um método para quantificar o esforço em relação ao desnível teórico obtido entre a parte superior da estrutura e a curva de $0^{\circ}C$. O efeito de arrancamento foi considerado isoladamente mediante ensaios de campo, que objetivaram estabelecer uma fórmula para cálculo, em condições específicas, mas que fossem a favor da segurança. Esse estudo foi

desenvolvido na Fazenda Experimental de São Manuel, do Campus de Botucatu-UNESP. A disposição escolhida para os ensaios estão mostrados na Figura 1.

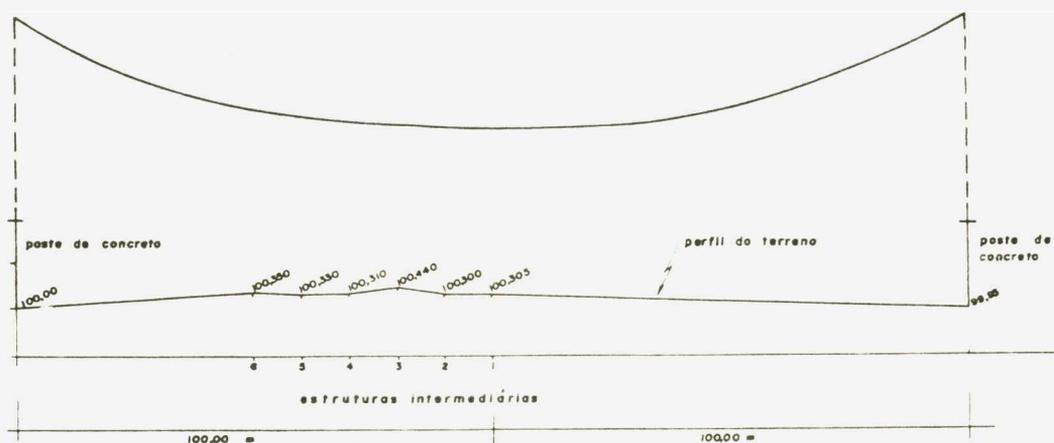


FIGURA 1 - Disposição das estruturas para ensaio de arrancamento

Foram instalados dois postes iguais de concreto cujas alturas de montagem foram niveladas mediante levantamento planialtimétrico. A distância entre esses postes foi de 200 metros. Internamente a essas estruturas, intercalaram-se pontos de ancoragem, onde estruturas menores de altura regulável e niveladas de acordo com o terreno mantinham com os postes extremos uma diferença de nível constante.

O uso de seis estruturas internas permitiu variar o vão regulador, obtendo-se os seguintes valores: 100,00; 106,66; 113,33; 120,00; 126,66 e 133,33 metros. O espaçamento entre as estruturas internas foi medido sempre a partir da central, instalada no meio do vão, e seu valor foi de 10 metros.

O tensionamento dos cabos foi feito com anotações locais de temperatura. A fim de evitar excessivas vibrações causadas pelos métodos tradicionais, o tensionamento do cabo foi realizado com puxadores tipo rosca, que permitiram pequenas variações nas forças atuantes, atendendo às tabelas de tensionamento. Foram empregados dois dinamômetros: no apoio central, onde se mediu o esforço de arrancamento, empregou-se um dinamômetro marca Kartro, de procedência nacional e capacidade 500 kgf; no poste de tensionamento foi instalado um dinamômetro da marca PIAB, de procedência sueca com capacidade de 1000 kgf. Nos pontos onde se efetuaram medições e ancoragem, os cabos foram devidamente protegidos com fitas de alumínio.

A norma brasileira para montagem de linhas leves estabelece que o projeto deverá examinar o comportamento dos cabos para as temperaturas de 0 e 50°C. O primeiro valor afeta o arrancamento e o segundo as distâncias de segurança. A ocorrência de temperatura tão baixa (0°C) embora previsível, não deixa de ser fortuita, pois a realização dos ensaios necessita de um tempo determinado com temperatura constante.

A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1971) sugere o gráfico de tração de montagem da Figura 26, onde estão confrontados os vãos reguladores contra a temperatura de montagem. A construção desse gráfico é feita com os valores indicados nas diversas tabelas da própria norma. Com os dados referentes à tração de montagem para cabo nº CAA nº 4 AWG, para linhas leves, confeccionou-se gráficos tração de montagem contra temperatura cujo aspecto está mostrado na Figura 2.

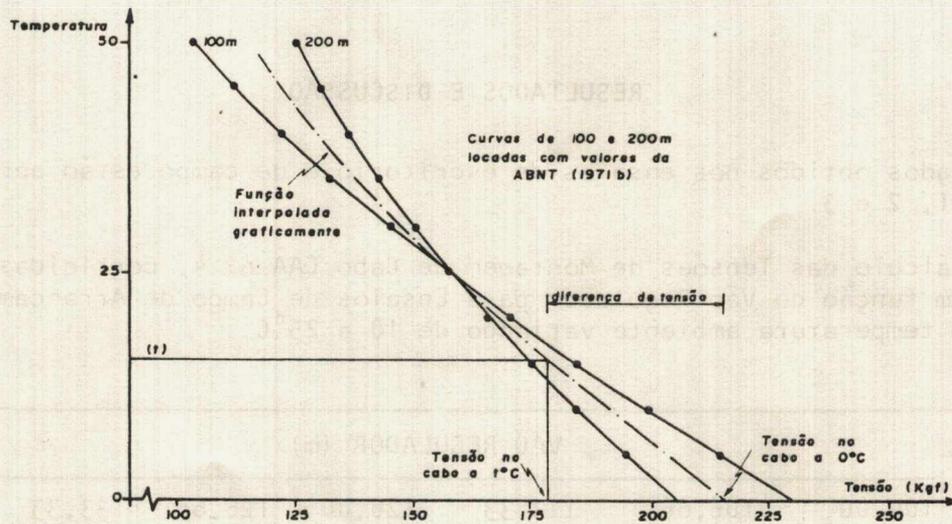


FIGURA 2 - Curvas de tração de montagem para linhas leves em cabo CAA nº 4

No gráfico estão indicadas as curvas para os vãos reguladores de 100 e 200 metros. Para os demais vãos reguladores usados na presente pesquisa foram construídas curvas internas às duas anteriores, por meio de interpolação gráfica. As escalas adotadas foram: Vertical 1 cm = 1°C e Horizontal 1 cm = 1 kgf.

A elaboração do gráfico com as curvas de 100,00; 106,66; 113,33; 120,00; 126,66; 133,33 metros permitiu estabelecer qual a correção a ser aplicada à carga de montagem do cabo, para simular a condição de 0°C.

Quando a temperatura cai o cabo fica sujeito a um acréscimo de tensão (Δt). Elevando-se a temperatura, essa tensão residual vai sendo eliminada, até atingir a temperatura de montagem, quando se anula.

Nos casos examinados, as correções foram sempre aditivas, pois as temperaturas ambientais ficaram entre 25 e 35°C. Para efetuar os ensaios foram calculadas as correções para as cargas de montagens às temperaturas de 20 e 40°C.

Com os esforços de montagem definidos pelo vão regulador e pela temperatura ambiente, o cabo foi instalado. Mediu-se o esforço vertical F no poste intermediário e, em seguida, o cabo foi solto deste, para permitir o registro do desnível (h) entre o cabo e o topo do poste.

Cada ensaio foi repetido três vezes em cada vão regulador examinado. Obteve-se, com os ensaios, definir a função $R = f(V_r)$, onde R é a relação F/h , expressa em kgf/m.

Para os dados obtidos foi organizada uma série de gráficos preliminares para se avaliar a tendência da função pesquisada. Em decorrência desses gráfi

cos foram pesquisados quatro tipos de regressão:

$$\text{Exponencial: } Y = AB^X \quad (2)$$

$$\text{Linear: } Y = A + Bx \quad (3)$$

$$\text{Hiperbólica: } Y = A/x^B \quad (4)$$

$$\text{Quadrática: } Y = A + Bx + Cx^2 \quad (5)$$

Para o cálculo dessas funções utilizou-se uma programação FORTRAN IV que além das equações propostas, forneceu os testes t para os parâmetros angulares da função ajustada, coeficiente de determinação da regressão e teste F para a regressão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados obtidos nos ensaios de escritório e de campo estão apresentados nos Quadros 1, 2 e 3.

QUADRO 1 - Cálculo das Tensões de Montagem de Cabo CAA nº 4, corrigidas para 0°C em função do Vão Regulador para Ensaios de Campo de Arrancamento, com a temperatura ambiente variando de 10 a 25°C.

Temperatura Ambiente °C	VÃO REGULADOR (m)						
	100,00	106,66	113,33	120,00	126,66	133,33	200,00
10	259,00	257,10	255,10	253,30	251,40	255,10	266,00
11	262,00	260,10	258,00	256,20	254,20	252,40	228,00
12	265,00	263,00	261,00	259,20	257,00	255,10	230,30
13	268,00	265,90	263,90	261,90	259,70	257,70	232,30
14	271,00	268,70	266,60	264,50	262,30	266,60	231,20
15	274,00	271,70	269,30	267,20	264,90	262,70	236,00
16	276,80	274,40	272,00	269,90	267,40	265,20	237,70
17	279,60	277,10	274,60	272,40	270,00	267,70	239,50
18	282,40	279,80	277,30	274,90	272,40	270,20	241,40
19	285,20	282,50	279,90	277,40	274,80	272,40	243,30
20	288,80	285,30	282,50	280,00	277,20	274,70	245,00
21	290,60	288,00	285,20	282,60	279,80	277,20	246,60
22	293,20	290,80	287,90	285,00	282,30	279,70	248,30
23	295,80	293,20	290,20	287,60	285,70	281,50	249,90
24	298,40	295,70	292,70	290,00	287,00	284,20	251,50
25	301,00	298,00	295,00	292,20	289,20	286,40	253,00

QUADRO 2 - Cálculo das Tensões de Montagem de Cabo CAA nº 4, corrigidas para 0°C em função do Vão Regulador para Ensaios de Campo de Arrancamento, com a Temperatura Ambiente variando de 26 a 50°C

Temperatura Ambiente 0°C	VÃO REGULADOR (m)						
	100,00	106,66	113,33	120,00	126,66	133,33	200,00
26	303,60	300,40	297,40	294,50	291,50	288,60	251,40
27	306,10	302,60	299,60	296,70	293,60	290,70	255,70
28	292,90	305,00	301,80	298,90	295,80	295,80	257,20
29	310,60	307,40	304,00	301,10	297,90	295,00	258,50

QUADRO 2 - Cálculo das Tensões de Montagem de Cabo CAA nº 4, corrigidas para 0°C em função do Vão Regulador para Ensaio de Campo de Arrancamento, com a Temperatura Ambiente variando de 26 a 50°C.

Temperatura Ambiente 0°C	VÃO REGULADOR (m)						
	100,00	106,66	113,33	120,00	126,66	133,33	200,00
30	313,00	309,60	306,50	303,20	300,10	297,10	260,00
31	315,80	312,20	308,40	305,60	302,30	299,10	261,50
32	318,40	314,80	311,10	307,90	304,50	301,20	263,20
33	321,00	317,40	313,50	310,20	306,70	303,30	264,90
34	323,40	319,80	316,00	312,50	308,90	305,40	266,50
35	326,00	322,20	318,50	314,80	311,00	307,40	268,00
36	328,00	324,20	320,60	316,70	313,00	309,20	269,20
37	330,20	326,10	322,60	318,50	314,80	310,90	270,40
38	332,20	328,00	324,40	320,40	316,60	312,60	271,60
39	334,10	330,00	326,20	322,20	318,20	314,40	272,80
40	336,10	331,00	327,90	324,00	320,00	316,20	274,00
50	355,00	351,30	345,60	341,00	336,30	331,80	276,00

QUADRO 3 - Ensaio de Arrancamento em Função da Curva Fria (°C) e do Vão Regulador

Vão Regulador (m)	Velocidade Vento (km/h)	Carga Vertical de Arrandamento (kgf/m)		
100,00	3,2	6,195	6,062	6,281
106,66	2,9	7,327	7,145	7,434
113,33	5,9	7,324	7,225	7,504
120,00	5,1	8,428	8,014	7,940
126,66	11,3	9,118	8,605	8,199
133,33	4,3	9,889	9,398	9,210

Nos trabalhos de tensionamento de cabos ocorre uma série de erros que são inerentes ao processo, dentre os quais deve-se destacar a inércia dos aparelhos de tensionamento e registro, temperaturas diferenciais, velocidade de carregamento dos cabos e velocidade dos ventos. Em acréscimo a esses fatores, deve-se lembrar, para o caso presente, as limitações impostas pelo processo gráfico para estabelecimento das tensões de montagem.

Os ensaios foram conduzidos admitindo-se a condição de ar calmo e os registros das velocidades do vento acusaram valores médios entre 2,9 e 11,3 km/h. Esses registros ocasionam, conforme a ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS (1972), um acréscimo de carga de 0,35 a 5,39% por metro linear de condutor, nº 4 AWG, tipo CAA.

As equações de regressão para os ensaios de arrancamento, estão apresentadas todas no Quadro 4.

QUADRO 4 - Equações de Regressão para o Confronto do Arrancamento em Função do Vão Regulador e da relação Esforço-Altura.

Tipo de Conductor	Equações de Regressão	CV	r ²	t _D	t _B	t _C
4 AWG	$\ln R = \ln 1,97 + V_r \ln 1,01$	0,52	0,93	14,00**		
	$R = -2,85 + 0,09 V_r$	4,02	0,93	14,05**		
	$\ln R = \ln 0,01 + 1,37 \ln V_r$	0,51	0,93	14,26**		
	$R = -5,89 + 0,04 V_r + 0,0002 V_r^2$	4,13	0,92	0,26ns		0,31ns

Observa-se que a curva hiperbólica $\ln R = \ln 0,01 + 1,37 \ln V_r$, como de mostram os seus valores para o teste "t", "r²" e "CV" deve ser a escolhida para representar o comportamento dos dados obtidos. Na Figura 3 está representada a curva de regressão hiperbólica correspondente à função $R = f(V_r)$.

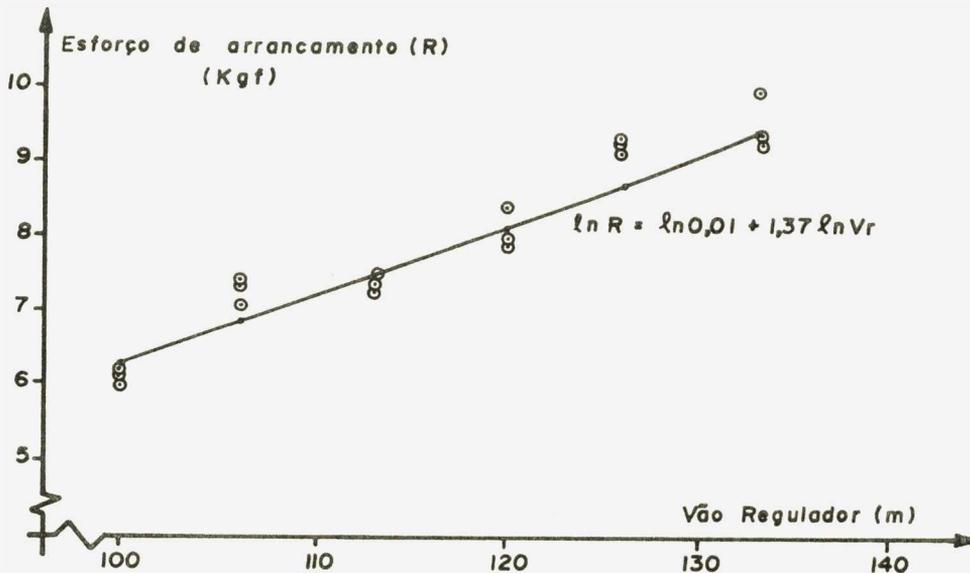


FIGURA 3 - Representação da função $R = f(V)$

O aumento do vão regulador corresponde a um aumento do esforço de arrancamento, conferindo à curva um formato ascendente.

O registro do desnível entre o topo do poste intermediário e o cabo solto, conforme descrito anteriormente, impõem, aos ensaios realizados, uma condição mais real que aquela resultante da verificação do arrancamento pela passagem da curva fria (0°C), pelos postes extremos. Esse critério de verificação pressupõe que, após escapar do poste, o cabo continua a manter a tensão de montagem a 0°C.

Os ensaios, por apresentarem desníveis menores que aqueles obtidos pelos

critérios de verificação, resultaram valores da relação F/h maiores, conferindo aos ensaios uma margem a favor da segurança.

Os ensaios mostraram também que, para os vãos reguladores e desniveis estudados, os esforços desenvolvidos no cabo CAA nº 4 AWG, com a queda de temperatura, tendem a arrancá-lo por afrouxamento motivado por deformações dinâmicas. Essas deformações são mais pronunciadas sobre as amarrações do que sobre a estrutura pino-isolador.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo auxílio financeiro prestado ao desenvolvimento da presente pesquisa (Processo 75/887).

LITERATURA CITADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *EB-293*: cabos de alumínio (CA) e cabos de alumínio com alma de aço (CAA) para fins elétricos. Rio de Janeiro, 1972. 17p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *PB-45*: linhas aéreas de distribuição de energia elétrica, tensão primária da classe 15 kV. Rio de Janeiro. 1971. 58 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro. *NB-182*: projeto de linhas aéreas de transmissão e subtransmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro, 1972. 17 p.

FINK, D.G. & CARROL, J.M. *Standard handbook for electrical engineers*. 10ª ed. New York, McGraw-Hill. 1969. 1702 p.

PETIT, K.L. & HERMANS, R. Caractéristique actuelles de l'électrification rurale. - *Elect. belge*, (146): 17-36, 1971.