

JOÃO JOSÉ ALVES DE PAULA

Cabos elétricos de potência

Dimensionamento

Blucher

João José Alves de Paula

CABOS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA
Dimensionamento

Cabos elétricos de potência: dimensionamento

© 2023 João José Alves de Paula

Editora Edgard Blücher Ltda.

Publisher Edgard Blücher

Editores Eduardo Blücher e Jonatas Eliakim

Coordenação editorial Andressa Lira

Produção editorial Ariana Corrêa

Preparação de texto Amanda Fabbro

Diagramação Roberta Pereira de Paula

Revisão de texto Maurício Katayama

Capa Leandro Cunha

Imagem da capa iStockphoto

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar

04531-934 – São Paulo – SP – Brasil

Tel.: 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

Segundo o Novo Acordo Ortográfico, conforme 6. ed. do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*, Academia Brasileira de Letras, julho de 2021.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer meios sem autorização escrita da editora.

Todos os direitos reservados pela Editora Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Paula, João José Alves de

Cabos elétricos e de potência : dimensionamento / João José Alves de Paula. – São Paulo : Blucher, 2023.

444 p. : il.

Bibliografia

ISBN 978-65-5506-649-4

1. Cabos elétricos 2. Eletrônica 3. Corrente elétrica
I. Título

23-4180

CDD 537

Índice para catálogo sistemático:

1. Cabos elétricos

CONTEÚDO

INTRODUÇÃO	11
1. CABOS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	15
1.1 Introdução	15
1.2 Cabos isolados	16
1.3 Cabos nus	17
1.4 Elementos constituintes	18
Referências	52
2. RESISTÊNCIA ELÉTRICA	53
2.1 Resistência elétrica em corrente contínua	53
2.2 Resistência em corrente alternada – Efeito pelicular	66
Referências	90
3. DIMENSIONAMENTO DA ESPESSURA DA ISOLAÇÃO	93
3.1 Introdução	93
3.2 Desenvolvimento teórico	94

3.3	Aplicação	96
	Referências	98
4.	RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO DE CONDUTORES ISOLADOS	99
4.1	Definição e cálculo	99
4.2	Variação da resistência de isolamento com a temperatura	102
4.3	Ensaio para a determinação do coeficiente por °C de um material	105
	Referências	106
5.	CURTO-CIRCUITO	107
5.1	Introdução	107
5.2	Curto-circuito no condutor de cabos isolados	109
5.3	Curto-circuito na blindagem de cabos de média e alta tensão isolados	110
5.4	Curto-circuito em linhas aéreas nuas de distribuição e transmissão	123
	Referências	124
6.	CAPACITÂNCIA, REATÂNCIA E SUSCEPTÂNCIA CAPACITIVA	127
6.1	Capacitância de linhas aéreas nuas de transmissão	127
6.2	Capacitância de cabos de média tensão unipolares isolados	140
6.3	Reatância e susceptância capacitiva	143
6.4	Comentários	143
	Referências	145
7.	INDUTÂNCIA E REATÂNCIA INDUTIVA DE SEQUÊNCIAS POSITIVA E NEGATIVA	147
7.1	Conceitos básicos	147
7.2	Indutância interna do condutor sólido	149

7.3	Indutância externa do condutor	151
7.4	Indutância e reatância de linha monofásica	152
7.5	Indutância e reatância de linha trifásica	153
7.6	Indutância de linhas aéreas nuas	155
7.7	Indutância de cabos isolados	167
	Referências	173
8.	QUEDA DE TENSÃO	175
8.1	Circuito trifásico em corrente alternada	175
8.2	Circuito monofásico ou bifásico em corrente alternada	180
8.3	Circuito em corrente contínua	182
8.4	Conclusão	183
9.	TENSÃO-DEFORMAÇÃO (<i>STRESS-STRAIN</i>) E FLUÊNCIA (<i>CREEP</i>) EM CONDUTORES PARA LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO	185
9.1	Introdução	185
9.2	Tensão-deformação (<i>stress-strain</i>)	186
9.3	Fluência (<i>creep</i>)	205
	Referências	217
10.	POTENCIAL INDUZIDO POR LINHAS AÉREAS DE ENERGIA	219
10.1	Introdução	219
10.2	Campo elétrico produzido por um condutor cilíndrico e retilíneo	220
10.3	Diferença de potencial entre um condutor e um ponto no espaço	221
10.4	Diferença de potencial entre o condutor e a terra	221
10.5	Potencial induzido em um ponto do espaço	225
10.6	Cálculo do valor das cargas q_i	230
	Referências	235

11. CAPACIDADE DE CORRENTE DE LINHAS AÉREAS NUAS	237
11.1 Introdução	237
11.2 Regime permanente	237
11.3 Regime não permanente	251
Referências	251
12. CAPACIDADE DE CONDUÇÃO DE CORRENTE DE CONDUTORES ISOLADOS	253
12.1 Conceito	253
12.2 Resistência elétrica em corrente alternada	258
12.3 Perdas dielétricas	258
12.4 Resistência térmica da isolação (T_1)	259
12.5 Resistência térmica das capas e cobertura (T_2, T_3)	261
12.6 Perdas nas proteções metálicas	262
12.7 Resistência térmica externa (T_4)	266
12.8 Exemplos de cálculo – Circuito único	292
12.9 Exemplos de cálculo – Mais que um circuito ou mais que um cabo por fase	317
Referências	348
13. CAPACIDADE DE CONDUÇÃO DE CORRENTE COM FATOR DE CARGA MENOR QUE 100 % (CARGAS VARIÁVEIS OU CÍCLICAS)	351
13.1 Introdução	351
13.2 Fator de carga	352
13.3 Métodos de dimensionamento	355
13.4 Comparação das metodologias	359
13.5 Conclusão	360
Referências	360

14. IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO	363
14.1 Introdução	363
14.2 Componentes simétricas	364
14.3 Características da terra	365
14.4 Cabos isolados	366
14.5 Cabos nus para linhas de transmissão aérea	374
Referências	379
15. DIMENSIONAMENTO DE CABOS NUS PARA LINHAS AÉREAS	381
15.1 Introdução	381
15.2 Dimensionamento elétrico	382
15.3 Dimensionamento mecânico	383
15.4 Procedimento para o dimensionamento do cabo	394
Referências	399
APÊNDICE A – ENSAIOS EM CABOS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	401
A.1 Introdução	401
A.2 Finalidade, características e tipos de ensaios	401
A.3 Ensaios	403
Referências	412
APÊNDICE B – CÁLCULO DAS DIMENSÕES DE CABOS ISOLADOS	415
B.1 Diâmetro do condutor	415
B.2 Diâmetro sobre a isolação	416
B.3 Diâmetro sobre a blindagem metálica	417
B.4 Diâmetro da reunião	418
B.5 Capa interna	420

B.6	Cobertura	420
B.7	Outros elementos	421
	Referência	421
APÊNDICE C – TRANSMISSÃO DE CALOR POR CONDUÇÃO		423
APÊNDICE D – MÓDULO DE ELASTICIDADE E COEFICIENTE DE DILATAÇÃO LINEAR TEÓRICOS DE CABOS COMPOSTOS – DESENVOLVIMENTO DAS EXPRESSÕES		429
	Referências	434
APÊNDICE E – POLINÔMIOS DA ALUMINUM ASSOCIATION [1] CONVERTIDOS PARA O SISTEMA MÉTRICO DECIMAL		435
	Referência	441
SOBRE O AUTOR		443

CAPÍTULO 1

Cabos elétricos de potência

1.1 INTRODUÇÃO

Para que se entenda o dimensionamento dos cabos elétricos, é necessário antes conhecer sua constituição, e este capítulo tratará desse ponto. Entretanto, como em toda esta obra, as construções descritas serão restringidas aos tipos mais usados, deixando de lado aquelas muito raras que, se levadas em consideração, dispersariam muito o foco do assunto.

Pode-se dividir os cabos de potência em cabos isolados e cabos nus. Os cabos nus são muito usados em linhas de distribuição e transmissão aéreas e são constituídos somente pelo condutor, enquanto os cabos isolados têm uma camada extrudada sobre o condutor, podendo ter ou não outros componentes. Os cabos isolados dividem-se em cabos de baixa, média e alta tensão.

Nota: tecnicamente, um cabo isolado é composto por um ou mais condutores isolados e protegidos por outras camadas e, desde já, é oportuno fazer a diferenciação entre “cabo” e “condutor”. O condutor é o elemento que transporta a corrente elétrica; um cabo pode ter um ou mais condutores, podendo até ser composto somente por um condutor, sem qualquer outro elemento constituinte.

1.2 CABOS ISOLADOS

1.2.1 CABOS ISOLADOS DE MÉDIA E ALTA TENSÃO

Basicamente, o que caracteriza um cabo isolado de média e alta tensão é a presença da blindagem metálica. Não é que não existam cabos de baixa tensão blindados, mas os cabos isolados de média e alta tensão sempre devem ser blindados, e a existência da blindagem metálica aterrada é o que define a espessura da isolação, o que não ocorre nos cabos de baixa tensão. Além disso, a blindagem metálica é complementada por blindagens extrudadas chamadas de “semicondutoras” (que não tem nada em comum com o termo “semicondutor” utilizado pela eletrônica).

A construção mais simples e a mais comum dos cabos de média e alta tensão é a representada a seguir.

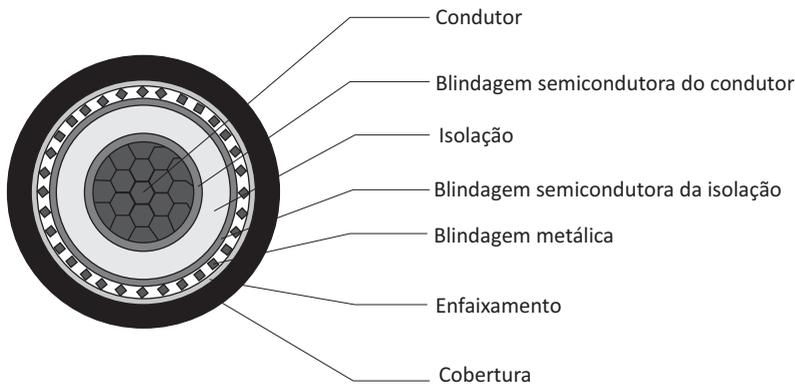


Figura 1.1 – Cabo de média tensão unipolar.

Com essa configuração, o cabo é chamado de “cabo unipolar”, por possuir apenas um condutor. Em baixa tensão, os cabos podem ter de um a cinco condutores. Cabos de controle podem ser formados por dezenas de condutores, mas os cabos de média e alta tensão somente têm um ou três condutores, já que são utilizados em sistemas elétricos trifásicos. Entretanto, o cabo de média ou alta tensão somente terá três condutores quando for economicamente melhor em razão da sua instalação, como sistemas submarinos, mas mesmo nesses encontramos cabos unipolares. Uma construção típica de cabo de média tensão trifásico ou tripolar é dada na figura seguinte:

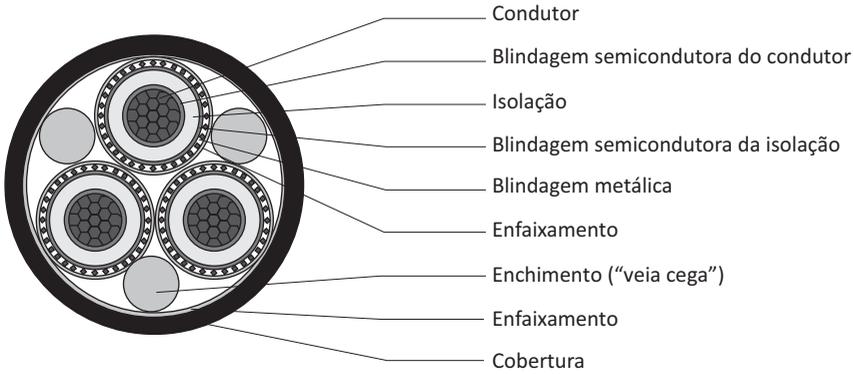


Figura 1.2 – Cabo de média tensão tripolar.

1.2.2 CABOS ISOLADOS DE BAIXA TENSÃO

Existe uma infinidade de construções possíveis de cabos de baixa tensão, entre as quais as mais encontradas são representadas na figura a seguir:

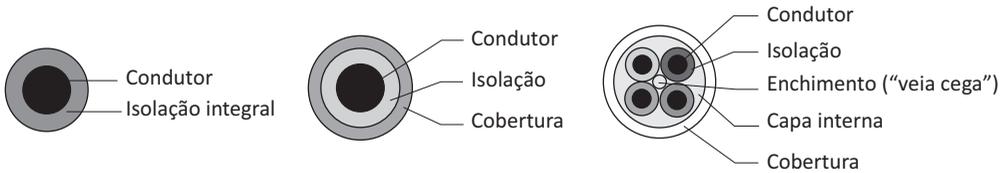


Figura 1.3 – Cabos de baixa tensão.

Quando os cabos não têm cobertura, a isolação possui atribuições de isolação e cobertura, sendo algumas vezes chamada de "isolação integral". Quando necessária para manter a disposição dos condutores, é usada uma "veia cega" central e, para manter um formato cilíndrico, uma capa interna ou enchimento nos interstícios entre as veias isoladas é utilizada.

1.3 CABOS NUS

Um condutor sem qualquer isolação ou cobertura é conhecido como cabo nu; no caso de o condutor não ser estanhado, é chamado de condutor nu (note-se a diferenciação feita entre cabo e condutor). Embora existam cabos de cobre nu para aterramento, os cabos nus são principalmente utilizados em linhas aéreas de transmissão e distribuição de energia elétrica, em que a isolação é o próprio ar que separa os condutores entre si e entre eles e a terra.

Nas linhas aéreas, as características mecânicas dos cabos devem ser levadas em consideração juntamente com as características elétricas, uma vez que esses cabos,

além de conduzir a energia elétrica, têm de resistir aos esforços mecânicos – peso próprio, força do vento, carga de gelo – a que estão sujeitos por estarem instalados entre postes ou torres de transmissão de energia.

O material mais utilizado na construção de cabos nus é o alumínio, por ser mais leve que o cobre, embora tenha uma condutividade menor. Entretanto, para manter a relação necessária entre a resistência mecânica e a elétrica, existem muitas variações:

- AAC (*All Aluminum Conductor*): condutor formado somente por fios de alumínio.
- ACSR (*Aluminum Conductor Steel Reinforced*): esse condutor tem fios de alumínio encordoados em torno de uma alma, composta por um fio ou por vários fios de aço.
- AAAC (*All Aluminum Alloy Conductor*): condutor formado totalmente por fios de alumínio-liga. A liga de alumínio mais comum é a 6201 (muito parecida com a antiga liga *Aldrey*), de alumínio, magnésio e silício, mas existem outras, com pequenas variações na resistência mecânica e elétrica.
- AACSR (*Aluminum Alloy Conductor Steel Reinforced*): nesse tipo de condutor, fios de alumínio-liga 6201 são reunidos em torno de uma alma formada por um ou vários fios de aço.
- ACAR (*Aluminum Conductor Alloy Reinforced*): condutor formado por fios de alumínio encordoados em torno de uma alma composta por fios de alumínio-liga 6201.

Existem outras construções bastante incomuns e muitas variações dentro dessas construções citadas. Por exemplo, os fios podem ser cilíndricos, a construção mais comum, mas também podem ser trapezoidais ou uma mistura dos dois; a alma de aço pode ser também composta por fios de aço-alumínio, ou seja, fios de aço recobertos por alumínio; podem ser utilizadas ligas termicamente especiais; e assim por diante.

1.4 ELEMENTOS CONSTITUINTES

1.4.1 CONDUTOR

A função de um cabo de potência é transmitir energia elétrica de um ponto a outro e, basicamente, quem realiza essa tarefa é o condutor. É verdade que, às vezes, outro elemento construtivo auxilia nessa função, mas, em geral, os outros elementos servem para proteger o condutor. Além dos condutores chamados “principais”, os cabos podem ter outros, tais como blindagens, armações e condutores concêntricos, mas o termo “condutor” usualmente aplica-se à parte central da seção transversal do cabo.

O principal parâmetro para a escolha do material do condutor é a sua resistividade ou condutividade elétrica. O material escolhido inicialmente foi o cobre, que, entre os

metais, possui resistividade somente maior que a da prata e ainda é dúctil e maleável. Entretanto, em 1946, o preço da tonelada de cobre ultrapassou o preço do alumínio pela primeira vez e continuou subindo, enquanto o custo do alumínio manteve-se razoavelmente estável. Com isso, passou a ser interessante o uso do alumínio, o quarto melhor metal em termos de condutividade, somente atrás da prata, cobre e ouro.

O condutor deve ser metálico e formado por materiais específicos, usando-se o cobre ou o alumínio. Cabos especiais podem ter condutores de bronze, prata etc., mas o cobre e o alumínio constituem a quase totalidade dos condutores elétricos: a escolha entre esses materiais dá-se tanto por razões técnicas, em função das características mecânicas e elétricas de cada um, como por razões econômicas. Das razões técnicas, a mais importante é a resistência elétrica.

Uma característica intrínseca ao condutor é a resistividade elétrica do material que o compõe, que depende, basicamente, do número de elétrons livres por unidade de volume de material e da mobilidade desses elétrons no material. Seus valores padronizados para o cobre e alumínio são:

$$\rho_{\text{cobre}} = 17,241 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km a } 20^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{alumínio}} = 28,264 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km a } 20^\circ\text{C}$$

A resistividade, combinada com o diâmetro e comprimento do condutor, define a resistência elétrica desse condutor:

$$R = \frac{\rho \cdot \ell}{S} \quad (1.1)$$

R = resistência elétrica, Ω

ℓ = comprimento do condutor, km

S = área da seção transversal do condutor, mm^2

Usa-se o comprimento de 1 km ou 1 m e a resistência em Ω/km ou Ω/m .

Essa resistência dificulta a circulação da corrente elétrica e causa perdas significativas de energia em cabos de potência, gerando calor por efeito Joule, sendo essa potência perdida definida pelo produto da resistência elétrica pelo quadrado da corrente.

Dessa forma, escolhido o material está definida a resistividade elétrica, sendo o comprimento definido pela distância entre os dois pontos a serem conectados e o caminhamento dado. Pode-se somente escolher a área da seção transversal do condutor.

Alguns condutores de cobre têm seus fios revestidos por estanho, tanto por razões técnicas (por exemplo, por incompatibilidade do cobre com o material da cobertura ou isolamento), como por costume de se utilizar condutores estanhados, quando os motivos técnicos deixaram de existir.

Entretanto, o cobre, quando exposto ao ar, oxida-se. Além da formação de óxido de cobre, também há a formação de carbonatos, formando a pátina. A oxidação ocorre rapidamente, escurecendo o cobre, tirando-lhe o brilho; a pátina leva mais tempo para ser observada, deixando o cobre esverdeado. Há uma certa discussão sobre a condutividade do óxido de cobre e a do próprio cobre, mas deve-se convir que sempre se quer usar um condutor de cobre somente e não uma combinação de cobre, óxido de cobre e/ou pátina.

A oxidação é acelerada pela umidade e temperatura mais elevadas e, uma vez ocorrida, o óxido protege o cobre no interior, aderindo firmemente a ele e evitando seu contato com o oxigênio, cessando a oxidação (não é como a oxidação do ferro, que descama e deixa mais ferro exposto).

Uma justificativa para a estanhagem dos condutores é justamente evitar a oxidação do cobre; por isso, e pela oxidação ser acelerada em altas temperaturas, é mais utilizada em condutores que devam operar em temperaturas mais elevadas.

O cobre enquanto isolado não oxida, pois sua isolamento não permite contato com o ar; somente quando se retira a isolamento de uma ponta do cabo para fazer uma conexão é que o processo de oxidação se inicia. Entretanto, conectorizando-se o cabo em seguida, não há tempo para uma oxidação significativa e a compressão do conector não permitiria mais a existência de ar, ao menos no contato, que é o que importa. Claro que, se a conectorização for feita horas depois da retirada da isolamento, ocorrerá mais oxidação, por exemplo, em certas linhas de montagem.

Existe ainda um outro fator nessa equação. Se o condutor for sólido, sua conectorização imediata após a retirada da isolamento praticamente elimina a possibilidade de oxidação no contato, ocorrendo também com condutores compactados. Entretanto, muitos condutores são compostos por inúmeros fios, que dividem a corrente e a conduzem em paralelo. Se alguns fios não tiverem uma compressão suficiente com seus vizinhos, poderão estar em contato com uma película de ar e oxidar-se, aumentando a resistência elétrica no contato e, conseqüentemente, a temperatura nesse ponto. Um leve lixamento do condutor retira a camada de óxido, caso esta tenha se formado, mas isso é mais difícil de ser feito em um condutor multifilar, fio a fio.

O custo de um cabo com condutor estanhado é quase o mesmo de um não estanhado, então por que não estanhar todos os condutores? Ocorre que, nas normas brasileiras e na norma internacional IEC (*International Electrotechnical Commission*), o que define a seção do condutor não é sua seção geométrica, mas sua resistência elétrica máxima em corrente contínua na temperatura de 20 °C e, embora a estanhagem pouco influencie na resistência elétrica, a resistência elétrica máxima especificada para o condutor estanhado é um pouco maior que o valor especificado para o condutor não estanhado. Se o diâmetro do condutor de cobre não estanhado fosse o mesmo no condutor estanhado, a resistência elétrica do conjunto seria sempre menor quando estanhado, mas, cumprindo o requisito da norma, o fabricante pode até utilizar menos cobre para atingir a resistência elétrica máxima de um condutor estanhado, que, tendo maior resistência elétrica, possui menor capacidade de condução de corrente que um condutor não estanhado. A estanhagem pode ser feita por imersão ou por

eletrodeposição, mas, em qualquer caso, não é utilizado estanho puro e o banho causa danos ao meio ambiente, devendo haver uma estação de tratamento; por isso, existem poucos fabricantes de fios estanhados no mercado; geralmente a operação não é realizada pelo fabricante do cabo.

1.4.1.1 Escala AWG/kcmil

No início da utilização da energia elétrica foram padronizadas algumas seções em várias escalas semelhantes, sobressaindo-se a escala conhecida como AWG (*American Wire Gauge*).

Essa escala vai de zero a 36 AWG e, quanto maior a “bitola AWG”,¹ menor o diâmetro e, conseqüentemente, a área da seção transversal do condutor. Zero AWG corresponde a um diâmetro de 8,252 mm e 36 AWG corresponde a um diâmetro de 0,127 mm. Sendo uma escala inversa, quando foram necessários maiores diâmetros, criaram-se mais três bitolas: 00 AWG ou 2/0 AWG; 000 AWG ou 3/0 AWG; e 0000 AWG ou 4/0 AWG e a bitola zero AWG passou a ser chamada de 1/0 AWG. O diâmetro da maior bitola, 4/0 AWG, é 11,684 mm.

Na verdade, os diâmetros dos condutores são medidos em milésimos de polegada (*mils*). Assim, a bitola 4/0 AWG tem um diâmetro de 460 mils e a bitola 36 AWG tem um diâmetro de 5 mils.

A escala AWG é uma progressão geométrica e os diâmetros das bitolas intermediárias entre o 4/0 e o 36 AWG podem ser determinados usando-se a razão:

$$r = \left(\frac{a_n}{a_1} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (1.2)$$

com $a_1 = 460$ mils, $a_n = 5$ mils e $n = 40$ (4 termos para 1/0, 2/0, 3/0 e 4/0 AWG, mais 36 termos entre o 1 e o 36 AWG).

Assim, a razão é $r = 0,89052571$ e os diâmetros são calculados por:

$$d_n = d_{4/0} \cdot r^{(n-1)} \quad (1.3)$$

Exemplos:

4/0 AWG – $n = 1$ – $d_{4/0} = 460$ mils (11,684 mm)

3/0 AWG – $n = 2$ – $d_{3/0} = 409,6$ mils (10,404 mm)

2/0 AWG – $n = 3$ – $d_{2/0} = 364,8$ mils (9,266 mm)

¹ A “área da seção transversal” do condutor é chamada somente “seção”; “bitola” seria o diâmetro do condutor. No Brasil, conforme as normas da ABNT, utiliza-se “seção”.

$$1/0 \text{ AWG} - n = 4 - d_{1/0} = 324,9 \text{ mils (8,252 mm)}$$

$$1 \text{ AWG} - n = 5 - d_1 = 289,3 \text{ mils (7,348 mm)}$$

$$2 \text{ AWG} - n = 6 - d_2 = 257,6 \text{ mils (6,543 mm)}$$

Posteriormente, diâmetros menores do que o equivalente ao 36 AWG surgiram, o que não causou problemas, pois simplesmente criaram-se as bitolas 37 AWG, 38 AWG etc.

Entretanto, com a necessidade de diâmetros maiores, em vez de acrescentar mais “zeros”, foi criada outra escala, chamada originalmente de MCM (Mil Circular Mil), atualmente renomeada para kcmil. Um circular mil (1 CM) é a área de um círculo cujo diâmetro é de um milésimo de polegada. Portanto:

$$1 \text{ CM} - d = 0,0254 \text{ mm} - S = 0,000507 \text{ mm}^2$$

ou

$$1 \text{ CM} - d = 0,001 \text{ pol} - S = 0,7854 \times 10^{-6} \text{ pol}^2$$

Como o CM é muito pequeno, usa-se o MCM, mil vezes maior, para bitolas maiores que 4/0 AWG, no que ficou conhecido como “escala AWG/MCM”, atualmente “escala AWG/kcmil”. As bitolas, ou seções, padronizadas nessa escala são:

Tabela 1.1 – Escala AWG/kcmil

AWG	mm ²	AWG	mm ²	kcmil	mm ²
40	0,0050	18	0,82	250	127
39	0,0062	17	1,04	300	152
38	0,0082	16	1,31	350	177
37	0,010	15	1,65	400	203
36	0,013	14	2,08	450	228
35	0,016	13	2,63	500	253
36	0,020	12	3,31	550	279
33	0,025	11	4,17	600	304
32	0,032	10	5,26	650	329
31	0,040	9	6,63	700	355

(continua)

Tabela 1.1 – Escala AWG/kcmil (continuação)

AWG	mm ²	AWG	mm ²	kcmil	mm ²
30	0,051	8	8,37	750	380
29	0,065	7	10,55	800	405
28	0,080	6	13,30	900	456
27	0,102	5	16,76	1000	507
26	0,128	4	21,15	1100	557
25	0,163	3	26,67	1200	608
24	0,20	2	33,68	1250	633
23	0,26	1	42,41	1300	659
22	0,32	1/0	53,48	1400	709
21	0,41	2/0	67,43	1500	760
20	0,52	3/0	85,01	1600	811
19	0,65	4/0	107,22	1700	861
				1750	887
				1800	912
				1900	963
				2000	1010

1.4.1.2 Escala milimétrica

A escala milimétrica foi criada a partir da série Renard R5. Essa série define números preferenciais pela expressão:

$$\left(\sqrt[5]{10}\right)^0, \left(\sqrt[5]{10}\right)^1, \left(\sqrt[5]{10}\right)^2, \left(\sqrt[5]{10}\right)^3, \left(\sqrt[5]{10}\right)^4, \left(\sqrt[5]{10}\right)^5, \left(\sqrt[5]{10}\right)^6, \left(\sqrt[5]{10}\right)^7, \left(\sqrt[5]{10}\right)^8$$

ou seja:

$$\dots - 1,00 - 1,58 - 2,51 - 3,98 - 6,31 - 10,00 - 15,85 - 25,12 - 39,81 - \dots$$

que, com alguns ajustes, gerou as seções padronizadas.

Adotada pela IEC há décadas e pelo Brasil a partir dos anos de 1980, a escala milimétrica substituiu a escala AWG/kcmil na maioria dos países para uma ampla gama de linhas de produtos.

Em cabos nus de alumínio ainda se usa a escala AWG/kcmil em grande parte do mundo. Nos Estados Unidos, usa-se essa escala para todas as aplicações, não tendo sido adotada a escala milimétrica e sem indicações de que será utilizada algum dia.

A escala milimétrica tem duas características principais. A primeira é a padronização das seções em milímetros quadrados:

0,5 mm² – 0,75 mm² – 1 mm² – 1,5 mm² – 2,5 mm² – 4 mm² – 6 mm² – 10 mm² – 16 mm² – 25 mm² – 35 mm² – 50 mm² – 70 mm² – 95 mm² – 120 mm² – 150 mm² – 185 mm² – 240 mm² – 300 mm² – 400 mm² – 500 mm² – 630 mm² – 800 mm² – 1000 mm² – 1200 mm² – 1400 mm² – 1600 mm² – 1800 mm² – 2000 mm² – 2500 mm²

A segunda característica é que a seção não é definida pela área da seção transversal em si, mas pela resistência elétrica máxima. Um valor de resistência é definido para cada seção e, atendendo a esse valor, a seção geométrica pode ser menor que o valor nominal; por exemplo, é muito comum um condutor de seção nominal 50 mm² ter uma seção geométrica de 47 mm².

Na escala AWG/kcmil, além da resistência elétrica, é preciso cumprir também as especificações de diâmetro, com tolerâncias bastante rígidas.

Além disso, é notável a diferença de quantidade de seções disponíveis nas escalas AWG/kcmil e milimétrica. Por exemplo, entre as bitolas 16 AWG (1,31 mm²) e 1/0 AWG (53,48 mm²) existem 17 bitolas, incluindo a 16 AWG e 1/0 AWG, enquanto entre as seções milimétricas 1,5 mm² e 50 mm² existem 9 seções, incluindo a de 1,5 mm² e 50 mm².

1.4.1.3 Ligas e têmperas

O cobre utilizado na fabricação de condutores elétricos tem três têmperas: cobre mole, meio-duro e duro, diferenciadas pelas suas características de alongamento e carga de ruptura, conforme pode ser verificado, por exemplo, na norma ABNT NBR 5111[1]. Na fabricação de condutores isolados, utiliza-se o cobre mole, enquanto para aplicações nas quais o condutor deve ter mais resistência à tração utiliza-se a têmpera meio-duro ou dura. Sua composição é assumida como sendo a do cobre puro, pois tem quase 100 % de pureza.

A fabricação de condutores elétricos de cobre se inicia pela trefilação do vergalhão com 8 mm de diâmetro, às vezes, de maior diâmetro para usos específicos. Na trefilação, o vergalhão é estirado, aumentando o comprimento enquanto seu diâmetro diminui, e isso, muitas vezes, é suficiente para alterar a têmpera do metal. Outras vezes, a alteração da têmpera se dá por recozimento (tratamento térmico) logo após a trefila. Assim, o vergalhão de cobre duro na entrada do processo resulta em fios de cobre mole no final.

Quanto ao alumínio, pode-se dizer que existem duas especificações: a liga e a temperatura. A liga nos diz que componentes foram adicionados ao alumínio para fornecer-lhe uma característica desejada, em geral maior resistência à tração ou condutividade – normalmente, o aumento de uma causa a diminuição da outra característica. Algumas ligas podem ser tratadas para ter uma maior ou menor carga de ruptura, ou dureza (por isso, a temperatura é normalmente iniciada pela letra “H” – H14, H16, H19 –, do inglês *hardness*).

O que mais se encontra em condutores elétricos são:

- liga 1350, nas temperaturas H14, H16 ou H19, chamada simplesmente de “alumínio”;
- liga 6201, a antiga “liga Aldrey”.

A liga 1350 era chamada anteriormente de “alumínio EC”, sendo que o “EC” significava *electrical conductor*, ou seja, é o alumínio utilizado em condutores elétricos. A temperatura H16 tem carga de ruptura de 10 a 15 % maior que a temperatura H14 e a temperatura H19 tem carga de ruptura cerca de 50 % maior que a temperatura H16. A condutividade dessa liga 1350 é de 61,2 % IACS,² em média. No Brasil, os fios de alumínio para cabos isolados, antes do encordoamento, têm uma carga de ruptura mínima de 105 MPa. Quando se diz que um condutor é feito de alumínio sem citar a liga, supõe-se que seja o alumínio 1350.

A liga 6201 tem uma resistência à tração maior que a liga 1350, com prejuízo da condutividade:

Tabela 1.2 – Condutividade e carga de ruptura das ligas 1350 e 6201

Liga	Condutividade (% IACS)	Carga de ruptura (MPa)
1350	61,2	165
6201	52,5	315

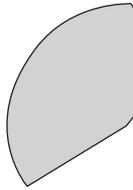
1.4.1.4 Tipos e formações de condutores

O condutor mais simples é somente um fio de seção circular e formato cilíndrico, sólido, e sua fabricação e utilização têm limites de diâmetro mínimo e máximo. Fios muito finos são muito frágeis e a trefilação de diâmetros menores que 0,1 mm é bastante difícil e incomum, sendo esses pequenos diâmetros utilizados somente para circuitos específicos ou para enrolamento de pequenos motores. Fios muito grossos não são úteis por não terem flexibilidade suficiente para serem instalados e o limite superior

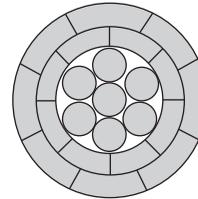
² Ver definição de “IACS” no Capítulo 2.

para o diâmetro é, em geral, entre 4 e 5 mm. Para uma mesma seção, quanto mais fios finos forem usados juntos para formar um condutor, mais flexível será esse condutor. Os fios são torcidos entre si, em camadas concêntricas ou em feixes.

Isso quando se trata de condutores de seção circular, com fios circulares. Existem outros tipos de condutores: fios retangulares, fios trapezoidais e fios em formato de “Z”, torcidos; condutores setoriais ou ovais e muitos outros, todos para aplicações muito especiais:



Seção transversal de condutor setorial



Seção transversal de condutor trapezoidal

Figura 1.4 – Exemplos de seções dos fios e condutores não cilíndricos.

Este texto focará somente os condutores mais usuais, aqueles de seção circular. A flexibilidade desses condutores é definida em classes: para uso em condutores isolados, na escala AWG/kcmil, em níveis crescentes de flexibilidade, existem as classes A, B, C, D, G, H, I, K e M, além dos condutores sólidos e de outras classes menos utilizadas; na escala milimétrica, para a mesma aplicação, existem as classes 1 (condutor sólido), 2, 5 e 6, em graus crescentes de flexibilidade. Como exemplo, a Tabela 1.3 apresenta formações de condutores possíveis de serem utilizadas, para a bitola 1/0 AWG e para a seção 10 mm².

Na escala AWG/kcmil, o número de fios, formações e diâmetro dos fios são detalhadamente especificados, de forma que um condutor de determinada bitola terá sempre a mesma constituição, independentemente de onde tenha sido fabricado. Já os condutores milimétricos têm especificados sua resistência elétrica máxima, diâmetro máximo dos fios e o diâmetro máximo do condutor, dando margem a diferentes formações.

As formações concêntricas são aquelas com 7, 19, 37, 61, 91 ou 127 fios. Algumas formações concêntricas também podem ser feitas com fios de diâmetros ligeiramente diferentes, de forma que o número de fios final seja ligeiramente diferente desses – por exemplo, em vez de uma formação de 61 fios, pode ser feita uma formação com 59 fios.

A classe B e a classe 2 têm dois tipos de formação: a normal ou não compactada – com os fios simplesmente torcidos entre si –, e a compactada. A formação compactada é feita passando-se cada camada do condutor por uma fieira que provoca um pequeno esmagamento dessa camada. Com isso, os fios deixam de ser exatamente circulares, os espaços vazios entre os fios (chamados de “interstícios”) diminuem, bem como o diâmetro final do condutor, ficando o condutor com uma seção transversal de formato circular mais definido. Os condutores também podem sofrer uma pequena compressão,

que não chega a compactá-los, quando são chamados de condutores comprimidos (*compressed stranded*), mas essa construção não é comum no Brasil.

Tabela 1.3 – Classes dos condutores

1/0 AWG		10 mm ²		
Sólido	1/8,252	Classe 1	1/3,50	
Classe A	7/3,12	Classe 2	Normal	7/1,35
Classe B	Normal		19/1,89	Compacto
	Compacto	19 fios	Classe 5	7 x 15/0,35
Classe C	37/1,36	Classe 6	12 x 27/0,20	
Classe D	61/1,06			
Classe G	19 x 7/0,72			
Classe H	37 x 7/0,51			
Classe I	19 x 14/0,511			
Classe K	19 x 56/0,254			
Classe M	7 x 7 x 54/0,16			

Já as formações flexíveis são formadas por um ou mais feixes de fios relativamente finos. Os feixes são reunidos sem uma predisposição a serem concêntricos, mas a reunião dos feixes pode ser feita concêntricamente, de forma que cada feixe representa um condutor. Em oposição às formações flexíveis – classes G a M ou classes 5 e 6 –, as demais formações são chamadas de formações rígidas.

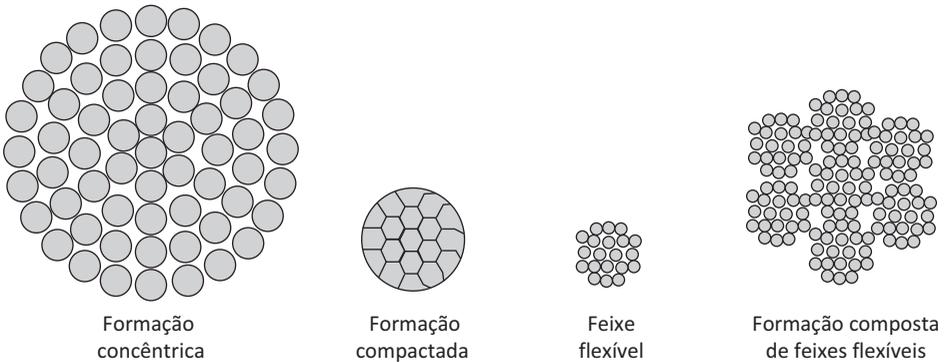


Figura 1.5 – Exemplos de formações de condutores.

A formação mais normal é a concêntrica. A formação compactada provoca a redução do diâmetro do condutor (de 9 a 11 % de redução no diâmetro do condutor). A compactação, reduzindo o diâmetro dos fios, reduz de certa forma a resistência à tração do cabo. A formação flexível é útil no condutor dos cabos isolados que devem ser instalados em locais confinados, como painéis, automóveis ou outras máquinas, mas tem sido cada vez mais utilizada no Brasil em instalações fixas, como nas prediais.

Até o momento, a quase totalidade dos cabos flexíveis é feita de cobre. A característica dos cabos flexíveis é serem formados por fios finos e o alumínio normalmente utilizado não resiste a constantes dobramentos e alonga-se facilmente durante a fabricação de fios com diâmetros menores que 1 mm.

Assim, os cabos isolados têm condutores de cobre sólido ou de formações concêntrica normal, compactada ou flexível. Os cabos isolados com condutores de alumínio têm formação concêntrica ou compactada.

As redes aéreas são constituídas por cabos de alumínio, já que são mais leves e seu menor peso causa menores esforços nos postes e torres. Nessa aplicação, onde o cabo fica sob tensão constante durante toda sua vida útil, a formação compactada não é indicada e a formação flexível não tem razão de ser utilizada, até porque não é utilizada com fios de alumínio.

Sobram, então, para as redes aéreas, os condutores de alumínio sólido ou de formação concêntrica normal. As formações concêntricas foram padronizadas há décadas pela Aluminum Association e pela ASTM (*American Standards for Testing and Materials*) na escala AWG/kcmil. A IEC também padronizou esses cabos, mas o uso dessa última padronização ficou restrito à Europa.

Muitas redes aéreas necessitam de uma resistência mecânica que não pode ser fornecida somente pelo alumínio. O uso de condutores com seção maior do que o necessário por razões elétricas não é economicamente viável e existe um fenômeno – efeito pelicular – que faz com que a resistência elétrica nos fios centrais seja maior que nos fios mais periféricos e, portanto, circule mais corrente nos fios periféricos.

A combinação desses fatores provocou o nascimento dos cabos condutores com elementos centrais de fios ou cordas de aço, em torno dos quais são torcidos os fios de alumínio (ACSR), surgindo a necessidade de, contrariamente aos condutores para os cabos isolados, divididos em classes, os condutores para uso aéreo receberem nomes particulares:

Tabela 1.4 – ACSR

Condutor	Bitola (AWG ou kcmil)	Seção Transversal (mm ²)				Formação do condutor				Diâmetro nominal (mm)			Peso nominal (kg/km)				
		Alumínio		Total	Alumínio		Nº de fios	Aço		Alma de aço	Total	Alumínio	Aço	Total	Alumínio	Aço	Total
		Nº de fios	Diâmetro (mm)		Nº de fios	Diâmetro (mm)											
Turkey	6	13,28	1,679	15,5	6	1,679	1	1,679	1,68	5,04	36,4	17,2	53,7				
Thrush	5	16,78	1,887	19,6	6	1,887	1	1,887	1,89	5,66	46,0	21,8	67,8				
Swan	4	21,14	2,118	24,7	6	2,118	1	2,118	2,12	6,35	58,0	27,4	85,4				
Swallow	3	26,69	2,380	31,1	6	2,380	1	2,380	2,38	7,14	73,2	34,6	107,8				
Sparrow	2	33,64	2,672	39,3	6	2,672	1	2,672	2,67	8,02	92,3	43,6	135,9				
Robin	1	42,41	3,000	49,5	6	3,000	1	3,000	3,00	9,00	116,4	55,0	171,4				
Raven	1/0	53,55	3,371	62,5	6	3,371	1	3,371	3,37	10,11	146,9	69,4	216,4				
Quail	2/0	67,40	3,782	78,6	6	3,782	1	3,782	3,78	11,35	184,9	87,4	272,3				
Pigeon	3/0	85,00	4,247	99,2	6	4,247	1	4,247	4,25	12,74	233,2	110,2	343,4				
Penguin	4/0	107,22	4,770	125,1	6	4,770	1	4,770	4,77	14,31	294,2	139,0	433,2				
Waxwing	266,8	135,07	3,091	142,6	18	3,091	1	3,091	3,09	15,46	372,4	58,4	430,8				
Owl	266,8	135,18	5,356	152,7	6	5,356	7	1,786	5,36	16,07	370,9	137,0	507,9				
Partridge	266,8	135,19	2,573	157,2	26	2,573	7	2,002	6,01	16,30	374,6	172,1	546,7				

(continua)

Tabela 1.4 – ACSR (continuação)

Condutor	Bitola (AWG ou kcmil)	Seção Transversal (mm ²)		Formação do condutor				Diâmetro nominal (mm)		Peso nominal (kg/km)	
		Alumínio	Total	Alumínio		Aço		Total	Alumínio	Aço	Total
				Nº de fios	Diâmetro (mm)	Nº de fios	Diâmetro (mm)				
Ostrich	300,0	151,97	176,7	26	2,728	7	2,121	6,36	421,0	193,2	614,2
Merlin	336,4	170,42	179,9	18	3,472	1	3,472	3,47	469,9	73,7	543,5
Linnet	336,4	170,32	198,0	26	2,888	7	2,245	6,74	471,9	216,4	688,3
Oriole	336,4	170,50	210,3	30	2,690	7	2,690	8,07	473,5	310,7	784,3
Chickadee	397,5	201,36	212,5	18	3,774	1	3,774	3,77	555,2	87,0	642,2
Brant	397,5	201,43	227,5	24	3,269	7	2,179	6,54	558,1	203,9	762,0
Ibis	397,5	201,21	234,0	26	3,139	7	2,441	7,32	557,5	255,9	813,3
Lark	397,5	201,45	248,5	30	2,924	7	2,924	8,77	559,5	367,2	926,7
Pelican	477,0	241,72	255,1	18	4,135	1	4,135	4,14	666,4	104,5	770,9
Flicker	477,0	241,72	273,1	24	3,581	7	2,388	7,16	669,7	244,9	914,6
Hawk	477,0	241,51	280,8	26	3,439	7	2,675	8,03	669,1	307,3	976,4
Hen	477,0	241,73	298,1	30	3,203	7	3,203	9,61	671,4	440,6	1111,9
Osprey	556,5	281,84	297,5	18	4,465	1	4,465	4,47	777,1	121,8	898,9

(continua)

Tabela 1.4 – ACSR (continuação)

Conductor	Bitola (AWG ou kcmil)	Seção Transversal (mm ²)				Formação do condutor				Diâmetro nominal (mm)		Peso nominal (kg/km)		
		Alumínio		Total	Alumínio		Aço	Alumínio		Total	Alumínio		Aço	Total
		Nº de fios	Diâmetro (mm)	Nº de fios	Diâmetro (mm)	Nº de fios	Diâmetro (mm)	Alma de aço	Total	Alumínio	Aço	Total	Alumínio	Aço
Parakeet	556,5	282,02	3,868	24	3,868	7	2,578	7,73	23,21	781,3	285,4	1066,8		
Dove	556,5	281,98	3,716	26	3,716	7	2,891	8,67	23,54	781,2	358,9	1140,2		
Eagle	556,5	281,91	3,459	30	3,459	7	3,459	10,38	24,21	783,0	513,8	1296,8		
Peacock	605,0	306,74	4,034	24	4,034	7	2,690	8,07	24,21	849,9	310,7	1160,6		
Squab	605,0	306,47	3,874	26	3,874	7	3,012	9,04	24,53	849,1	389,6	1238,7		
Wood Duck	605,0	306,55	3,607	30	3,607	7	3,607	10,82	25,25	851,4	558,7	1410,1		
Teal	605,0	306,55	3,607	30	3,607	19	2,164	10,82	25,25	851,4	546,9	1398,3		
Duck	605,0	306,67	2,689	54	2,689	7	2,689	8,07	24,20	849,6	310,5	1160,1		
Kingbird	636,0	322,34	4,775	18	4,775	1	4,775	4,78	23,88	888,7	139,3	1028,0		
Swift	636,0	322,25	3,376	36	3,376	1	3,376	3,38	23,63	888,5	69,6	958,1		
Rook	636,0	322,29	4,135	24	4,135	7	2,756	8,27	24,81	892,9	326,2	1219,1		
Grosbeak	636,0	322,33	3,973	26	3,973	7	3,089	9,27	25,16	893,0	409,8	1302,8		
Scoter	636,0	322,21	3,698	30	3,698	7	3,698	11,09	25,89	894,9	587,3	1482,2		

(continua)

Tabela 1.4 – ACSR (continuação)

Condutor	Bitola (AWG ou kcmil)	Seção Transversal (mm ²)		Formação do condutor				Diâmetro nominal (mm)		Peso nominal (kg/km)		
		Alumínio	Total	Alumínio		Aço		Total	Alma de aço	Alumínio	Aço	Total
				Nº de fios	Diâmetro (mm)	Nº de fios	Diâmetro (mm)					
Egret	636,0	322,21	395,8	30	3,698	19	2,220	11,10	894,9	575,6	1470,5	
Goose	636,0	322,14	363,9	54	2,756	7	2,756	8,27	892,5	326,2	1218,7	
Flamingo	666,6	337,91	381,7	24	4,234	7	2,822	8,47	936,2	342,0	1278,2	
Gannet	666,6	337,76	392,7	26	4,067	7	3,162	9,49	935,8	429,4	1365,2	
Stilt	715,5	362,77	409,8	24	4,387	7	2,924	8,77	1005,1	367,2	1372,3	
Starling	715,5	362,62	421,7	26	4,214	7	3,277	9,83	1004,7	461,2	1465,8	
Redwing	715,5	362,43	445,0	30	3,922	19	2,352	11,76	1006,6	646,1	1652,7	
Coot	795,0	402,71	413,9	36	3,774	1	3,774	3,77	110,3	87,0	1197,3	
Cuckoo	795,0	402,86	455,0	24	4,623	7	3,081	9,24	1116,1	407,6	1523,8	
Drake	795,0	402,92	468,5	26	4,442	7	3,454	10,36	1116,3	512,3	1628,6	
Mallard	795,0	402,87	494,8	30	4,135	19	2,482	12,41	1118,9	719,5	1838,4	
Tern	795,0	402,82	430,6	45	3,376	7	2,250	6,75	1116,0	217,4	1333,4	
Condor	795,0	402,59	454,8	54	3,081	7	3,081	9,24	1115,4	407,6	1523,1	

(continua)

Tabela 1.4 – ACSR (continuação)

Condutor	Bitola (AWG ou kcmil)	Seção Transversal (mm ²)				Formação do condutor				Diâmetro nominal (mm)		Peso nominal (kg/km)	
		Alumínio		Total	Alumínio		Aço		Alma de aço	Total	Alumínio	Aço	Total
		Nº de fios	Diâmetro (mm)	Nº de fios	Diâmetro (mm)	Nº de fios	Diâmetro (mm)						
Ruddy	900,0	456,01	487,5	45	3,592	7	2,395	7,19	28,74	1263,4	246,3	1509,7	
Canary	900,0	456,00	515,1	54	3,279	7	3,279	9,84	29,51	1263,4	461,7	1725,1	
Rail	954,0	483,32	516,8	45	3,698	7	2,466	7,40	29,59	1339,1	261,1	1600,2	
Cardinal	954,0	483,38	546,0	54	3,376	7	3,376	10,13	30,38	1339,2	489,4	1828,7	
Ortolan	1.033,5	523,33	559,5	45	3,848	7	2,565	7,70	30,78	1449,9	292,5	1732,4	
Curlew	1.033,5	523,41	591,3	54	3,513	7	3,513	10,54	31,62	1450,1	530,0	1980,1	
Bluejay	1.113,0	564,07	603,1	45	3,995	7	2,664	7,99	31,96	1562,8	304,8	1867,6	
Finch	1.113,0	564,10	635,6	54	3,647	19	2,189	10,95	32,83	1570,5	559,6	2130,1	
Bunting	1.192,5	604,30	646,1	45	4,135	7	2,756	8,27	33,08	1674,3	326,2	2000,5	
Grackle	1.192,5	604,07	680,7	54	3,774	19	2,266	11,33	33,97	1681,8	599,7	2281,5	
Bittern	1.272,0	644,40	689,0	45	4,270	7	2,847	8,54	34,16	1785,4	348,1	2133,4	
Pheasant	1.272,0	644,75	726,4	54	3,899	19	2,339	11,70	35,09	1795,0	639,0	2434,0	
Dipper	1.351,0	684,86	732,2	45	4,402	7	2,934	8,80	35,21	1897,5	369,7	2267,2	

(continua)

Tabela 1.4 – ACSR (continuação)

Conductor	Bitola (AWG ou kcmil)	Seção Transversal (mm ²)		Formação do condutor				Diâmetro nominal (mm)		Peso nominal (kg/km)	
		Alumínio	Total	Alumínio		Aço		Total	Alumínio	Aço	Total
				Nº de fios	Diâmetro (mm)	Nº de fios	Diâmetro (mm)				
Martin	1.351,0	684,71	771,4	54	4,018	19	2,410	12,05	1906,3	678,4	2584,6
Bobolink	1.431,0	724,95	775,1	45	4,529	7	3,020	9,06	2008,5	391,7	2400,2
Plover	1.431,0	725,16	817,1	54	4,135	19	2,482	12,41	2018,9	719,5	2738,4
Nuthatch	1.510,0	765,19	818,1	45	4,653	7	3,101	9,30	2120,0	413,0	2533,0
Parrot	1.510,0	764,98	861,9	54	4,247	19	2,548	12,74	2129,8	758,3	2888,0
Lapwing	1.590,0	805,84	861,5	45	4,775	7	3,183	9,55	2232,6	435,1	2667,7
Falcon	1.590,0	805,86	908,0	54	4,359	19	2,616	13,08	2243,6	799,3	3042,9
Chukar	1.780,0	902,20	975,7	84	3,698	19	2,220	11,10	2511,8	575,6	3087,4
Bluebird	2.156,0	1.092,31	1.181,2	84	4,069	19	2,441	12,21	3041,1	695,9	3737,0
Kiwi	2.167,0	1.098,27	1.145,8	72	4,407	7	2,939	8,82	3057,7	370,9	3428,6
Thrasher	2.312,0	1.171,42	1.235,2	76	4,430	19	2,068	10,34	3261,3	499,5	3760,8

Note-se que há 4 formações para o cabo 477 kcmil, por exemplo, e uma forma de diferenciá-las é pelo nome dado a cada uma delas. E, já que se estabeleceu tal forma de diferenciação entre as formações dos condutores ACSR, usando nomes de pássaros, utilizou-se o mesmo método para outros tipos de condutores. Por exemplo, as formações dos cabos feitos somente de fios de alumínio (AAC) receberam nomes de flores:

Tabela 1.5 – AAC

Condutor	Bitola (AWG ou MCM)	Seção Transversal (mm ²)	Formação do condutor		Diâmetro nominal do condutor (mm)	Peso nominal (kg/km)
			Nº de fios	Diâmetro (mm)		
Peachbell	6	13,28	7	1,554	4,66	36,6
Rose	4	21,14	7	1,961	5,88	58,3
Lily	3	26,68	7	2,203	6,61	73,6
Iris	2	33,65	7	2,474	7,42	92,8
Pansy	1	42,37	7	2,776	8,33	116,8
Poppy	1/0	53,48	7	3,119	9,36	147,5
Aster	2/0	67,46	7	3,503	10,51	186,0
Phlox	3/0	85,00	7	3,932	11,80	234,3
Oxlip	4/0	107,26	7	4,417	13,25	295,7
Sneezewort	250,0	126,72	7	4,801	14,40	349,4
Valerian	250,0	126,63	19	2,913	14,57	349,1
Daisy	266,8	135,31	7	4,961	14,88	373,1
Laurel	266,8	135,20	19	3,010	15,05	372,8
Peony	300,0	152,14	19	3,193	15,97	419,5
Tulip	336,0	170,58	19	3,381	16,91	470,3
Daffodil	350,0	177,31	19	3,447	17,24	488,8
Canna	397,5	201,54	19	3,675	18,38	555,7
Goldentuft	450,0	228,02	19	3,909	19,55	628,7
Cosmos	477,0	241,51	19	4,023	20,12	665,9

(continua)

Tabela 1.5 – AAC (continuação)

Condutor	Bitola (AWG ou MCM)	Seção Transversal (mm ²)	Formação do condutor		Diâmetro nominal do condutor (mm)	Peso nominal (kg/km)
			Nº de fios	Diâmetro (mm)		
Syringa	477,0	241,54	37	2,883	20,18	665,9
Zinnia	500,0	253,30	19	4,120	20,60	698,4
Hyacinth	500,0	253,06	37	2,951	20,66	697,7
Dahlia	556,5	281,85	19	4,346	21,73	777,1
Mistletoe	556,5	281,79	37	3,114	21,80	776,9
Meadowsweet	600,0	303,74	37	3,233	22,63	837,4
Orchid	636,0	322,24	37	3,330	23,31	888,4
Heuchera	650,0	329,64	37	3,368	23,58	908,8
Verbena	700,0	354,56	37	3,493	24,45	977,5
Flag	700,0	354,45	61	2,720	24,48	977,2
Violet	715,5	362,73	37	3,533	24,73	1000,1
Nasturtium	715,5	362,58	61	2,751	24,76	999,6
Petunia	750,0	380,18	37	3,617	25,32	1048,2
Cattail	750,0	380,18	61	2,817	25,35	1048,2
Arbutus	795,0	403,01	37	3,724	26,07	1111,1
Lilac	795,0	403,20	61	2,901	26,11	1111,6
Anemone	874,5	443,13	37	3,905	27,34	1221,7
Cockscomb	900,0	456,16	37	3,962	27,73	1257,7
Snapdragon	900,0	456,26	61	3,086	27,77	1257,9
Magnolia	954,0	483,50	37	4,079	28,55	1333,0
Goldenrod	954,0	483,87	61	3,178	28,60	1334,1
Hawkweed	1.000,0	506,77	37	4,176	29,23	1397,2
Camelia	1.000,0	506,35	61	3,251	29,26	1396,0

(continua)

Tabela 1.5 – AAC (continuação)

Condutor	Bitola (AWG ou MCM)	Seção Transversal (mm ²)	Formação do condutor		Diâmetro nominal do condutor (mm)	Peso nominal (kg/km)
			Nº de fios	Diâmetro (mm)		
Bluebell	1.033,5	523,41	37	4,244	29,71	1443,1
Larkspur	1.035,0	523,95	61	3,307	29,76	1444,6
Marigold	1.113,0	564,31	61	3,432	30,89	1555,8
Hawthorn	1.192,0	604,12	61	3,551	31,96	1665,6
Narcissus	1.272,0	644,58	61	3,668	33,01	1777,2
Columbine	1.351,0	684,55	61	3,780	34,02	1887,3
Carnation	1.431,0	725,34	61	3,891	35,02	1999,8
Gladiolus	1.510,5	765,78	61	3,998	35,98	2111,3
Coreopsis	1.590,0	805,36	61	4,100	36,90	2220,4
Jessamine	1.750,0	887,08	61	4,303	38,73	2445,7
Cowslip	2.000,0	1012,58	91	3,764	41,40	2791,8
Sagebrush	2.250,0	1139,54	91	3,993	43,92	3172,6
Lupine	2.500,0	1266,16	91	4,209	46,30	3525,1
Bitterroot	2.750,0	1393,13	91	4,415	48,57	3878,6
Trillium	3.000,0	1520,24	127	3,904	50,75	4232,5
Bluebonnet	3.500,0	1772,94	127	4,216	54,81	4984,0

1.4.1.5 Escolha do cobre ou alumínio

Tradicionalmente, condutores de alumínio têm sua utilização restrita às linhas de transmissão de energia, cabos de distribuição aérea e em instalações de potência mais elevada. Nas demais aplicações, utiliza-se o cobre.

Inicialmente, compare-se o peso, diâmetro e custo de um condutor de cobre e outro de alumínio que tenham a mesma capacidade de condução de corrente. As densidades e resistividades dos dois metais são:

- densidade do cobre (d_{Cu}) = 8,89 g/cm³;
- densidade do alumínio (d_{Al}) = 2,703 g/cm³;

- resistividade do cobre (ρ_{Cu}) = 17,241 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$;
- resistividade do alumínio (ρ_{Al}) = 28,264 $\cdot \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$.

Como a resistividade do alumínio é maior que a do cobre, a seção do condutor de alumínio deve ser maior que a do cobre para conduzir a mesma corrente. Mesmo assim, a massa de alumínio será menor que a do cobre, uma vez que a densidade do alumínio é 30 % da densidade do cobre:

$$\frac{\text{Peso do cobre}}{\text{Peso do alumínio}} = \frac{17,241 \cdot 8,89}{28,264 \cdot 2,703} = 2 \quad (1.4)$$

ou seja, o condutor de alumínio teria a metade do peso do condutor de cobre.

O custo do quilograma de cobre é maior que o de alumínio. Na ocasião em que este texto foi escrito, o custo do alumínio era de cerca de US\$ 2,00/kg, enquanto o custo do cobre era de cerca de US\$ 8,00/kg. Considerando que a fabricação do condutor cause um acréscimo de US\$ 200 por tonelada dos dois metais (em geral, a fabricação do condutor de alumínio é mais cara por tonelada que a do cobre), o custo do condutor de alumínio ficaria em US\$ 2,20/kg e o de cobre em US\$ 8,20/kg. Isso faz com que o custo do condutor de cobre seja $(8,20/2,20) \times 2 = 7,45$ vezes maior que o custo do condutor equivalente de alumínio.

Isso, evidentemente, varia com o tempo, mas, em geral, a relação de custo cobre/alumínio varia de um fator de 5 a 8 (ou seja, o condutor de cobre é de 5 a 8 vezes mais caro que o condutor equivalente de alumínio).

Também é verdade que, sendo a seção do condutor de alumínio maior que a de cobre, o diâmetro do condutor também será maior, aumentando o consumo dos materiais que recobrem o condutor – isolamento, coberturas, blindagens –, ou provocando maiores cargas de vento nos cabos aéreos nus. Também é verdade que o aumento de seção deve se dar utilizando-se seções padronizadas: por exemplo, a seção equivalente de alumínio a um condutor de cobre de seção 16 mm^2 seria $(28,264/17,241) \times 16 = 26 \text{ mm}^2$, mas a seção padronizada mais próxima seria 35 mm^2 . Entretanto, dada a diferença de custo (5 a 8 vezes), em geral é economicamente viável a substituição.

Então, a conclusão óbvia seria que o uso de condutores de alumínio proporcionaria uma economia fantástica; assim, por que ainda se utilizam condutores de cobre na grande maioria dos cabos elétricos?

Em primeiro lugar, quando exposta ao ar, a superfície do alumínio fica recoberta por uma camada invisível de óxido, de características altamente isolantes e difícil remoção. Nas conexões com alumínio, um bom contato só será conseguido com a ruptura dessa camada, e esse é o principal motivo da utilização de conectores de pressão e aparafusados. O cobre não traz esse problema.

Além disso, o alumínio escoa com pequenas pressões, afrouxando as conexões. Com esse afrouxamento, há a possibilidade da formação de óxido, o que eleva a resis-

tência elétrica da conexão e provoca seu aquecimento, que é uma causa potencial de incêndio em instalações de cabos isolados.

Por esses dois motivos, as conexões de cabos de alumínio têm de ser inspecionadas rotineiramente por pessoal especializado. Assim, a norma brasileira de instalações elétricas de baixa tensão (ABNT NBR 5410 [2]), em sua seção referente a condutores, traz diversas restrições ao uso dos condutores de alumínio.

Essas restrições são quanto a locais (por exemplo, onde exista alta densidade de ocupação e condições de fuga difíceis, como hotéis e hospitais, é terminantemente proibido o uso de cabos com condutores de alumínio), seções (especificando seções maiores como sendo as mínimas, indiretamente se limita o uso dos condutores de alumínio a instalações de maior potência, onde deve haver um responsável técnico que saiba fazer as inspeções) e, cumulativamente, restringe-se o uso desses condutores onde explicitamente exige-se que a instalação e manutenção sejam feitas por pessoal qualificado. Em instalações residenciais, o uso de condutores de alumínio é proibido.

Outro problema é que a maioria dos circuitos é constituída por condutores e conexões de cobre. Como o alumínio e o cobre estão separados eletroquimicamente por 2V, existe uma predisposição da conexão cobre-alumínio à corrosão galvânica.

Por fim, nos últimos anos tem crescido muito a utilização de condutores flexíveis em instalações de baixa tensão no Brasil, onde antes eram utilizados condutores rígidos. A diferença entre condutores rígidos e flexíveis é o número de fios – e, conseqüentemente, o diâmetro desses fios – que compõem o condutor. Por exemplo, um condutor de cobre de seção 25 mm² pode ter constituições tais como:

- 1 fio de diâmetro 5,64 mm (rígida);
- 7 fios de diâmetro 2,14 mm (rígida);
- 196 fios de diâmetro 0,40 mm (flexível);
- 783 fios de diâmetro 0,20 mm (extraflexível).

A liga de alumínio normalmente utilizada em condutores isolados não é adequada para fios com diâmetros menores que cerca de 1 mm. Fios muito finos alongam-se durante o processo e quebram no manuseio.

Entretanto, existem ligas especiais que permitem a fabricação de fios finos, com características semelhantes aos fios de cobre e mantendo a resistividade próxima das ligas tradicionais; até o momento, seu uso tem se restringido a cabos para usos especiais, como na indústria automotiva e aeroespacial. Essas ligas, da série 8000, já são normatizadas nos Estados Unidos para vários cabos isolados, mas seu uso não é generalizado.

Novos usos para condutores de alumínio têm surgido, principalmente em casos nos quais o peso é importante. Com o tempo, é provável que ligas e conexões aperfeiçoadas estendam o uso do alumínio a condutores para outras aplicações, mas é recomendável que as conexões sejam exaustivamente testadas antes de seu uso generalizado.

1.4.2 BLOQUEIO E REVESTIMENTOS DO CONDUTOR

Algumas vezes os fios são revestidos ou os interstícios dos condutores encordoados são preenchidos com materiais resistentes à corrosão ou para bloquear a migração de umidade. Fios de cobre são revestidos por estanho quando há incompatibilidade entre o cobre e o material da isolação, ou cobertura, ou possibilidade de oxidação. Cabos de alumínio para linhas de transmissão podem ser engraxados para evitar a corrosão.

Para evitar a migração de umidade pelos condutores de cabos isolados de média tensão, são utilizados vários processos diferentes, sendo os mais antigos o preenchimento dos interstícios do condutor encordoado por asfalto ou materiais poliméricos. Há algumas décadas surgiram os materiais hidroexpansíveis, que se expandem quando em contato com a umidade, evitando sua migração. Esses materiais são na forma de gel, pó ou em fitas ou fios. Os materiais em fitas ou fios são muito usados atualmente, aplicados nas camadas internas e externa do condutor ou somente nas camadas internas, existindo fitas hidroexpansíveis para aplicação em cabos de média e alta tensão. Deve-se tomar cuidado nas conexões e emendas, garantindo que os fios mantenham contato elétrico entre si para que a resistência elétrica do condutor não seja afetada.

Existem cabos que devem ser resistentes ao fogo, para continuar operando durante um certo tempo, mesmo enquanto queimam e depois de queimados, a fim de alimentar sistemas de iluminação de emergência e de combate ao incêndio. Invariavelmente, esses cabos são de baixa tensão e podem ter sua isolação constituída por materiais que ceramificam-se com o calor, mas a construção mais comumente encontrada é o condutor enfaixado com fitas de mica.

1.4.3 ISOLAÇÃO

A isolação serve para evitar que a energia elétrica ou sinal elétrico sejam drenados entre o ponto de alimentação do cabo e o ponto onde o cabo alimenta a carga. Paralelamente, serve para controlar alguns parâmetros elétricos da transmissão.

Originalmente, no início da utilização da energia elétrica no século XIX, os cabos não eram isolados, e um fio de cobre nu era colocado sobre isoladores cerâmicos. Logo se percebeu a necessidade de uma isolação ao longo do cabo e o material escolhido foi o papel, utilizado na forma de fitas aplicadas helicoidalmente sobre o condutor. Posteriormente, outras técnicas, tais como impregnar o papel com óleo e uso de tecidos, foram empregadas, até surgir a opção de se extrudar PVC (cloreto de polivinila) sobre o condutor, no início do século XX. Posteriormente, outros materiais surgiram, mas os processos iniciais ainda perduram: ainda existem cabos para altas tensões isolados com papel e as linhas de transmissão e distribuição aéreas ainda usam o ar como isolante. Novas tecnologias também surgiram, como os cabos para alta tensão com papel impregnado com gases a altas pressões, usualmente SF₆, hexafluoreto de enxofre (década de 1960).

1.4.3.1 Classes de tensão

Quando se usa a isolamento para isolar o condutor do meio ambiente, de forma a não se perder energia, o principal parâmetro para defini-la é a tensão elétrica no condutor.

Existem os cabos de baixa tensão – grupo no qual se pode incluir os cabos de controle, instrumentação, telecomunicações e transmissão de dados –, cabos de média tensão e cabos de alta tensão, mas as fronteiras entre cada uma dessas definições nunca foram muito bem definidas.

As tensões de projeto dos cabos elétricos, no Brasil, são baseadas nas normas da IEC. Em sua maioria, as tensões de isolamento são indicadas na forma U_0/U , com U_0 , sendo a tensão entre fase e terra e U a tensão entre fases. As tensões padronizadas pelas normas ABNT são:

0,6/1 kV – 1,8/3 kV – 3,6/6 kV – 6/10 kV – 8,7/15 kV – 12/20 kV – 15/25 kV – 20/35 kV.

Costuma-se considerar os cabos para 0,6/1 kV e 1,8/3 kV como sendo de baixa tensão, e os demais de média tensão.

Existem também cabos para 750 V (identificados como 0,45/0,75 kV), para 500 V (0,3/0,5 kV) e cabos para 300 V. Alguns sistemas especificam, ainda, cabos para 600 V e os sistemas de telefonia operam em tensões abaixo de 50 V. Todos esses cabos são de baixa tensão.

1.4.3.2 Materiais de isolamento

Os materiais extrudados dividem-se em materiais termoplásticos e materiais termofixos.

Os materiais termoplásticos caracterizam-se por tornarem-se maleáveis quando aquecidos e retomarem suas características originais depois de resfriados. Podem ser extrudados mais que uma vez, não precisam de cura e são recicláveis. Sua estrutura pode ser representada por cadeias não interligadas:

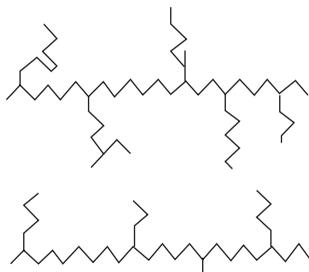


Figura 1.6 – Estrutura dos materiais termoplásticos.

Os materiais termofixos não retomam suas características de antes da reticulação. A reticulação – também chamada de cura ou vulcanização – do material (em inglês, *cross-linking* ou *X-linking*) é a interligação das cadeias do polímero em uma única molécula:

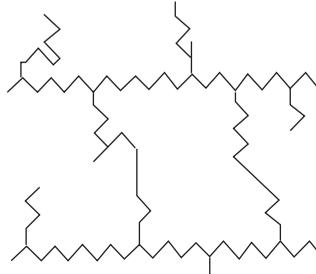


Figura 1.7 – Estrutura dos materiais termofixos.

A reticulação pode ser feita em linha contínua à extrusão ou em sauna, piscina quente ou irradiação, utilizando catalisadores (peróxidos ou silanos). Não são recicláveis.

Os principais materiais utilizados atualmente são:

PVC – cloreto de polivinila

É um material termoplástico, naturalmente resistente à propagação de fogo, com muitas impurezas e com constante dielétrica muito variável. Quando queimado, emite gases halogenados (cloro) e é utilizado em cabos de baixa tensão e cabos de controle. Sua temperatura máxima de operação varia conforme a formulação utilizada, de 70 a 105 °C, sua temperatura máxima em regime de sobrecarga é de 100 °C e a temperatura máxima no curto-circuito varia entre 140 e 160 °C.

Polietileno

Também termoplástico, é naturalmente propagante de fogo, mas pode ser aditivado para obter uma melhor resistência à propagação da chama. É um material mais puro, com constante dielétrica bem definida e, por isso, é utilizado em cabos de telecomunicações e para transmissão de dados. Também é utilizado em baixas tensões e em cabos de controle e instrumentação. Sua temperatura máxima de operação é de 70 °C e a máxima em regime de sobrecarga é de 90 °C, sendo a temperatura máxima no curto-circuito de 130 °C.

EPR – borracha de etileno-propileno

Material termofixo utilizado em cabos de baixa e média tensão, com temperatura máxima de operação entre 90 e 105 °C, em regime de sobrecarga de 130 a 140 °C e a máxima no curto-circuito de 250 °C.

XLPE – polietileno reticulado

Material termofixo utilizado em cabos de baixa, média e alta tensão, com temperatura máxima de operação de 90 °C, máxima em regime de sobrecarga de 130 °C e no curto-circuito máxima de 250 °C.

LSHF – composto com baixa emissão de fumaça e halogênios

Material termoplástico ou termofixo utilizado em cabos de baixa tensão, baseado em polímeros como o polietileno ou o EVA (etil-vinil acetato), com temperatura máxima de operação de 70 ou 90 °C, máxima em regime de sobrecarga de 100 ou 130 °C e máxima no curto-circuito de 160 ou 250 °C.

Nota: a temperatura em regime de sobrecarga, também chamado de regime de emergência, ainda é definida nas normas brasileiras, embora não exista nas normas internacionais (IEC). Também é definida nas normas norte-americanas (ICEA/NEMA, UL).

Inicialmente, utilizava-se o PVC e o polietileno também em cabos de média tensão. O PVC deixou de ser utilizado por conta de impurezas normalmente encontradas no composto e do baixo valor de suas temperaturas de sobrecarga e de curto-circuito, sendo usado hoje somente até 3,6/6 kV, conforme normas brasileiras e internacionais. O polietileno deixou de ser utilizado em decorrência do baixo valor de suas temperaturas de sobrecarga e de curto-circuito, sendo substituído pelo XLPE, mas por muito tempo serviu de isolamento não somente de cabos de média, como também de alta tensão. Hoje, no Brasil, sua utilização também é limitada a 3,6/6 kV.

Com o nome genérico de EPR existem algumas variações, como o HEPR (*high modulus or hard grade ethylene propylene rubber*, com maior carga de ruptura), EPM (*Ethylene Propylene Monomer*) e EPDM (*Ethylene Propylene Diene Monomer*).

Outros materiais também são usados para aplicações específicas, como o silicone, borracha termoplástica (TPE), etil-vinil acetato (EVA) e a poliamida.

A temperatura máxima de operação da isolamento é aquela que leva à capacidade de condução de corrente em um cabo isolado. O condutor tem sua temperatura elevada por efeito Joule em razão da passagem da corrente elétrica e, estando em contato com a isolamento, essa temperatura não deve ser maior que o valor máximo especificado para isolamento. O conceito dessa especificação é que os materiais poliméricos se degradam com a temperatura ao longo do tempo. Por exemplo, medindo-se regularmente o alongamento de um material ao longo do tempo, expondo-o a várias temperaturas e considerando que o material está totalmente deteriorado quando esse alongamento chegar a 50 % de seu valor original, pode-se extrapolar um gráfico como o seguinte:

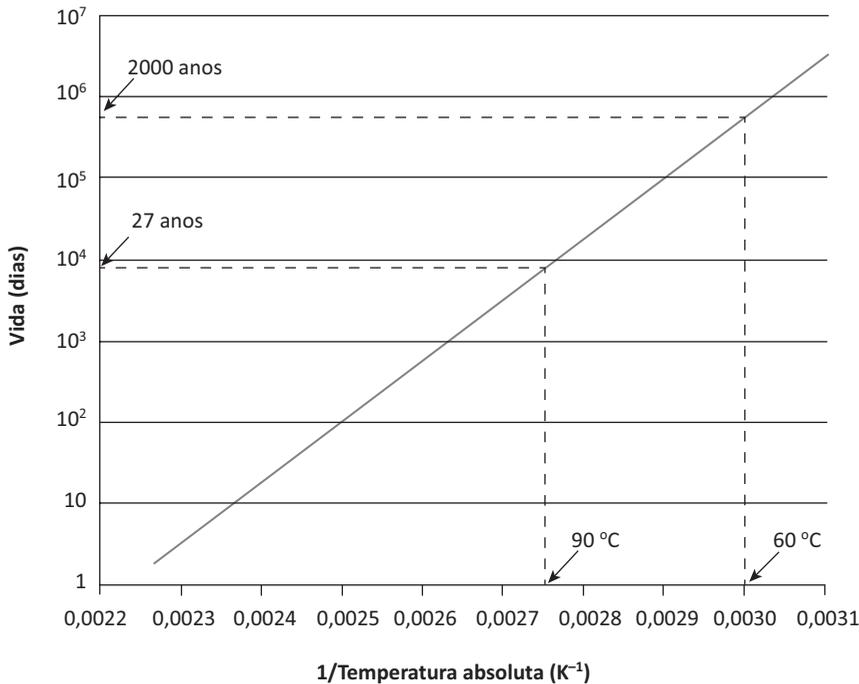


Figura 1.8 – Gráfico do tempo de vida.

Desse gráfico, extrapola-se a expressão de tempo t (dias) x temperatura θ (°C):

$$\log(t) = -0,0623 \cdot \theta + 9,601 \quad (1.5)$$

Um material como esse, submetido continuamente a uma temperatura de 90 °C, levaria 27 anos para envelhecer, o que significa que após esse tempo teria perdido 50 % de seu alongamento, ou seja, tornar-se-ia mais duro. Isso pode causar fissuras no material, que propiciam um curto-circuito do condutor com qualquer material condutor externo à isolação.

Os valores da temperatura de curto-circuito são empíricos, dada a curta duração do fenômeno, mas o mesmo conceito usado para a temperatura em regime permanente pode ser usado para a temperatura de emergência. No exemplo dado, uma temperatura contínua de 130 °C levaria o condutor ao envelhecimento em 32 dias. Embora o efeito de envelhecimento seja cumulativo, limita-se a duração da emergência a 500 horas durante a vida do cabo, nas normas da ABNT, enquanto a IEC não fornece informações quanto ao regime de emergência.

Entretanto, infelizmente há pouca disponibilidade de informações sobre o tempo de vida dos materiais utilizados.

Nota: a Figura 1.8 é uma curva de vida em função da degradação das características físicas do material decorrente de temperatura; existe, também, a curva de vida em função da degradação das características elétricas por conta do gradiente elétrico, aplicável somente a cabos blindados de média e alta tensão.

1.4.3.2.1 Cabos de baixa tensão, controle e instrumentação

A isolamento desses tipos de cabos é formada por:

- PVC, quando se deseja uma inerente resistência à propagação do fogo;
- polietileno, quando se deseja um controle mais exato da capacitância;
- EPR ou XLPE, quando se necessita uma maior resistência a altas temperaturas. O EPR é um pouco mais flexível, o XLPE é um pouco mais barato, o EPR é mais resistente à degradação de suas características físicas no contato com óleos;
- compostos com baixa emissão de fumaça e gases tóxicos;
- outros materiais para utilizações específicas.

Além das características elétricas, muitos desses cabos precisam ter uma isolamento com melhor resistência mecânica ou a agentes químicos.

Por exemplo, os fios e cabos unipolares, sem cobertura, para a construção civil são formados somente pelo condutor e pela isolamento. Assim, a isolamento precisa ter uma resistência à abrasão e deslizar facilmente nos eletrodutos. Cordões paralelos e torcidos e alguns cabos para painéis elétricos e máquinas de soldar também têm esse tipo de isolamento. Por isso, a isolamento precisa ter características elétricas e mecânicas, sendo que o aumento de uma sempre provoca a redução da outra. Em baixa tensão, isso não traz grandes problemas, pois é possível utilizar uma espessura bem maior do que aquela que seria necessária simplesmente para a isolamento elétrica.

1.4.3.2.2 Cabos de média e alta tensão

A isolamento dos cabos de média tensão é feita com compostos de EPR ou XLPE. Já a isolamento dos cabos de alta tensão é feita prioritariamente com XLPE, uma vez que esse composto tem um fator de perdas do dielétrico (tangente delta) menor que o EPR. Como as perdas no dielétrico dependem do quadrado da tensão entre fase e terra, tornam-se mais importantes conforme a tensão for mais elevada.

Embora com o mesmo nome, compostos de EPR e XLPE para uso na isolamento de cabos de média e alta tensão não são os mesmos que os utilizados em cabos de baixa tensão. Os compostos utilizados em média e alta tensão devem ser mais limpos e eletricamente melhores que os compostos de uso geral em baixa tensão.

Muitos cabos de baixa tensão são isolados por EPR ou XLPE com cura por silano, o que ainda não é aceito para cabos de média e alta tensão. Nesses casos, somente se utiliza, até o momento, o processamento em linhas de vulcanização contínua, com cura por peróxidos.

1.4.4 PROTEÇÕES METÁLICAS

1.4.4.1 Tipos e funções

As proteções metálicas podem ter finalidade elétrica ou mecânica, ou ambas. Uma proteção metálica para efeitos elétricos é chamada de blindagem e quando é colocada para fins mecânicos recebe o nome de armação, existindo ainda as capas metálicas, que podem ter a função de blindagens ou armações, além de servir de barreira contra a penetração de umidade e agentes químicos – exemplos de capas metálicas são aquelas de alumínio ou chumbo, extrudadas como se fossem de material polimérico. Muitas vezes, uma armação também desempenha funções elétricas, além da proteção mecânica.

1.4.4.2 Blindagem elétrica

Dependendo do cabo, a blindagem metálica pode ter diferentes funções:

- Confinar o campo elétrico em cabos de controle, instrumentação, telecomunicações e transmissão de dados, controlando as características de transmissão de sinais (impedância, atenuação).
- Reduzir a interferência eletromagnética de um circuito em outro, causadas por campos elétricos e/ou magnéticos.
- Confinar o campo elétrico em cabos de energia por motivos de segurança: sendo devidamente aterrada, reduz a zero o campo externo de cabos de média e alta tensão, condição necessária no dimensionamento de sua isolação, além de evitar choques.
- Servir de caminho para correntes de curto-circuito em cabos isolados de média e alta tensão.

Em cabos de baixa, média e alta tensão isolados, a blindagem é utilizada quase que somente nos cabos de média e alta tensão, onde forma um conjunto com as blindagens semicondutoras.

O condutor dos cabos de média e alta tensão não é sólido, mas constituído pelo encordoamento de vários fios de cobre ou alumínio e, mesmo em construções que resultam em um formato mais cilíndrico, sempre há irregularidades, interstícios entre os fios. Sobre o condutor, usa-se uma camada de material semicondutor, extrudado ou enfaixado, ou uma combinação de material aplicado por enfaixamento e extrusão,

sendo que esse material tem uma resistividade elétrica intermediária entre os condutores e os isolantes. Os condutores têm uma resistividade elétrica da ordem de $10^{-6} \Omega\text{-cm}$, os isolantes da ordem de $10^{15} \Omega\text{-cm}$, enquanto os materiais semicondutores têm resistividade da ordem de $10^5 \Omega\text{-cm}$. Por isso, são chamados de semicondutores.

Nota: esses semicondutores não têm a mesma aceção da área de eletrônica; não têm por base o silício, sendo comumente feitos à base de polietileno.

As irregularidades do condutor deformam o campo elétrico e a blindagem semicondutora o equaliza, tornando o campo cilíndrico. Sobre a semicondutora do condutor é aplicada a isolamento, que trabalha então com um campo elétrico uniforme. Sobre a isolamento, outra camada semicondutora é aplicada, servindo de acolchoamento para a blindagem metálica, equalizando o campo elétrico sobre a isolamento e garantindo o mesmo potencial em todos os pontos de sua circunferência.

Para diferentes finalidades, existem diferentes construções da blindagem metálica e são usados diferentes materiais.

Cabos para uso em médias e altas tensões não têm muita flexibilidade, já que os condutores são compactados, mas existem alguns que precisam ter uma flexibilidade maior, com condutores flexíveis e, para manter uma certa flexibilidade, a blindagem é feita com trança de fios de cobre. Uma série de fios paralelos, chamada de espula, é aplicada em um sentido, enquanto outra série de fios paralelos é aplicada em outro sentido.



Figura 1.9 – Trança metálica.

Fonte: iStockphoto.

Para manter a flexibilidade e poderem ser aplicados dessa forma, os fios são muito finos e, por isso, a seção de blindagem é pequena demais para conduzir grandes correntes.

Os antigos cabos de transmissão ou distribuição isolados com papel precisavam ter uma construção totalmente estanque à penetração de água pois, obviamente, a

isolação era muito sensível à umidade. Como barreira, usavam-se capas de chumbo, tubos sem qualquer emenda, e o próprio metal dessa capa metálica servia de blindagem. Com o advento dos cabos com isolação extrudada, esse tipo de blindagem quase desapareceu, sendo utilizada somente em raros casos muito específicos, às vezes ainda de chumbo, às vezes de alumínio extrudado.

Nas primeiras décadas de uso das isolações extrudadas, foi muito utilizada a blindagem de fita de cobre, com as fitas aplicadas helicoidalmente sobre a camada semicondutora do condutor. Por conta da pequena espessura das fitas, o limite de seção para uma blindagem desse tipo é baixo e é difícil dimensionar previamente a resistência elétrica de uma blindagem de fita de cobre helicoidal, em função da distribuição de corrente, ou da falta dela, pela sobreposição da fita, diferente em cabos novos e em cabos com algum tempo de uso. As fitas utilizadas na blindagem têm, em geral, espessuras entre 0,08 mm e 0,1 mm para que possam ser adequadamente aplicadas. Quando o cabo contém três veias isoladas sob uma mesma cobertura, a blindagem podia estar em contato com condutores neutro ou de aterramento nos interstícios, sendo às vezes aplicada uma blindagem comum aos três condutores, mas essas construções praticamente não são utilizadas atualmente.

Quando não é necessário o aterramento da blindagem em dois ou mais pontos, por exemplo, em um circuito muito curto, a blindagem de fita de cobre poderia ser utilizada, pois, com o aterramento em um só ponto, somente baixas correntes parasitas são possíveis de ocorrer na blindagem, e não é possível a circulação de correntes de curto-circuito; assim, essa blindagem tem somente a função de equalizar o campo elétrico sobre a isolação.

No momento, a blindagem metálica mais utilizada é aquela formada por fios de cobre aplicados helicoidalmente sobre a camada semicondutora da isolação. Esses fios têm diâmetro entre 0,5 mm e cerca de 1,5 mm, uma vez que diâmetros maiores tornam difícil sua aplicação. O diâmetro sobre a camada semicondutora da isolação limita a quantidade de fios possível de ser aplicada, limitando dessa forma a seção total da blindagem. Muitas vezes aplica-se uma fita de cobre em hélice aberta, ou mesmo um ou mais fios, sobre a blindagem a fios, no mesmo sentido ou no sentido inverso aos dos fios da blindagem, para garantir a continuidade elétrica de cada fio em caso de seu rompimento.

Em alternativa à aplicação helicoidal dos fios, há a aplicação em “SZ”. A aplicação helicoidal demanda máquinas girantes que, pelo seu diâmetro, têm limitação em sua velocidade. A aplicação em SZ é feita aplicando-se os fios helicoidalmente em um sentido por algumas voltas, em seguida invertendo o sentido de torção. Isso aumenta bastante a velocidade de aplicação, mas os fios ficam soltos, tendendo a desfazer a blindagem. Por isso, esse tipo de blindagem tem de ser amarrada com fios ou fitas, ou, ainda, aplicada na mesma operação da fase de produção seguinte, por exemplo, a extrusão da cobertura.

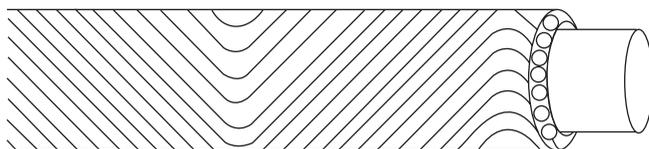


Figura 1.10 – Blindagem em SZ.

1.4.4.3 Armação

A função da armação é mecânica, embora ao utilizar uma armação metálica sempre se tenha que levar em consideração seus efeitos elétricos sobre o cabo. Os tipos mais comuns de armação metálica são fios, fitas planas, fitas corrugadas ou fitas intertravadas. Os materiais utilizados são aço, alumínio, ligas de alumínio, cobre ou ligas de cobre. Existem ainda armações não metálicas, mas essas são utilizadas somente em cabos especiais, além das capas metálicas extrudadas, de chumbo ou alumínio, que podem também ser utilizadas como armações.

O tipo de armação utilizada depende da finalidade e do custo que acrescenta ao cabo. Um cabo que sofra excessiva tração longitudinal durante sua instalação ou mesmo durante toda sua vida útil é armado com fios helicoidais, sobre os quais recai a maior parte da tração. Se o cabo precisar ter uma certa flexibilidade, pode ser utilizada uma armação em forma de trança, que não será tão efetiva quanto os fios. Já cabos que possam sofrer impactos ou compressões são armados com fitas – planas, corrugadas ou intertravadas –, embora a armação de fios também forneça uma certa resistência a golpes transversais.

O material que tem melhor resistência mecânica é o aço, mas, por suas características ferromagnéticas, a tensão induzida na armação provoca maiores perdas. Por isso, utilizam-se os outros metais, escolhidos de acordo com os esforços mecânicos que devam suportar, seu custo e as limitações de fabricação.

Os fios podem ter seção transversal circular ou podem ser fios chatos. As fitas corrugadas ou intertravadas fornecem uma melhor resistência à compressão ou impacto que as fitas lisas.

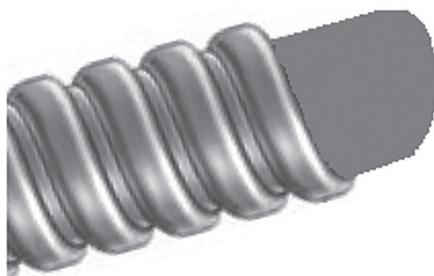


Figura 1.11 – Armação intertravada.



Figura 1.12 – Armação corrugada.

Fonte: iStockphoto.

A armação intertravada é feita por uma fita helicoidal, que vai sendo conformada conforme é aplicada, amarrando uma volta à volta seguinte, de modo que não é estanque à infiltração de gases ou líquidos, enquanto a armação corrugada é formada por uma fita aplicada longitudinalmente, tendo suas bordas coladas ou soldadas, o que lhe fornece características de estanqueidade.

Por razões de segurança, as armações metálicas devem ser aterradas, em geral, juntamente com a blindagem metálica, quando essa existir.

1.4.5 CAPAS, ENCHIMENTOS, VEIAS CEGAS, SEPARADORES E COBERTURA

1.4.5.1 Funções

Existem componentes no cabo que não têm características elétricas ou resistência mecânica. São uma proteção dos elementos do cabo abaixo deles, acessórios na construção dos cabos.

A cobertura é a camada de material extrudado externa do cabo. Tem a função de proteger o conjunto interno contra abrasão, umidade, ataques químicos, golpes, esmagamento, radiação e o que puder atingir o cabo durante seu uso, durante o transporte, instalação e operação. Evidentemente, cada tipo de solicitação pede um tipo de cobertura.

Alguns cabos não têm isolamento, somente cobertura. Por outro lado, outros cabos têm somente isolamento, com funções de isolamento e de cobertura.

Sob a designação geral de capas, existem capas internas, capas de separação ou enchimento. Podem ser extrudadas ou em forma de fitas e servem para deixar o cabo mais cilíndrico, separar dois materiais que não podem ser deixados em contato ou facilitar a fabricação do cabo.

Por exemplo, quando se torcem três veias e se coloca uma cobertura fina sobre a reunião, o cabo pode ficar acostelado e, para torná-lo mais cilíndrico, aplica-se uma primeira capa sob a cobertura. Quando se pretende aplicar uma trança, é ideal que a superfície a receber a trança seja cilíndrica, e é comum haver uma capa abaixo dessa trança. Quando se tem blindagem e armação de diferentes metais, coloca-se uma capa de separação entre elas. A armação intertravada é normalmente aplicada sobre uma

capa interna ranhurada, que ajuda a reter a fita até uma certa tração longitudinal. Além disso, as capas devem servir como um acolchoamento na dilatação e contração térmica do cabo.

As capas extrudadas são chamadas de capa interna, capa de separação ou, simplesmente, de enchimento. Quando compostas por fitas, são chamadas de capa interna ou de separação, mas muitas vezes são chamadas pelo nome genérico de separador.

As fitas mais utilizadas como separadores são as de pequena espessura, menores que 1 mm, sendo aplicadas helicoidalmente e, quando na mesma operação que uma extrusão, longitudinalmente; quando aplicadas longitudinalmente em operações separadas de uma extrusão, são amarradas por filamentos têxteis. Existem outras funções para fitas, tais como barreira térmica, contra o fogo ou contra roedores, mas, nesses casos, são um tipo de armação, não de separador. Separadores são utilizados para diversas finalidades, como evitar a penetração da isolação nos interstícios do condutor, amarrar fios de blindagem helicoidais antes da aplicação da camada seguinte (capa ou cobertura), servir de amarração da reunião de condutores isolados etc.

Para dar forma cilíndrica ao cabo também são usadas “veias cegas”, um filamento de material extrudado colocado nos interstícios das veias isoladas.

1.4.5.2 Materiais

Fitas separadoras são na sua maioria de poliéster, também sendo usadas fitas de polietileno e de tecido.

Enchimentos na forma de veias cegas ou capas são feitos de materiais termofixos ou termoplásticos. Os enchimentos termoplásticos são feitos, muitas vezes, com material reciclado, total ou parcialmente; nesse último caso, é feita uma mistura de material reciclado com material virgem na alimentação da extrusora. Não existem especificações para materiais de enchimento, já que não têm função elétrica ou mecânica.

Capas e cobertura extrudadas são feitas de materiais termoplásticos ou termofixos, dependendo da utilização do cabo. Os materiais mais utilizados são:

- PVC (Polyvinyl Chloride = cloreto de polivinila);
- PE (Polyethylene = polietileno);
- EVA (Ethyl-Vinil Acetate = etil-vinil acetato);
- silicone;
- polyamide (poliamida = nylon®);
- TPE (Thermoplastic Elastomer = elastômero termoplástico);
- politetrafluoretileno (PTFE = teflon®);
- ethylene tetrafluoroethylene (ETFE = tefzel®);

- policloroprene (neoprene®);
- borracha nitrílica.

®Marcas registradas da Du Pont.

Existem muitos motivos que levam à escolha de um ou outro material para cobertura, e às vezes uma combinação de motivos, mas, de forma geral:

- O PVC é um material extremamente barato, simples de processar, tem boa resistência à propagação da chama e baixa permeabilidade à água. Entretanto, por conta do cloro existente em sua composição, emite gás tóxico durante a queima.
- O polietileno também é bastante simples de processar, mas não é naturalmente resistente à propagação de chama. Cargas inorgânicas podem torná-lo mais resistente à chama e têm tido sua utilização crescente nos últimos anos. É menos permeável à água que o PVC.
- O EVA tem sido a base para coberturas resistentes à propagação da chama. Pode ser processado como termoplástico ou termofixo, dependendo da aplicação, o que determina sua aditivação. É bastante flexível.
- O silicone é o tradicional material resistente a altas temperaturas;
- A poliamida tem sido utilizada como barreira ao ataque de térmitas (cupins).
- De uma forma geral, materiais termofixos são utilizados quando se requer alta resistência a óleos.

As normas técnicas trazem uma relação dos produtos permitidos para utilização como cobertura e suas características mecânicas.

REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (1997). Norma NBR 5111. Fios de cobre nus, de seção circular, para fins elétricos.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2005). Norma NBR 5410. Instalações elétricas de baixa tensão.

Softwares são uma benção e uma maldição.

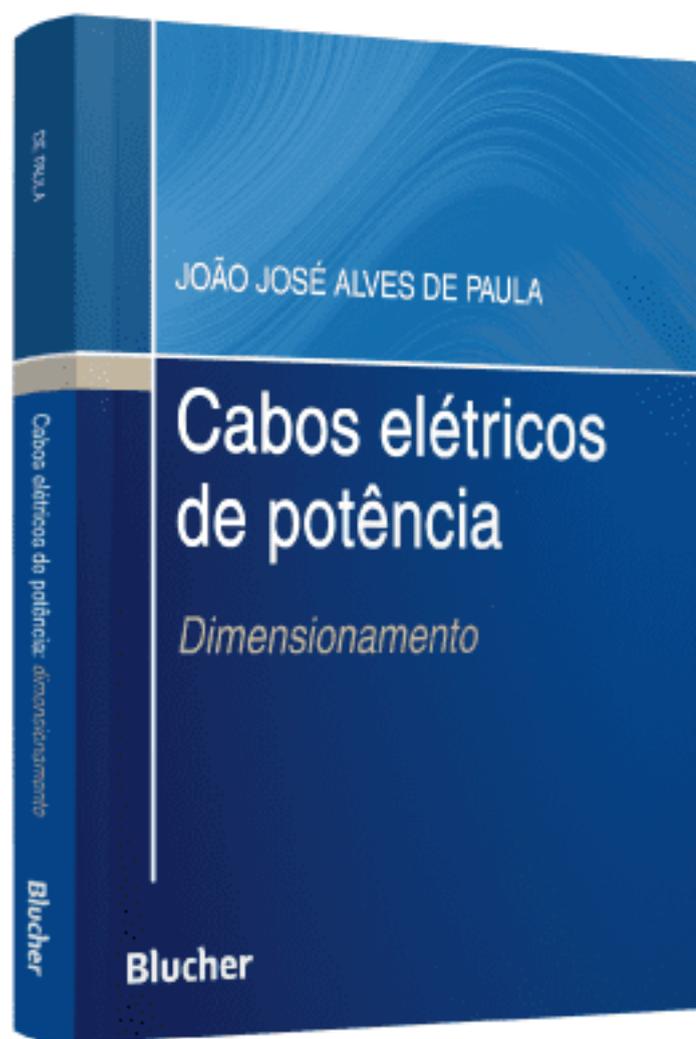
São uma benção porque possibilitam simulações impossíveis no passado e reduzem o tempo de projeto a uma fração daquele que era antes necessário. Mas são também uma maldição, pois os engenheiros ficam cada vez mais dependentes de softwares cada vez mais sofisticados e, pouco a pouco, as metodologias de cálculo utilizadas vão caindo no esquecimento. Com esta obra, espera-se que os engenheiros atuais e futuros tomem um conhecimento profundo dessas metodologias, de modo que não somente saibam o que seus softwares estão fazendo, mas possam criar novos e melhorar os atuais.

Esta obra traz as metodologias dos principais critérios de dimensionamento de cabos elétricos de potência e tem o objetivo de ser um material de consulta para projetistas de instalações elétricas, engenheiros de concessionárias de energia e para fabricantes de cabos elétricos e também como material didático para cursos de Engenharia. As metodologias baseadas em desenvolvimentos teóricos consolidados têm sua fundamentação demonstrada, enquanto aquelas mais empíricas ou com desenvolvimento teórico menos consolidado são somente apresentadas.



www.blucher.com.br

Blucher



Clique aqui e:

[VEJA NA LOJA](#)

Cabos elétricos de potência Dimensionamento

João José Alves de Paula

ISBN: 9786555066494

Páginas: 444

Formato: 17 x 24 cm

Ano de Publicação: 2023
