



Dimensionamento de cabos para linhas aéreas de transmissão – Procedimento

APRESENTAÇÃO

1) Este Projeto foi elaborado pela Comissão de Estudo de Condutores Elétricos de Alumínio (CE-003:020.001) do Comitê Brasileiro de Eletricidade (ABNT/CB-003), com número de Texto-Base 003:020.001-035, nas reuniões de:

18.10.2022	13.12.2022	07.02.2023
07.03.2023		

a) não tem valor normativo;

2) Aqueles que tiverem conhecimento de qualquer direito de patente devem apresentar esta informação em seus comentários, com documentação comprobatória;

3) Analista ABNT – Newton Ferraz.



Prefácio

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o Foro Nacional de Normalização. As Normas Brasileiras, cujo conteúdo é de responsabilidade dos Comitês Brasileiros (ABNT/CB), dos Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e das Comissões de Estudo Especiais (ABNT/CEE), são elaboradas por Comissões de Estudo (CE), formadas pelas partes interessadas no tema objeto da normalização.

Os Documentos Técnicos ABNT são elaborados conforme as regras da ABNT Diretiva 2.

A ABNT chama a atenção para que, apesar de ter sido solicitada manifestação sobre eventuais direitos de patentes durante a Consulta Nacional, estes podem ocorrer e devem ser comunicados à ABNT a qualquer momento (Lei nº 9.279, de 14 de maio de 1996).

Os Documentos Técnicos ABNT, assim como as Normas Internacionais (ISO e IEC), são voluntários e não incluem requisitos contratuais, legais ou estatutários. Os Documentos Técnicos ABNT não substituem Leis, Decretos ou Regulamentos, aos quais os usuários devem atender, tendo precedência sobre qualquer Documento Técnico ABNT.

Ressalta-se que os Documentos Técnicos ABNT podem ser objeto de citação em Regulamentos Técnicos. Nestes casos, os órgãos responsáveis pelos Regulamentos Técnicos podem determinar as datas para exigência dos requisitos de quaisquer Documentos Técnicos ABNT.

A ABNT NBR XXXXX foi elaborada no Comitê Brasileiro de Eletricidade (ABNT/CB-003), pela Comissão de Estudo de Condutores Elétricos de Alumínio (CE-003:020.001). O Projeto de Revisão circulou em Consulta Nacional conforme Edital nº XX, de XX.XX.XXXX a XX.XX.XXXX.

O Escopo em inglês da ABNT NBR XXXXX é o seguinte:

Scope

This Standard sets down a procedure for the conductor cross-section area definition to be used in transmission lines, based only on the steady-state or overload current-carrying capacity and on the the required mechanical characteristics.

This Standard does not apply to the transmission line design, it shall be applied only for the definition of the conductor cross-section area.



1 Escopo

Esta Norma estabelece um procedimento para o dimensionamento da seção do cabo a ser utilizada em linhas de transmissão, com base na capacidade de corrente em regime permanente e/ou de emergência e nas características mecânicas necessárias.

Esta Norma não se destina ao projeto da linha de transmissão, somente à determinação da seção do cabo.

2 Referências normativas

Os documentos a seguir são citados no texto de tal forma que seus conteúdos, totais ou parciais, constituem requisitos para este Documento. Para referências datadas, aplicam-se somente as edições citadas. Para referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes do referido documento (incluindo emendas).

ABNT NBR 5369, *Cabos de liga alumínio-magnésio-silício nus com alma de aço zincado para linhas aéreas – Especificação*

ABNT NBR 5456, *Eletricidade geral – Terminologia*

ABNT NBR 5471, *Condutores elétricos*

ABNT NBR 7270, *Cabos de alumínio nus com alma de aço zincado para linhas aéreas – Especificação*

ABNT NBR 7271, *Cabos de alumínio nus para linhas aéreas – Especificação*

ABNT NBR 7302, *Condutores elétricos de alumínio – Tensão-deformação em condutores de alumínio – Método de ensaio*

ABNT NBR 7303, *Condutores elétricos de alumínio – Fluência em condutores de alumínio*

ABNT NBR 10298, *Cabos de liga alumínio-magnésio-silício, nus, para linhas aéreas – Especificação*

ABNT NBR 15770, *Cabos de alumínio nus reforçados com fios de liga alumínio-magnésio-silício para linhas aéreas – Especificação*

ABNT NBR 16686, *Cabos de alumínio-liga 1120 para linhas aéreas – Especificação*

3 Termos e definições

Para os efeitos deste documento, aplicam-se os termos e definições das ABNT NBR 5456 e ABNT NBR 5471, e os seguintes.

3.1

cabo composto

cabo formado por dois materiais diferentes, como os cabos CAA, formados por fios de aço e alumínio

3.2

EDS (everyday stress)

tensão ou força de tração a que o cabo está normalmente submetido durante a maior parte de sua vida útil

3.3

flecha

maior distância que une a linha reta imaginária que une dois pontos de fixação e o ponto mais baixo do comprimento do cabo

3.4

força de tração

força que age no eixo do fio ou no cabo completo

3.5

resistência mecânica calculada

RMC

valor calculado da resistência à tração ou carga de ruptura do cabo

3.6

temperatura de *knee point*

temperatura do cabo acima da qual os fios de alumínio não contribuem mais com a resistência à tração do cabo

3.7

tensão

força de tração dividida pela área da seção transversal do elemento em que essa força age (fio ou cabo completo)

3.8

vão

distância horizontal entre os pontos de fixação dos cabos em dois suportes (torres) consecutivos

3.9

vão regulador ou vão equivalente

vão hipotético equivalente ao(s) vão(s) real(is), em que a variação de tensão no cabo devida à variação em sua temperatura, na pressão do vento ou carga de gelo é a mesma

4 Características do cabo

4.1 Um cabo destinado a transmitir a corrente em uma linha de transmissão de energia elétrica precisa ter não somente a capacidade de condução de corrente adequada, como também características mecânicas que permitam resistir aos esforços a que será submetido durante a sua vida útil.

4.2 Outras características, que não fazem parte do escopo desta Norma, podem influenciar na escolha do cabo, como as perdas na linha, comportamento quanto ao efeito corona etc.

4.3 A capacidade de condução de corrente do cabo depende do seguinte:

- a) temperatura ambiente ou temperatura do ar (θ_a);
- b) temperatura máxima admissível para o cabo (θ_c);
- c) resistência elétrica máxima do cabo em corrente contínua a 20 °C (R_o);
- d) diâmetro do cabo (D);



- e) velocidade do vento (V) e seu ângulo de incidência sobre a linha;
- f) intensidade da radiação solar (H) e seu ângulo de incidência sobre a linha;
- g) altitude da linha em relação ao nível do mar (H_e);
- h) coeficiente de emissividade térmica do cabo (e);
- i) coeficiente de absorção da radiação solar do cabo (a).

4.4 Esta Norma apresenta uma metodologia de cálculo simplificado, uma vez que considera valores fixos para os ângulos de incidência, radiação solar e coeficientes de emissividade e absorção de radiação solar. A mesma metodologia pode ser adaptada quando essas grandezas tiverem outro valor.

4.5 O objetivo do dimensionamento por capacidade de condução de corrente é garantir que o cabo jamais ultrapasse sua temperatura máxima admissível quando circular a corrente nominal de projeto, porque, uma vez que isso ocorra, suas características elétricas e mecânicas começam a se deteriorar, sendo o efeito cumulativo.

4.6 Mecanicamente, o cabo deve ser dimensionado para as condições da instalação e para as mudanças ambientais que ocorrerão durante a sua vida útil. Para isso, deve ser especificado o seguinte:

- a) vão regulador (A);
- b) flecha máxima admissível ($f_{m\acute{a}x}$), que depende da altura mínima de segurança;
- c) força de tração máxima admissível (F) para cada uma das hipóteses de carregamento;
- d) temperaturas do ar (θ_a);
- e) velocidades do vento (V);
- f) EDS (*everyday stress*), incluindo a temperatura ambiente e a velocidade do vento mais costumeiras.

4.7 Para que a determinação da capacidade de condução de corrente do cabo e seu dimensionamento mecânico sejam possíveis, devem ser conhecidos os seguintes dados sobre o cabo:

- a) resistência elétrica em corrente contínua na temperatura de 20 °C;
- b) coeficiente de variação da resistência elétrica com a temperatura;
- c) diâmetro;
- d) área da seção transversal;
- e) módulo de elasticidade final;
- f) coeficiente de dilatação linear final;
- g) temperatura máxima de operação;
- h) expressão da fluência;
- i) massa líquida unitária.

4.8 Além disso, deve-se conhecer a corrente nominal de projeto que deve circular no cabo.

4.9 As características dos cabos podem ser encontradas nos catálogos dos fabricantes e nas ABNT NBR 5369, ABNT NBR 7270, ABNT NBR 7271, ABNT NBR 10298, ABNT NBR 15770 e ABNT NBR 16686, mas existem cabos que também podem ser utilizados sem uma Norma Brasileira correspondente.

4.10 O módulo de elasticidade final pode ser obtido dos resultados de ensaio conforme a ABNT NBR 7302 e a expressão da fluência dos resultados de ensaio conforme a ABNT NBR 7303.

NOTA Dados de características mecânicas de vários cabos podem ser encontrados na publicação da *Aluminum Association, Stress-strain-creep curves for aluminum overhead electrical conductors – a technical report of the Aluminum Association's Electrical Technical Committee, May 1997.*

5 Capacidade de condução de corrente em regime de operação

Esta Seção não é aplicável se o cabo sendo dimensionado for um cabo para-raios, considerando-se, nesse caso, nula a corrente elétrica no cabo e sua temperatura igual à temperatura ambiente.

5.1 Capacidade de condução de corrente

A capacidade de condução de corrente é calculada por:

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R}} \quad (1)$$

onde

q_c é o calor emitido por convecção, expresso em watts por metro (W/m);

q_r é o calor emitido por radiação, expresso em watts por metro (W/m);

q_s é o calor absorvido do sol, expresso em watts por metro (W/m);

R é a resistência elétrica do cabo em corrente alternada na temperatura máxima de operação, expressa em ohms por metro (Ω /m);

I é a capacidade de condução de corrente elétrica, expressa em ampères (A).

5.2 Resistência elétrica do cabo em corrente alternada na temperatura máxima de operação

5.2.1 A resistência elétrica do cabo em corrente alternada na temperatura máxima de operação é calculada pela seguinte equação:

$$R = R' \cdot (1 + \gamma_s) \quad (2)$$

onde

R' é a resistência elétrica em corrente contínua do cabo na sua temperatura máxima de operação, expressa em ohms por metro (Ω /m);

y_s é o fator de efeito pelicular.

NOTA 1 A resistência elétrica em corrente alternada também consideraria o fator de efeito de proximidade com outros cabos; entretanto, dada a distância usual entre os cabos em uma linha de transmissão, esse efeito é considerado desprezível.

NOTA 2 Os cabos considerados nesta Norma têm seção circular e são encordoados. Para outros tipos de cabos, ver IEC 60287-1-1.

5.2.2 A resistência elétrica em corrente contínua do cabo na sua temperatura máxima de operação é calculada pela seguinte equação:

$$R' = R_o \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (\theta_c - 20)] \quad (3)$$

onde

R_o é a resistência elétrica máxima do cabo em corrente contínua a 20 °C, expressa em ohms por metro (Ω/m);

α_{20} é o coeficiente de variação da resistência elétrica com a temperatura ($^{\circ}C^{-1}$);

θ_c é a temperatura do cabo, expressa em graus Celsius ($^{\circ}C$).

NOTA A resistência elétrica máxima do cabo em corrente contínua a 20 °C e o coeficiente de variação da resistência elétrica com a temperatura são dados nas normas ABNT NBR 7270, ABNT NBR 7271, ABNT NBR 10298, ABNT NBR 10841, ABNT NBR 15770 ou ABNT NBR 16686 e geralmente são reproduzidos nos catálogos dos fabricantes.

5.2.3 O fator de efeito pelicular depende do fator x_s , calculado pela seguinte equação:

$$x_s = \sqrt{\frac{8\pi f}{R'}} \cdot 10^{-7} \quad (4)$$

onde

f é a frequência, expressa em hertz (Hz).

5.2.4 O fator de efeito pelicular é calculado pela seguinte equação para os casos em que $0 < x_s \leq 2,8$:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 \cdot x_s^4} \quad (5)$$

NOTA A maioria dos casos está nessa faixa de $0 < x_s \leq 2,8$.

5.2.5 O fator de efeito pelicular é calculado pela seguinte equação para os casos em que $2,8 < x_s \leq 3,8$:

$$y_s = -0,136 - 0,0177 \cdot x_s + 0,056 \cdot x_s^2 \quad (6)$$

5.2.6 O fator de efeito pelicular é calculado pela seguinte equação para os casos em que $x_s > 3,8$:

$$y_s = 0,354 \cdot x_s - 0,733 \quad (7)$$

5.3 Calor emitido por convecção

5.3.1 Convecção forçada (com vento)

O calor deve ser calculado pelas duas equações seguintes, seleccionando-se o maior resultado:

$$q_c = \left[1,01 + 0,0372 \cdot \left(\frac{D \cdot \rho_f \cdot V}{\mu} \right)^{0,52} \right] \cdot k \cdot K_a \cdot (\theta_c - \theta_a) \quad (8)$$

Ou

$$q_c = 0,0119 \cdot \left(\frac{D \cdot \rho_f \cdot V}{\mu} \right)^{0,6} \cdot k \cdot K_a \cdot (\theta_c - \theta_a) \quad (9)$$

onde

- D é o diâmetro do cabo, expresso em milímetros (mm);
- ρ_f é a densidade do ar, expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);
- V é a velocidade do vento, expresso em metros por segundo (m/s);
- μ é a viscosidade dinâmica do ar, expressa em pascal vezes segundos (Pa·s) ou newton vezes segundos por metro quadrado (N·s/m²);
- k é a condutividade térmica do ar na temperatura θ_f , expressa em watt por metro grau Celsius (W/m·°C);
- θ_f é a média entre as temperaturas do cabo e ambiente, expressa em graus Celsius (°C);
- K_a é o fator de direção do vento = 1;
- θ_c é a temperatura no cabo, expressa em graus Celsius (°C);
- θ_a é a temperatura ambiente, expressa em graus Celsius (°C).

$$\theta_f = \frac{\theta_c + \theta_a}{2} \quad (10)$$

$$\mu = \frac{1,458 \cdot 10^{-6} \cdot (\theta_f + 273)^{1,5}}{\theta_f + 383,4} \quad (11)$$

$$\rho_f = \frac{1,293 - 1,525 \cdot 10^{-4} \cdot H_e + 6,379 \cdot 10^{-9} \cdot H_e^2}{1 + 0,00367 \cdot \theta_f} \quad (12)$$

onde

- H_e é a altitude do cabo acima do nível do mar, expressa em metros (m).

$$k = 2,424 \cdot 10^{-2} + 7,477 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_f - 4,407 \cdot 10^{-9} \cdot \theta_f^2 \quad (13)$$

5.3.2 Convecção natural (sem vento)



A convecção natural deve ser calculada pela seguinte equação:

$$q_c = 0,0205 \cdot \rho_f^{0,5} \cdot D^{0,75} \cdot (\theta_c - \theta_a)^{1,25} \quad (14)$$

5.4 Calor absorvido do sol

O calor absorvido do sol deve ser calculado pela seguinte equação:

$$q_s = a \cdot Q_s \cdot D \cdot 10^{-3} \quad (15)$$

onde

a é o coeficiente de absorção da radiação solar;

Q_s é a intensidade da radiação solar, expressa em watts por metro quadrado (W/m²).

NOTA A menos que seja especificado outro valor, utilizar $a = 0,5$ e $Q_s = 1\,000$ W/m².

5.5 Calor emitido por radiação

O calor emitido por radiação deve ser calculado pela seguinte equação:

$$q_r = 0,0178 \cdot D \cdot e \cdot \left[\left(\frac{\theta_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (16)$$

onde

e é o coeficiente de emissividade.

NOTA A menos que seja especificado outro valor, utilizar $e = 0,5$.

6 Dimensionamento mecânico

6.1 Força de pressão do vento

A força de pressão do vento sobre o cabo pode ser calculada pela seguinte equação:

$$p_v = \frac{0,102}{2} \cdot \rho_f \cdot V^2 \cdot D \cdot 10^{-3} \quad (17)$$

onde

p_v é a força de pressão do vento, expressa em quilogramas-força por metro (kgf/m).

NOTA 1 Quando houver carga de gelo, o diâmetro D é o diâmetro do cabo somado a duas vezes a espessura da camada de gelo.

NOTA 2 Quando a carga de vento for dada em termos de pressão propriamente dita (P_a , kgf/mm² etc.), o cálculo da força é realizado multiplicando-se o valor da pressão do vento pelo diâmetro do condutor, utilizando-se as unidades de medida adequadas.

6.2 Carga de gelo

Embora não seja comum ocorrer no Brasil, a carga de gelo pode ser calculada pela seguinte equação:

$$Q = 0,0029 \cdot e_g \cdot (D + e_g) \quad (18)$$

onde

Q é a carga de gelo, expressa em quilogramas-força por metro (kgf/m);

e_g é a espessura da camada de gelo, expressa em milímetros (mm).

6.3 Carga total

A carga mecânica total no cabo é composta pelo seu peso próprio e por eventuais força do vento e carga de gelo, e pode ser calculada pela seguinte equação:

$$p = \sqrt{(p_c + Q)^2 + p_v^2} \quad (19)$$

onde

p é a carga total, expressa em quilogramas-força por metro (kgf/m);

p_c é o peso do cabo, expresso em quilogramas-força por metro (kgf/m).

6.4 Flecha

A flecha deve ser calculada pela seguinte equação:

$$f = \frac{p \cdot A^2}{8 \cdot F} \quad (20)$$

onde

f é a flecha, expressa em metros (m);

A é o vão, expresso em metros (m);

F é o componente horizontal da força ou carga de tração, expresso em quilogramas-força (kgf).

NOTA Em casos específicos, pode ser utilizada a formulação de flecha da catenária.

6.5 Comprimento do cabo no vão

O comprimento do cabo no vão deve ser calculado pela seguinte equação:

$$L = A + \frac{8 \cdot f^2}{3 \cdot A} \quad (21)$$

onde

L é o comprimento do cabo no vão, expresso em metros (m).

6.6 Equivalente térmico da fluência

Da função da tensão (kgf/mm²) x alongamento (% , “*micro-strain*” ou p.u.) para um período de dez anos, obter o alongamento ε , em p.u. (por unidade), e calcular seu equivalente térmico pela seguinte equação:

$$\Delta\theta = \frac{\varepsilon}{\beta} \quad (22)$$

onde

$\Delta\theta$ é o equivalente térmico da fluência, expresso em graus Celsius (°C);

ε é o alongamento por fluência (p.u.);

β é o coeficiente de dilatação térmica final do cabo (°C⁻¹).

6.7 Mudança de estado

Depois que a instalação é completada e o cabo é grampeado nas torres, podem ocorrer mudanças na temperatura ambiente, velocidade do vento e carga de gelo (se existir), e a temperatura do cabo aumentará devido ao efeito Joule provocado pela circulação da corrente elétrica. Isso fará com que o comprimento do cabo no vão se altere, alterando a flecha e a força de tração. A nova força de tração pode ser calculada pela equação da mudança de estado a seguir:

$$F_2^3 + F_2^2 \cdot \left[\frac{E \cdot S \cdot A^2 \cdot p_1^2}{24 \cdot F_1^2} + E \cdot S \cdot \beta \cdot (\theta_2 - \theta_1) - F_1 \right] = \frac{E \cdot S \cdot A^2 \cdot p_2^2}{24} \quad (23)$$

onde

F_1 é a força ou carga de tração antes da mudança de estado, expressa em quilogramas-força (kgf);

F_2 é a força ou carga de tração depois da mudança de estado, expressa em quilogramas-força (kgf);

E é o módulo de elasticidade final do cabo, expresso em quilogramas-força por milímetro quadrado (kgf/mm²);

S é a área da seção transversal do cabo completo, expressa em milímetros quadrados (mm²);

p_1 é a carga total antes da mudança de estado, expressa em quilogramas-força por metro (kgf/m);

p_2 é a carga total depois da mudança de estado, expressa em quilogramas-força por metro (kgf/m);

θ_1 é a temperatura do cabo antes da mudança de estado, expressa em graus Celsius (°C);

θ_2 é a temperatura do cabo depois da mudança de estado, expressa em graus Celsius (°C).

NOTA Como as temperaturas são referidas ao cabo, o aquecimento por efeito Joule, provocado pela circulação da corrente elétrica, é afetado pelas variações eventuais da temperatura ambiente e velocidade do vento.

6.8 Temperatura do *knee point*

6.8.1 Esta Seção é aplicável somente aos cabos compostos por dois materiais, como aqueles que

possuem a alma de um material e as coroas de outro.

6.8.2 A temperatura do *knee point* é dada pela seguinte equação:

$$\theta_{kp} = \theta_o + \frac{F_2}{E_N \cdot S_N \cdot (\beta_A - \beta_N)} \quad (24)$$

onde

θ_{kp} é a temperatura do *knee point*, expressa em graus Celsius (°C);

θ_o é a temperatura inicial, expressa em graus Celsius (°C);

F_2 é a força de tração no cabo quando sua temperatura for θ_{kp} ;

E_N é o módulo de elasticidade final da alma ou núcleo no cabo, expresso em quilogramas-força por milímetro quadrado (kgf/mm²);

S_N é a área da seção transversal da alma ou do núcleo, expressa em milímetros quadrados (mm²);

β_A é o coeficiente de dilatação térmica linear do alumínio (°C-1);

β_N é o coeficiente de dilatação térmica linear da alma ou do núcleo (°C-1).

6.8.3 A força F_2 é determinada pela seguinte equação:

$$F_2^3 + F_2^2 \cdot \frac{\beta_A - \beta}{\beta_A} \cdot \left[\frac{E \cdot S \cdot A^2 \cdot p^2}{24 \cdot F_1^2} - F_1 \right] - \frac{\beta_A - \beta}{\beta_A} \cdot \frac{E \cdot S \cdot A^2 \cdot p^2}{24} = 0 \quad (25)$$

onde

β é o coeficiente de dilatação térmica linear do cabo completo (°C-1);

F_1 é a força ou carga de tração inicial, expressa em quilogramas-força (kgf).

7 Procedimento de dimensionamento do cabo

7.1 Antes do início do dimensionamento, devem ser especificados:

- corrente máxima que deve circular no cabo;
- temperatura máxima admissível para o cabo;
- comprimento do vão;
- flecha máxima admissível;
- altitude média da instalação em relação ao nível do mar;
- estado(s) inicial(is) (temperatura ambiente, força máxima de tração e velocidade do vento);
- estado(s) final(is) (temperatura ambiente, força máxima de tração e velocidade do vento);

h) carga EDS.

A força máxima de tração nas condições iniciais pode ser dada como um valor em newtons, quilonewtons ou quilogramas-força, como uma porcentagem da RMC ou por uma relação entre essa força e o peso do cabo. Na falta de um valor especificado, utilizar 20 % da RMC.

7.2 O dimensionamento mecânico é realizado para o vão médio ou regulador, embora possa ser utilizada a mesma metodologia para qualquer vão, desde que seja considerado o cabo grampeado nas duas torres e o vão seja nivelado; se o vão não for nivelado, considerar o vão equivalente.

7.3 A corrente e a temperatura de 7.1-a) e 7.1-b) podem ser os valores para regime permanente ou de emergência.

NOTA 1 Em qualquer regime, caso a temperatura ultrapasse o máximo estabelecido, há perda de características mecânicas do cabo, de forma que uma boa prática é estabelecer a temperatura de emergência como a temperatura máxima admissível do cabo e a temperatura em regime permanente como um valor abaixo desse.

NOTA 2 Se a temperatura de emergência for maior que a temperatura máxima admissível para o cabo, esse cabo terá sua carga de ruptura reduzida ao longo do tempo, em função de quanto a temperatura de emergência é maior que a temperatura máxima e de sua duração cumulativa. Recomenda-se que, para projeto com esse critério, seja conhecido o comportamento da variação da carga de ruptura do cabo com o tempo e temperatura, e que haja controle da temperatura e duração do regime de emergência durante toda a vida útil do cabo.

7.4 O primeiro passo do procedimento é escolher o(s) tipo(s) de cabos, por exemplo, CA, CAA, CAL, CAL 1120 etc.

7.5 O fabricante deve informar, em geral, por meio de catálogos ou folhas de dados técnicos, a resistência elétrica máxima em corrente contínua a 20 °C de cada cabo, o coeficiente de variação da resistência elétrica com a temperatura a 20 °C e o diâmetro do cabo.

7.6 Calcular, conforme a Seção 5, a capacidade de corrente para várias formações de cada tipo de cabo escolhido e escolher a(s) seção(ões) do cabo cuja capacidade de corrente seja igual ou maior que a corrente máxima estabelecida em 7.1-a).

NOTA 1 Em geral, o projetista da linha fornece os dados para cálculo da capacidade de corrente, principalmente a temperatura ambiente, velocidade ou pressão do vento e temperatura máxima do condutor.

NOTA 2 Caso não sejam informados dados específicos para a determinação da capacidade de corrente, essa pode ser especificada para todos os estados – inicial(is) e final(is) – e adotado o menor valor obtido.

7.7 O fabricante deve informar, para cada seção do cabo:

- a) diâmetro do cabo;
- b) resistência mecânica calculada (RMC);
- c) coeficiente de variação da resistência elétrica com a temperatura;
- d) coeficiente de dilatação térmica final do cabo (e da alma ou núcleo e coroas, se for cabo composto);
- e) módulo de elasticidade final do cabo (e da alma ou núcleo, se for cabo composto);
- f) área da seção transversal do cabo completo (alma ou núcleo, e também das coroas, se for cabo composto);



- g) peso do cabo;
- h) alongamento por fluência de dez anos, caso esteja disponível.

NOTA Os valores e/ou metodologias de cálculo das alíneas b), c), d) e e) podem, eventualmente ser encontrados nas normas técnicas construtivas dos cabos (por exemplo, ABNT NBR 7270, ABNT NBR 7271, ABNT NBR 16686 etc.).

7.8 Para cada estado inicial – se for mais que um –, calcular a flecha relativa à força de tração dada para esse estado e para o vão pela Equação (20). Pode ser necessário utilizar também as Equações (17), (18) e (19). Se o valor dessa flecha ultrapassar o valor máximo especificado, o cabo deve ser eliminado como opção, ou uma porcentagem maior da RMC deve ser aceita.

7.9 Para cada estado final – se for mais que um –, calcular a força de tração nesse novo estado, pela Equação (23). O valor dessa força deve ser menor ou igual que a porcentagem da RMC para esse estado, ou o cabo deve ser eliminado como opção, ou, ainda, uma porcentagem maior da RMC deve ser aceita.

NOTA No estado inicial, considerar que a temperatura do cabo tenha o mesmo valor da temperatura ambiente, já que o cabo ainda não transporta corrente, embora possa estar aquecido por, eventualmente, estar exposto ao sol ; nesse caso, sua temperatura pode ser medida e utilizada no estado inicial, na instalação.

Como a temperatura no estado final na Equação (23) refere-se à temperatura do cabo, o valor dessa temperatura deve ser especificado para a temperatura ambiente e velocidade do vento nesse estado. Calcular o novo valor iterativamente, conforme a Seção 5, até que a capacidade de corrente calculada resulte no valor da corrente circulante dada em 7.1-a).

Se o cabo for composto, calcular a temperatura do *knee point* conforme 6.8. Se essa temperatura for menor ou igual à temperatura de operação do cabo em algum estado, devem ser utilizados valores de RMC, módulo de elasticidade e coeficiente de dilatação térmica linear da alma ou núcleo, em vez dos valores para o cabo.

7.10 Com o valor da nova força de tração e, eventualmente, o novo valor da carga p , a flecha no estado final deve ser calculada pela Equação (20) e o valor dessa flecha deve ser menor ou igual ao valor máximo especificado.

7.11 Se houver mais de um estado inicial ou estado final, na combinação em que resultar a maior flecha no estado final, acrescentar o efeito da fluência, conforme 7.12 e 7.13. Se houver somente um estado inicial e um estado final, acrescentar esse efeito da fluência no estado final em 7.9.

7.12 Calcular o equivalente térmico da fluência pela Equação (22), utilizando a carga EDS.

Caso não se disponha da expressão da fluência obtida por ensaio, conforme 7.7-h), ou qualquer outro meio reconhecido, utilizar os valores da Tabela 1 para o equivalente térmico.



Tabela 1 — Equivalente térmico da fluência

Cabo	Equivalente térmico da fluência °C
CA	45
CAA	40
CAA/RA	40
CAL 6201	32
CAL 1120	32
CAAL	43
CALA	36
T-CA (AT1)	45
T-CAA (AT1)	40
T-CA (AT2)	45
T-CAA (AT2)	40
T-CA (AT3)	45
T-CAA (AT3)	40
T-CA (AT4)	45
T-CAA (AT4)	40

7.13 Somar o valor calculado em 7.12 ao valor de θ_2 na Equação (23) e recalculer a flecha conforme 7.9, não podendo ser recalculada a temperatura do *knee point*.



Anexo A (informativo)

Temperatura máxima do condutor

A Tabela A.1 fornece, como exemplo, valores sugeridos para a temperatura máxima do condutor de cabos normalizados e alguns ainda não normalizados no Brasil.

Tabela A.1 — Temperatura máxima do condutor

Cabo	Temperatura máxima em regime permanente °C	Temperatura máxima em regime de emergência °C	Temperatura máxima em regime de curto-circuito °C
CA	75	90	200
CAA	75	90	200
CAA/RA	75	90	200
CAL 6201	75	90	200
CAL 1120	75	90	200
CAAL	75	90	200
CALA	75	90	200
T-CA (AT1)	125	150	230
T-CAA (AT1)	125	150	230
T-CA (AT2)	125	150	230
T-CAA (AT2)	125	150	230
T-CA (AT3)	175	210	280
T-CAA (AT3)	175	210	280
T-CA (AT4)	190	230	400
T-CAA (AT4)	190	230	400
NOTA 1 As especificações dos cabos CA, CAA, CAA/RA, CAL 6201, CAL 1120, CAAL e CALA encontram-se, respectivamente, nas ABNT NBR 7271, ABNT NBR 7270, ABNT NBR 10298, ABNT NBR 10841, ABNT NBR 16686, ABNT NBR 15770 e ABNT NBR 5369. As definições das ligas AT1, AT2, AT3 e AT4 encontram-se na IEC 62641.			
NOTA 2 Outros valores podem ser acordados entre o projetista da linha e o fabricante do cabo.			



Bibliografia

ABNT NBR 5422:1985, *Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica – Procedimento*

ABNT NBR 8449:1984, *Dimensionamento de cabos para-raios para linhas aéreas de transmissão de energia elétrica*

ABNT NBR 10841, *Cabos de alumínio reforçados por fios de aço revestidos de alumínio para linhas aéreas – Especificação*

IEC 60287-1-1, *Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General*

IEC 62641, *Conductors for overhead lines – Aluminium and aluminium alloy wires for concentric lay stranded conductors*

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 738 – *IEEE Standard for calculating the current-temperature of bare overhead conductors*, 2006.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC TR 61597 – *Overhead electrical conductors – Calculation methods for stranded bare conductors*, 2021.

GOVERNO FEDERAL DO BRASIL. *Resolução Normativa ANEEL No 906, de 8 de dezembro de 2020, Anexo II – Cálculo da capacidade operativa de longa duração de linhas aéreas de transmissão*, Ministério de Minas e Energia, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2020.

Labegalini, P. R.; Labegalini, J. A.; Fuchs, R. D.; Almeida, M. T. *Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão*, livro, Editora Edgard Blücher Ltda. – 2a Edição, 1992.

Cigre Task Force B2.12.3. *Sag-tension calculation methods for overhead lines*, Brochure 324, April 2016.

THE ALUMINUM ASSOCIATION, INCORPORATED. *Stress-strain-creep curves for aluminum overhead electrical conductors – a technical report of the Aluminum Association's Electrical Technical Committee*, May 1997