

CABOS ENERGIA

CONSTRUÇÃO E DIMENSIONAMENTO



AND BEST IN CLASS RO
STRONGER PLATFORM TO ENHANCE CUSTOMER SER
ONS WORLDWIDE LEADER
CUSTOMER SERVICE EXTENDED PRODUCT OFFERIN
IN O&M AND INDUSTRIAL APP

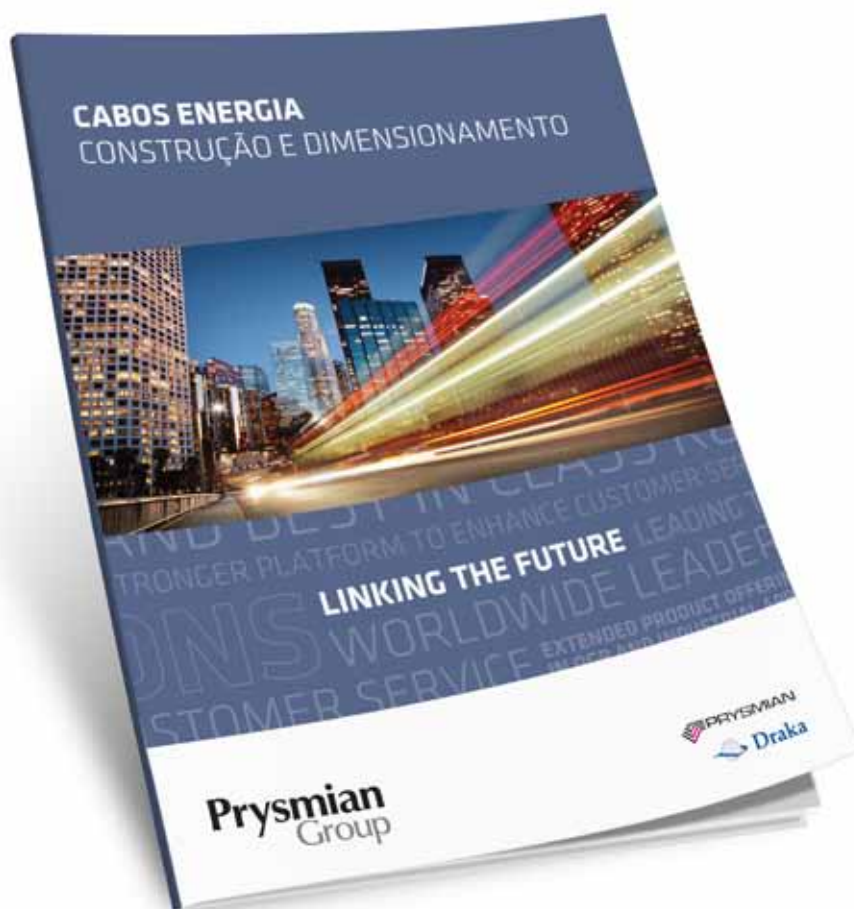
LINKING THE FUTURE LEADING T

Prysmian
Group



INTRODUÇÃO

Este material apresenta algumas das principais considerações sobre os elementos constituintes e o dimensionamento dos cabos de energia desenvolvidos e fabricados pela Prysmian, no Brasil.



WEB CURSO 2012

Confira alguns dos conteúdos técnicos que farão parte do programa de estudos neste ano:

LINHA CABOS ENERGIA	Abril
Tensão.....	Abril
Aplicação	Abril
ESCOLHA DO CABO	Abril
Considerações Gerais.....	Abril
CONSTRUÇÃO	Maio
Condutor.....	Maio
Forma.....	Maio
Blindagem sobre o condutor	Junho
Isolamento.....	Junho/Julho
Blindagem sobre o isolamento.....	Julho
Proteções.....	Julho
DIMENSIONAMENTO	Agosto
Generalidades.....	Agosto
Estimativa da seção do condutor	Agosto
Cálculo da espessura isolante.....	Agosto
Cálculo da corrente admissível	Agosto
Cálculo da queda de tensão	Setembro
Cálculo da corrente de curto-circuito.....	Outubro

ABRIL/2012 - 1ª VERSÃO

CAP 1

LINHA CABOS ENERGIA

A linha Prysmian de Cabos Energia pode ser classificada de acordo com vários critérios:

TENSÃO

- Baixa tensão
Cabos até 1 kV
- Média tensão
Cabos de 2 a 35 kV
- Alta tensão
Cabos de 36 a 150 kV
- Altíssima tensão
Cabos acima de 150 kV

APLICAÇÃO

- **Cabos de uso geral**
- **Cabos de uso específico**
 - Cabos de comando
 - Cabos para uso móvel
 - Cabos para uso submarino
 - Cabos para instrumentação
 - Cabos para equipamentos de solda
 - Cabos para lides de motores
 - Cabos para navios
 - Cabos para sistemas ferroviários (vias, locomotivas e vagões)
 - Cabos para a indústria de petróleo (plataformas, bombeio submerso, umbilicais e refinarias)
 - Cabos para elevadores
 - Cabos para circuitos de segurança (resistentes ao fogo)

Tipo de dielétrico

MATERIAL ISOLANTE	CABOS PRYSMIAN*	TENSÃO DE ISOLAMENTO (kV)
PVC	Sintenax, Sintenax Flex	0,6/1
Polietileno (PET)	Multiplexado Auto-Sustentado	0,6/1
Polietileno Reticulado (XLPE)	Voltenax	0,6/1
	Voltalene	0,6/1 • 3,6/6 • 6/10 • 8,7/15 • 12/20 • 15/25 • 20/35 (**)
	Multiplexado Auto-Sustentado	0,6/1
	RDA	8,7/15 • 12/20 • 15/25 • 20/35
	Voltalene Concêntrico	0,6/1
Borracha Etileno Propileno (EPR)	Afumex	0,6/1
	Eprotenax Gsette	0,6/1
	Eprotenax Compact	3,6/6 • 6/10 • 8,7/15 • 12/20 • 15/25 • 20/35
	Eprotenax Compact 105	3,6/6 • 6/10 • 8,7/15 • 12/20 • 15/25 • 20/35
	Eprotenax Compact	3,6/6 • 6/10 • 8,7/15 • 12/20 • 15/25 • 20/35
	Eprotenax	0,6/1 • 3,6/6 • 6/10 • 8,7/15 • 12/20 • 15/25 • 20/35 (**)
	Afumex MT	0,6/1 • 3,6/6 • 6/10 • 8,7/15 • 12/20 • 15/25 • 20/35 (**)

(*) Denominação comercial dos cabos isolados Prysmian Brasil.

(**) A Prysmian brasileira produz cabos com isolação de EPR para tensões de até 145 kV e de XLPE até 245 kV

A Prysmian no Brasil se encontra apta a atender consultas de qualquer tipo de cabo das linhas apresentadas na tabela acima (ainda que esta consulta demonstre alguma especificidade adicional) e também de vários outros cabos para aplicações especiais.

CAP 2

ESCOLHA DO CABO

CONSIDERAÇÕES GERAIS

O cabo não é um elemento independente, mas constituinte de um sistema elétrico, a cujas características deve adaptar-se. O tipo de cabo depende do tipo de sistema, que por sua vez depende das exigências do consumidor final que vai ser atendido. A escolha do cabo envolve basicamente três etapas:

1. Definir, entre as alternativas possíveis, aquelas que a princípio se apresentam como mais indicadas.
2. Dimensionamento do cabo referente a cada alternativa escolhida.
3. Análise dos resultados, para definição final da melhor alternativa entre as consideradas.

Definição das alternativas

A definição das alternativas a serem analisadas deve ser feita a partir de uma série de condições que são estabelecidas pelo projetista mediante considerações operacionais e econômicas:

- **Tipo e projeto do sistema:** o tipo de sistema (transmissão, distribuição, iluminação pública, etc.), bem como o seu projeto (radial, radial seletivo, reticulado, etc.), podem ser determinantes na escolha do tipo de cabo.
- **Tensão e potência:** os vários tipos de cabos apresentam faixas limitadas de tensão e potência nas quais podem operar.
- **Comprimento do circuito:** particularmente em baixa tensão, o comprimento do circuito deve ser considerado principalmente no que concerne aos valores admissíveis de queda de tensão.
- **Tipo de carga:** cargas indutivas capacitivas ou puramente resistivas, podem exigir cabos com detalhes diferentes de construção.
- **Condições ambientais:** os cabos devem ser dotados de proteções mecânicas condizentes com as condições ambientais do local de instalação do circuito.
- **Trajeto:** os eventuais desníveis ou curvas ao longo do trajeto do cabo são importantes na escolha dos materiais de isolamento e proteção.
- **Confiabilidade desejada:** o tipo de isolamento deverá apresentar confiabilidade compatível com a desejada para o sistema a curto, médio e longo prazos.

Dimensionamento

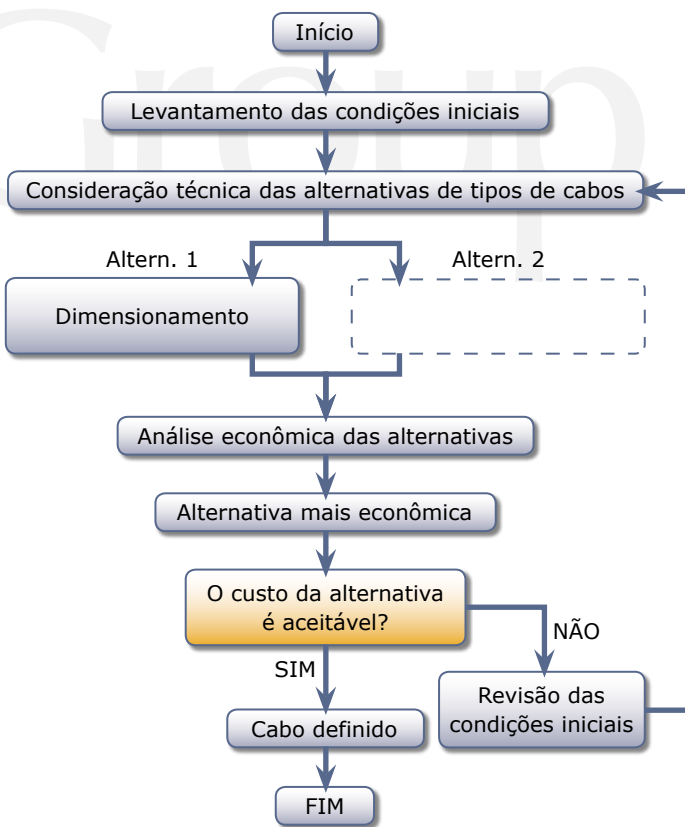
O dimensionamento do cabo referente a cada alternativa consiste em calcular a seção do condutor e a espessura isolante necessárias. A seção depende do material condutor, da corrente a transportar e do tipo de instalação. O material dielétrico, a seção do condutor e a tensão efetiva determinam a espessura isolante.

Análise dos resultados

A análise dos resultados consiste em comparar o custo de cada alternativa em face das restrições orçamentárias do projeto. No caso de inviabilidade, será necessário redefinir as condições iniciais do projeto, implicando a escolha de novas alternativas e reinício do processo.

Este Catálogo Geral de Cabos Energia objetiva principalmente minimizar o trabalho do projetista quanto à escolha de alternativas e quanto ao dimensionamento. Veja o fluxograma a seguir:

Processo iterativo de escolha do cabo



CAP 3

CONSTRUÇÃO

Examinaremos a seguir os vários componentes dos Cabos de Energia, na mesma ordem de sua fabricação, ou seja, do condutor à capa externa.

CONDUTOR

Dois aspectos devem ser analisados:

- Material a ser utilizado
- Forma geométrica do condutor

Material

Os materiais utilizados atualmente na fabricação de condutores dos cabos elétricos são o cobre e o alumínio.

O cobre, que é o material tradicional, deve ser eletrolítico, ou seja, refinado por eletrólise, de pureza mínima 99,9% (considerando a prata como cobre), recozido (têmpera mole), de condutibilidade 100% IACS (*International Annealed Copper Standard*). Somente em aplicações especiais, torna-se necessária a utilização de cobre de têmperas meio-dura e dura.

O alumínio, normalmente obtido por laminação contínua, vem sendo amplamente empregado como condutor elétrico em virtude principalmente de sua boa trabalhabilidade, menor peso específico e conveniência econômica.

O alumínio puro utilizado em condutores isolados é, normalmente, de têmpera meio-dura e de condutibilidade 61% IACS.

Para uma comparação entre ambos os materiais, calcularemos as seções necessárias de cada um para o transporte de uma mesma corrente.

Esta condição equivale aproximadamente à igualdade das resistências ôhmicas (*), ou seja:

$$R_{cu} = \rho_{cu} \cdot \frac{L}{S_{cu}} = R_{al} = \rho_{al} \cdot \frac{L}{S_{al}}$$
$$\rho_{al} \cdot S_{cu} = \rho_{cu} \cdot S_{al} \quad (1)$$

(*). Dissemos "aproximadamente" porque outros fatores, além da resistência ôhmica, interferem na capacidade de condução de corrente dos cabos.

Como a condutibilidade do alumínio equivale a 61% da condutibilidade do cobre, podemos escrever, com base na relação (1)

$$\frac{S_{al}}{S_{cu}} = \frac{\rho_{al}}{\rho_{cu}} = \frac{100}{61} = 1,64$$

e concluir:

$$\frac{\varnothing_{al}}{\varnothing_{cu}} = \sqrt{1,64} = 1,28$$

Por outro lado:

$$\frac{\gamma_{cu}}{\gamma_{al}} = \frac{8,9}{2,7} = 3,29$$

, o que permite concluir:

$$\frac{M_{cu}}{M_{al}} = \frac{3,29}{1,64} \approx 2$$

Simbologia

R = resistência ôhmica do condutor (Ω/km)

ρ = resistividade do material condutor ($\Omega \cdot \text{cm}$)

S = seção do condutor (mm^2)

\varnothing = diâmetro do condutor (mm)

γ = peso específico (kg/cm^3)

M = massa (kg)

ou seja, para o transporte de uma mesma corrente, o condutor de alumínio terá diâmetro 28% maior que o de cobre, mas, mesmo assim, pesará cerca da metade deste.

A maior limitação ao uso do alumínio como condutor elétrico vinha sendo a confecção de acessórios em face da rápida oxidação do metal quando em contato com o ar e à deterioração de suas propriedades mecânicas, notadamente a resistência à tração, quando deformado. Com o desenvolvimento de novas técnicas de trabalho e linhas de acessórios especiais estes problemas estão hoje resolvidos e os cabos em alumínio têm encontrado ampla aplicação.

CAP 3

CONSTRUÇÃO

FORMA

(tipos de construção)

Há várias alternativas possíveis de construção do condutor de cobre ou alumínio:

Redondo sólido



Solução ideal do ponto de vista econômico; suas limitações estão no aspecto dimensional e na flexibilidade, sendo utilizado, portanto, apenas em seções menores (até 16 mm²). Seu uso no âmbito de cabos de energia está limitado a fios para construções, ou em aplicações especiais.

Redondo normal

(ou condutor de formação concêntrica; ou de formação regular)



Amplamente utilizado em cabos energia singelos ou múltiplos, com qualquer tipo de isolamento.

Apresenta melhor flexibilidade. Constitui-se de um fio longitudinal, em torno do qual são colocadas, em forma de espiral, uma ou mais coroas de fios de mesmo diâmetro do fio central.

As formações padronizadas de cordas normais são:

7 fios-1 + 6

19 fios-1 + 6 + 12

37 fios-1 + 6 + 12 + 18

61 fios-1 + 6 + 12 + 18 + 24

e assim sucessivamente, observando que cada coroa possui um número de fios igual ao número de fios da camada inferior mais seis.

Redondo compacto

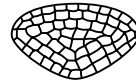


A construção é semelhante à da corda redonda normal; porém, após o encordoamento, sofre um processo de compactação através da passagem da corda por um perfil que reduz seu diâmetro original com deformação dos fios elementares.

A vantagem se traduz na redução de diâmetro externo, eliminação dos espaços vazios na periferia e no interior do condutor e superfície externa mais uniforme (menor área estrelar).

Desvantagem: menor flexibilidade.

Setorial compacto



É fabricado analogamente ao redondo compacto, sendo que o formato do perfil setorial é obtido através da passagem de uma corda redonda normal por jogos de calandras, dimensionadas para atribuir ao condutor o formato setorial adequado, com deformação dos fios elementares.

Pode ser utilizado nos cabos múltiplos (tripolares e quadripolares) traz a vantagem de redução do diâmetro externo do cabo e consequente economia de materiais de enchimento e proteção.

Flexível e extraflexível



Amplamente utilizada em cabos energia singelos ou múltiplos, com qualquer tipo de isolamento. Seu uso também abrange os cabos alimentadores de máquinas móveis (escavadeiras, dragas, pontes rolantes, etc.) ou aparelhos portáteis (máquinas de solda, aparelhos eletrodomésticos, etc.). São obtidos através de encordoamento de grande número de fios de diâmetro reduzido.

Conci



É usado unicamente em cabos OF (óleo fluido). Trata-se de um condutor anular cujo núcleo é oco, formando um canal para o óleo impregnante. É formado por uma ou várias coroas anulares, que por sua vez são formadas por setores anulares (fios Conci) encordoados helicoidalmente.

Existem outros tipos de construções, adotadas para cabos de uso específico. Por exemplo:

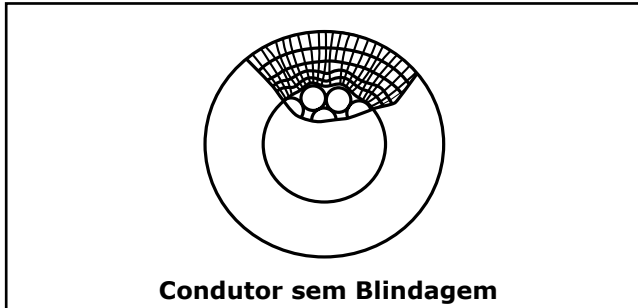
Condutor segmentado (ou condutor Millikan) é um condutor dividido em três ou quatro setores de círculo, separados entre si, por uma parede isolante relativamente delgada. Sua principal aplicação se encontra em cabos singelos de seções superiores a 500 mm², onde, por ação de correntes elevadas, é sensível o efeito pelicular e as correntes de Foucault.

Condutor anular é um condutor redondo, em forma de coroa circular, formado por fios encordoados em redor de um núcleo central de corda têxtil. É empregado para bitolas superiores a 500 mm², nas quais o efeito superficial é considerável (caso de cabos para altas frequências). São também usados em cabos de alta tensão com seção de cobre muito pequena, com o objetivo de aumentar o diâmetro do condutor e reduzir o gradiente de potencial nas proximidades do mesmo.

CAP 3

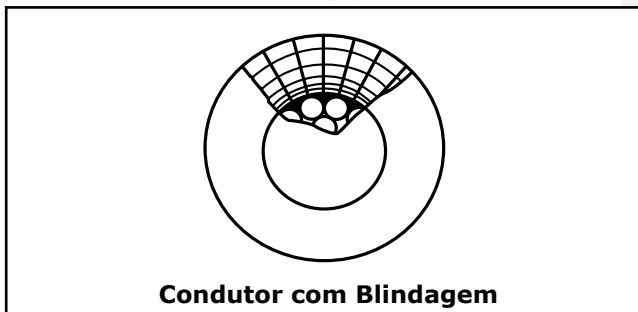
CONSTRUÇÃO

BLINDAGEM SOBRE O CONDUTOR (INTERNA)



Condutor sem Blindagem

Aqui vemos um condutor encordoado recoberto apenas por uma camada isolante. Com esta construção simples o campo elétrico devido à energização, assume uma forma distorcida, acompanhando as irregularidades da superfície do condutor, provocando concentração de esforços elétricos em determinados pontos. Nestas condições, as solicitações elétricas concentradas podem exceder os limites permissíveis pelo isolamento, ocasionando uma depreciação na vida do cabo. Além disso, no caso de cabos com isolamento sólido, a existência de ar entre o condutor e o isolante pode dar origem a ionização, com consequências danosas para o material isolante.



Condutor com Blindagem

Com a interposição de uma camada semicondutora, o campo elétrico se torna uniforme e os problemas são minimizados ou mesmo totalmente eliminados.

Evidentemente, para um perfeito desempenho desta função, a blindagem interna, constituída pela camada semicondutora, deve estar em íntimo contato com a superfície interna do isolamento. No caso de cabos secos (isolamento extrudado) isto é alcançado mediante extrusão simultânea da semicondutora e da camada isolante.

No caso de isolamento estratificado, a blindagem é constituída por fitas de papel semicondutor aplicadas helicoidalmente sobre o condutor.

ISOLAMENTO

Os materiais normalmente utilizados como isolamento dos Cabos Energia são:

SOLIDOS (EXTRUDADOS)	TERMOPLÁSTICOS	PVC (Policloreto de vinila)
	TERMOFIXOS	PET (Polietileno)
		XLPE e TR XLPE ⁽¹⁾ (Polietileno reticulado quimicamente)
ESTRATIFICADOS	- PAPEL IMPREGNADO COM MASSA - PAPEL IMPREGNADO COM ÓLEO FLUÍDO SOB PRESSÃO	

(1) - TR XLPE - Polietileno reticulado quimicamente retardante à arborescência (tree retardant) • (2) - HEPR - Borracha etilenopropileno de alto módulo ou EPR de maior dureza • (3) - EPR 105 - Borracha etilenopropileno para temperatura no condutor de 105°C, em regime permanente

O nosso objetivo aqui é comparar as principais propriedades físicas e elétricas destes materiais.

Até o início da década de 90 cabos com isolamento estratificado foram muito utilizados. São cabos de muita confiabilidade ao longo de sua vida útil (a qual também é elevada), porém com custo e peso superiores a cabos equivalentes de isolamento extrudado. Atualmente sua utilização fica restrita a aplicações especiais bem como a produção que está limitada a poucas fábricas no mundo.

Ao longo do texto, falaremos frequentemente do parâmetro "gradiente". Julgamos oportuno lembrar o significado de tal parâmetro:

Chama-se "gradiente de potencial" (ou "força elétrica"), que se exprime normalmente em kV/mm, a relação entre: a diferença de potencial, ou tensão, aplicada a uma camada elementar de dielétrico e a espessura desta camada.

Sabe-se que o gradiente não é uniforme em toda a espessura do dielétrico. sendo mais elevado nas proximidades do condutor e mais baixo na superfície externa do isolamento,

Fala-se, todavia, em "gradiente médio" que se entende como a relação entre a tensão fase-terra e a espessura total isolante.

A expressão matemática que define o gradiente máximo é:

CAP 3

CONSTRUÇÃO

$$G = \frac{0,502 E_{ff}}{d_i \cdot \log \frac{D_e}{d_i}} \text{ kV/mm} \quad \text{ou} \quad G = \frac{0,869 E_o}{d_i \cdot \log \frac{D_e}{d_i}}$$

Onde:

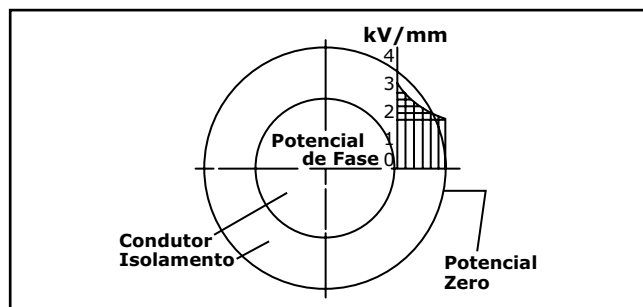
G = gradiente máximo (kV/mm)

Eff = tensão fase-fase (kV)

Eo = tensão fase-terra (kV)

di = diâmetro sob o isolamento (mm)

De = diâmetro sobre o isolamento (mm)



Fala-se também de "gradiente máximo" que corresponde ao gradiente na superfície de contato entre o condutor e o isolamento e de "gradiente-mínimo" em correspondência ao contato entre a superfície externa do isolamento e a terra (ou a blindagem externa que é aterrada).

O gradiente de perfuração do dielétrico, ou rigidez dielétrica, é um dos parâmetros mais importantes na escolha do material isolante. É necessário ressaltar, entretanto, que a rigidez varia de secção para secção ao longo do comprimento do cabo, apresentando uma dispersão considerável em torno de um valor médio.

Esta dispersão será aleatória e proporcional ao número de vazios ou impurezas localizadas no seio do isolamento, que se constituem em sedes de ionização.

Por meio de provas de tensão em amostras, observamos que a dispersão de valores de rigidez é muito menor nos dielétricos estratificados do que nos dielétricos sólidos. Explica-se isto pelo fato de que o método de aplicação do isolamento estratificado e subsequente impregnação, evita a presença de vazios localizados no isolamento, enquanto que o processo de preparação e aplicação dos dielétricos sólidos torna quase impossível garantir a total ausência destes vazios.

Entretanto, a dispersão da rigidez nos dielétricos sólidos pode ser sensivelmente melhorada, mediante um rígido controle das matérias primas, de um equipamento adequado e da limpeza dos locais de preparação e aplicação das massas isolantes.

ISOLANTES SÓLIDOS (EXTRUDADOS)

Os isolantes sólidos se dividem em 2 grandes famílias: termoplásticos (amolecem com o aumento da temperatura) e termofixos (não amolecem com o aumento da temperatura).

Quimicamente, os termoplásticos são polímeros de cadeia linear e os termofixos são polímeros tridimensionais obtidos por vulcanização.

Para orientar a escolha do isolamento adequado, damos a seguir comparações das características mais importantes destes materiais:

Constante de isolamento:

PVC	370 M Ω km à 20°C
PET	12.000 M Ω km à 20°C
XLPE e TR XLPE.....	3.700 M Ω km à 20°C
EPR, HEPR e EPR 105.....	3.700 M Ω km à 20°C

Temperaturas admissíveis

	DE OPERAÇÃO EM REGIME CONTINUO	DE SOBRECARGA	DE CURTO CIRCUITO
PVC	70°C	100°C	160°C
PET	70°C	90°C	130°C
XLPE e TR XLPE	90°C	130°C	250°C
EPR e HEPR	90°C	130°C	250°C
EPR 105	105°C	140°C	250°C

É uma propriedade física das mais importantes, pois se constitui em um fator limitante da capacidade de corrente (ampacidade) do cabo.

Resistência à ionização

A resistência à ionização é medida pelo tempo necessário ao aparecimento de fissuras em amostras do material isolante colocadas em célula especial de provas onde são submetidas a descargas parciais com ionizações intensas.

CAP 3

CONSTRUÇÃO

PVC.....	200 horas
PET	12 horas
XLPE. e TR XLPE.....	12 horas
EPR, HEPR e EPR 105.....	160 horas

Rigidez dielétrica

	RIGIDEZ (kV/mm)		GRADIENTE DE PROJETO (kV/mm)	
	C. A.	IMPULSO	C. A.	IMPULSO
PVC	25	50	2.5	40
PET	40	40	2.5	40
XLPE e TR XLPE	*50	65	4	40
EPR, HEPR e EPR 105	*40	60	4	40

Valores referido a amostras de 10 m de cabos de Φ interno de 12 mm

A espessura isolante pode ser calculada a partir do gradiente de projeto do material, definido com certa margem de segurança a partir de sua rigidez dielétrica.

Perdas dielétricas

As perdas que ocorrem no dielétrico devido à tensão aplicada podem ser calculadas pela seguinte expressão:

$$P = 2\pi fCE^2 \operatorname{tg}\delta \quad \text{ou} \quad P = K E \operatorname{tg}\delta$$

Simbologia

P = perdas (W)	C = capacidade (F)
f = frequência (Hz)	$\operatorname{tg}\delta$ = fator de perdas
E = tensão fase-terra (V)	ϵ = constante dielétrica

	ϵ	$\operatorname{tg}\delta$	$\epsilon \operatorname{tg}\delta$
PVC	5,0	0,06	0,30
PET	2,3	0,0002	0,00046
XLPE e TR XLPE	2,3	0,0003	0,00069
EPR, HEPR e EPR 105	2,6	0,007	0,0182

Na prática, até 1 kV, o PVC é muito utilizado, apesar de suas características elétricas apenas regulares, porque é muito econômico, bastante durável e não propagante da chama.

O polietileno comum, com excelente constante de isolamento, alta rigidez dielétrica e fator de perdas baixíssimo, encontra limitação na baixa resistência à ionização e nas pobres características físicas (é praticamente fluido a 110°C).

O Polietileno Reticulado, obtido por reticulação molecular do polietileno comum, aliás excelentes propriedades deste com a alta temperatura admissível e boas propriedades mecânicas, mas é pouco flexível e tem baixa resistência a ionização. É utilizado em todas as classes de tensão (baixa, média e alta).

Devido à dispersão relativamente alta da sua rigidez dielétrica e também devido ao fenômeno nocivo do "treeing" (*) que tem se verificado com certa frequência neste material, foi desenvolvido mais recentemente o TR XLPE (tree retardant), bem mais resistente a esse fenômeno, permitindo projetos de cabos mais simples.

O EPR (borracha etilenopropileno) é o isolante de desenvolvimento mais recente e bem completo: alta temperatura admissível, ótima resistência à ionização, gradientes de projeto de valores equivalentes ao polietileno reticulado e excelente flexibilidade.

O EPR apresenta baixa dispersão da rigidez dielétrica e é praticamente isento do fenômeno do "treeing", fato que permite utilizá-lo também em cabos submarinos com projetos bem simplificados.

Mais recentemente foram desenvolvidos e são muito utilizados o HEPR um EPR de maior dureza apresentando características físicas mais incrementadas e o EPR 105 utilizado na média tensão, permitindo temperatura de operação permanente ainda maior (105°C).

O conjunto destas características faz com que o EPR possa ser utilizado numa ampla gama de cabos, nas mais diversas aplicações em baixa, média e alta tensão.

(*) arborescências que se formam no material isolante provocando descargas parciais e conseqüente deterioração do mesmo.

CAP 3

CONSTRUÇÃO

ISOLANTES ESTRATIFICADOS

O papel impregnado com massa foi tradicionalmente utilizado em cabos de energia para baixa e média tensão. Este material vem sendo utilizado há muitas décadas em todo o mundo, comprovando uma vida útil excepcionalmente longa.

O papel impregnado com óleo fluído sob pressão também tem apresentado uma vida útil excepcionalmente longa é um dos isolamentos disponíveis para utilização em altíssima tensão.

Porém ambos os cabos somente são utilizados em aplicações muito especiais bem como a produção de ambos está limitada a poucas fábricas no mundo.

Os isolamentos estratificados, pela sua constituição característica, apresentam uma dispersão extremamente baixa da sua rigidez dielétrica. Este fato faz com que o papel impregnado seja por excelência o mais confiável dentre todos os materiais isolantes normalmente utilizados, ou, em outras palavras, o que apresenta menores probabilidades de falhas.

Apresentamos a seguir as principais propriedades destes materiais:

Temperaturas admissíveis

	DE OPERAÇÃO EM REGIME CONTINUO	DE SOBRECARGA	DE CURTO CIRCUITO
Papel impregnado c/ massa	80°C 90°C	85°C 115°C	200°C
Papel impregnado c/ óleo fluído	85°C	105°C	250°C

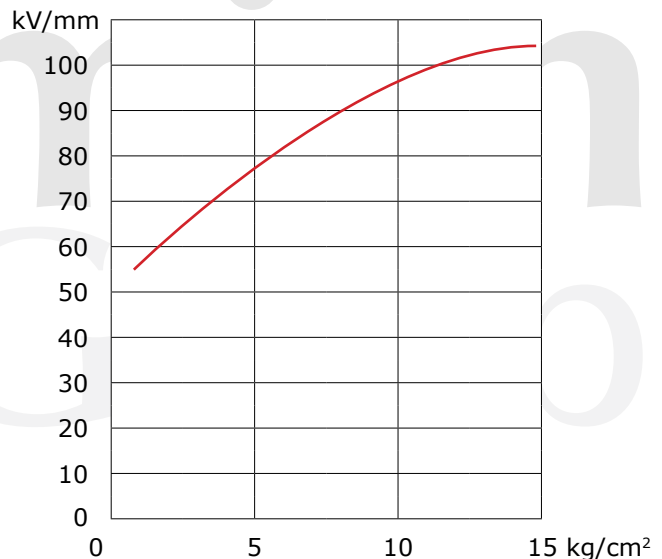
Resistência à ionização

Como os eventuais vazios existentes no seio dos isolamentos estratificados não permanecem localizados, nas condições reais de utilização o fenômeno de ionização praticamente inexistente.

Rigidez dielétrica

	RIGIDEZ (kV/mm)		GRADIENTE DE PROJETO (kV/mm)	
	CA	IMPULSO	C. A.	IMPULSO
Papel impregnado c/ massas	30	75	4	40
Papel impregnado c/ óleo fluído	50	120	10 25	90 100

A rigidez dielétrica dos cabos OF pode ser maior com o aumento da pressão do óleo impregnante, conforme ilustrado no gráfico abaixo.



Perdas dielétrica

	ε	tgδ	εtgδ
Papel impregnado c/ massa	3,7	0,014	0,0618
Papel impregnado c/ óleo fluído	3,3 3,5	0,0018 0,004	0,0059 0,014

Analogamente aos isolantes sólidos, as perdas dielétricas podem ser calculadas pela relação:

$$P = K \cdot \epsilon \cdot \text{tg} \delta \quad (\text{Watts})$$

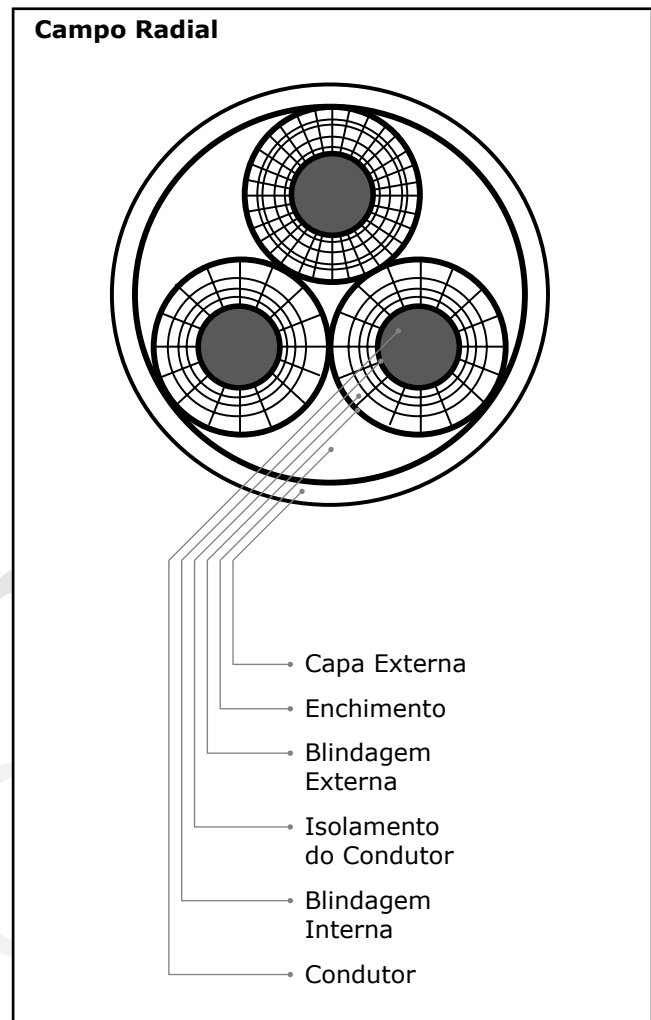
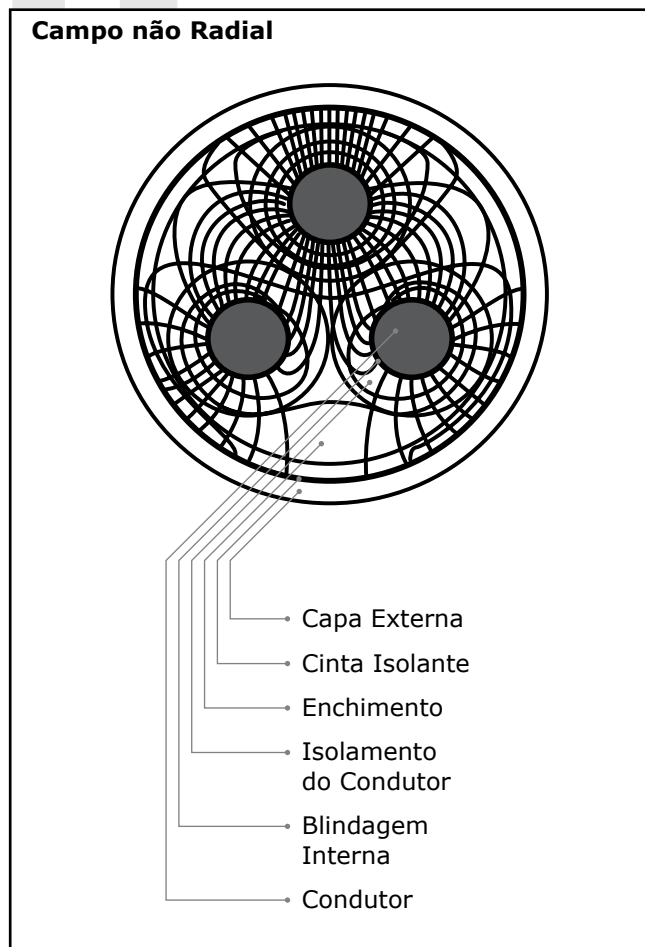
CAP 3

CONSTRUÇÃO

BLINDAGEM SOBRE O ISOLAMENTO (EXTERNA)

A blindagem consiste de uma camada de material semi-condutor e, na maioria dos casos, também de uma camada de material condutor aplicadas sobre a superfície do isolamento. Sua principal finalidade é confinar o campo elétrico dentro do cabo isolado.

Como se pode ver na figura a seguir, o cabo sem blindagem, que denominamos "a campo não radial" apresenta distribuição irregular do campo elétrico, enquanto no cabo blindado, denominado "a campo radial", o campo elétrico distribui-se de forma equilibrada e radialmente em relação ao condutor. A construção a campo radial é preferível, principalmente para tensões mais elevadas, pois garante solicitações elétricas uniformes em cada camada isolante (conjunto de pontos do isolamento equidistantes do condutor).



Do mesmo modo que a blindagem sobre o condutor (interna), a blindagem sobre o isolamento (externa) deve ser construída de maneira a eliminar qualquer possibilidade de formação de vazios entre ela e a superfície do isolamento. Este processo é obtido a partir das seguintes técnicas:

Cabos secos

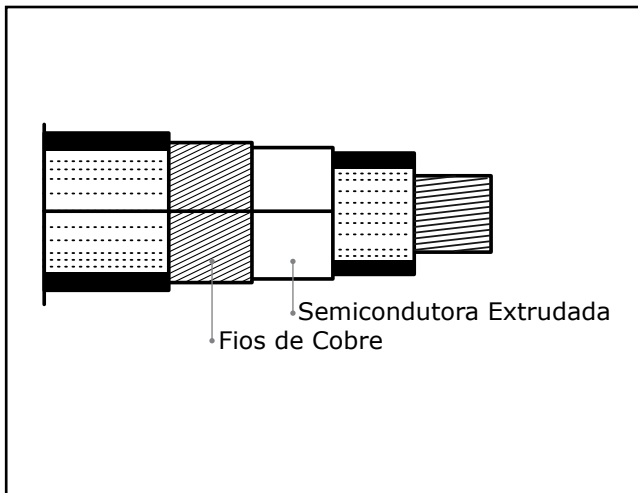
Extrusão simultânea da semicondutora e do isolamento

Nos cabos secos, a camada condutora é constituída de fitas ou fios de cobre e fornece um caminho de baixa impedância para condução das correntes em caso de

CAP 3

CONSTRUÇÃO

curto-circuito. Quando se deseja uma capacidade de condução de corrente bem definida, a construção mais indicada é a de fios, cuja resistência ôhmica é praticamente constante ao longo da vida do cabo, o que não ocorre com as fitas, pois a resistência ôhmica depende essencialmente da condição de contato superficial no remonte das mesmas. Recomendamos, portanto, a blindagem a fios para Cabos de Energia isolados com dieétricos sólidos.



Cabos em papel

Aplicação de papel semi-condutor.

Nestes tipos de cabos, o elemento de baixa impedância é constituído pela capa metálica (chumbo ou alumínio) que os recobre.

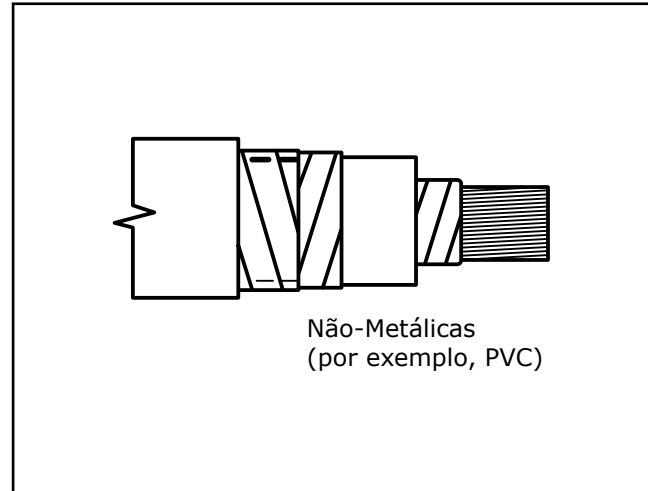
PROTEÇÕES

Distinguem-se dois tipos:

- Não-metálicas
- Metálicas

Proteções não-metálicas

Os Cabos Energia são normalmente protegidos com uma capa não-metálica. Estas capas externas, conhecidas como coberturas, são normalmente feitas a partir de PVC, Polietileno, Neoprene ou de material sem halogênios ("halogen free") e muito baixa toxicidade (LSZH, low smoke zero halogen) conhecido como Afumex®.



Existe, de uma geração mais recente, um tipo de proteção não metálica que substitui com algumas vantagens certas proteções metálicas (armação metálica) no aspecto de proteção mecânica do cabo. É a proteção tipo AIR BAG™, constituída por uma camada de material extrudado resiliente com alta capacidade de absorção de impactos radiais.

A escolha do tipo de proteção não metálica a ser utilizada baseia-se na resistência a ações de natureza mecânica, química e, naturalmente, de meio-ambiente.

Na maioria dos casos, a capa dos cabos com isolamento seco é de PVC, material mais econômico, não propagante de chamas e com resistência suficiente para o uso corrente. O polietileno (pigmentado com negro de fumo para torná-lo resistente à luz solar) é utilizado para instalações em ambientes com alto teor de ácidos, bases ou solventes orgânicos e uso aéreo em postes.

Em cabos de uso móvel, que requerem boa flexibilidade e grande resistência à abrasão e laceração, a cobertura usual é o Neoprene.

Cabos instalados em locais de grande afluência de público (shopping centers, grandes hotéis, hospitais, cinemas, escolas, etc.) requerem cobertura do tipo Afumex®.

Nos cabos isolados em papel, exige-se uma capa metálica do tipo contínuo para assegurar a estanqueidade do núcleo. Emprega-se tradicionalmente o chumbo e mais recentemente o alumínio. Estes materiais são protegidos contra corrosão por uma cobertura não-metálica (PVC ou Polietileno).

CAP 3

CONSTRUÇÃO

Características mecânicas

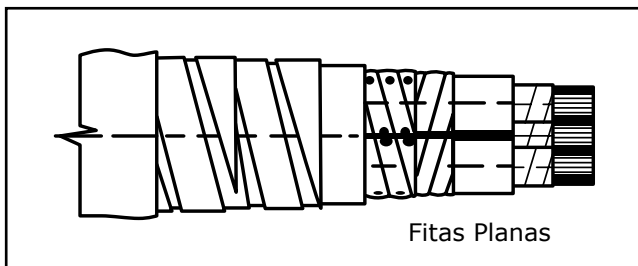
	CARGA DE RUPTURA (kg/mm ²)	ALONGAMENTO À RUPTURA (%)	RESISTÊNCIA À ABRASÃO	RESISTÊNCIA A GOLPES	FLEXIBILIDADE
PVC	1,41	150	BOM	BOM	BOM
PET	0,98	350	BOM	BOM	REGULAR
XLPE	1,26	250	EXCELENTE	EXCELENTE	REGULAR
Neoprene	0,49	250	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE
Afumex®	0,92	120	BOM	BOM	REGULAR

RESISTÊNCIA AOS AGENTES QUÍMICOS						
	ÁCIDOS			ORGÂNICOS		
	SULFÚRICO 3 + 30%	NÍTRICO 10%	CLORÍDRICO 10%	TETRA-CLORETO DE CARBONO	ÓLEOS	GASOLINA
PVC	REGULAR	REGULAR	REGULAR	BOA	REGULAR	BOA
PET	EXCELENTE	BOA	EXCELENTE	BOA	BOA	BOA
XLPE	EXCELENTE	BOA	EXCELENTE	BOA	BOA	BOA
Neoprene	EXCELENTE	REGULAR	MEDÍOCRE	MEDÍOCRE	BOA	REGULAR
Afumex®	REGULAR	REGULAR	REGULAR	BOA	REGULAR	REGULAR

Proteções metálicas

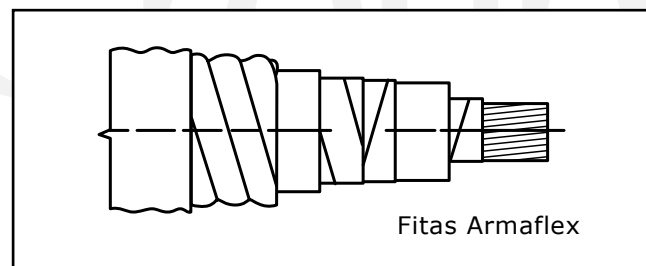
Proteções metálicas adicionais com função de armação são empregadas nas instalações sujeitas a danos mecânicos. Os tipos mais usados são:

Armações de fitas planas de aço, aplicadas helicoidalmente.

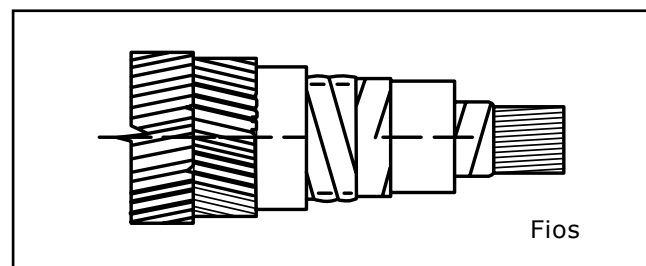


Armações de fitas de aço ou alumínio, aplicadas transversalmente, corrugadas e intertravadas (*interlocked*).

Proteção mais moderna, garante maior resistência aos esforços radiais do que as armações do tipo tradicional de fitas planas, conferem boa flexibilidade ao cabo e dispensam o uso de conduítes flexíveis.



Armações de fios de aço, que são empregadas em cabos que necessitam de resistência aos esforços de tração (cabos submarinos, por exemplo)



CAP 4

DIMENSIONAMENTO

GENERALIDADES

Conforme referido anteriormente, o dimensionamento consiste no cálculo da seção do condutor (bitola) e da espessura isolante necessária.

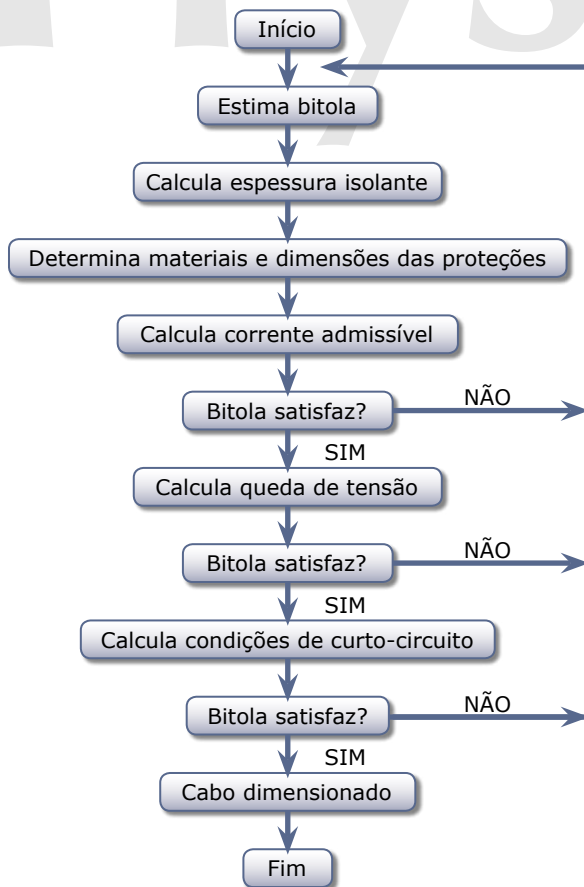
Cálculo da bitola

É feito por um processo iterativo, já que se dispõe de instrumentos teóricos; não para cálculo direto da seção, mas apenas para verificação da capacidade de corrente de um cabo de construção definida. O dimensionamento, portanto, terá que se iniciar por uma bitola estimada.

Espessura isolante

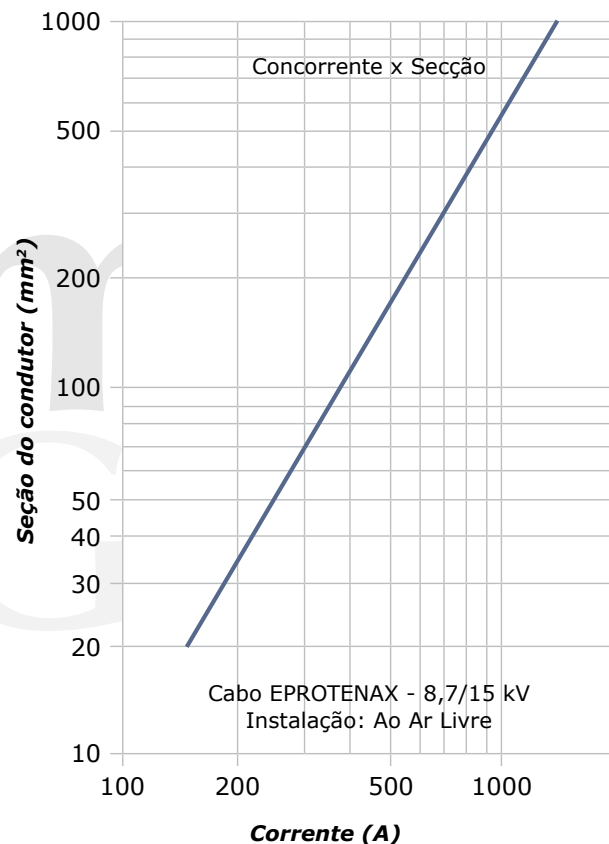
É determinada a partir da seção do condutor, do gradiente de projeto (característico do material isolante) e da tensão efetiva do sistema.

O fluxograma abaixo ilustra as etapas do processo de dimensionamento



ESTIMATIVA DA BITOLA

Para esta estimativa, o projetista dispõe, além de sua experiência acumulada, de tabelas e gráficos de capacidade de corrente para os produtos mais comuns nas instalações usuais. A título de orientação, mostramos a seguir um gráfico de valores de capacidade de corrente em função da seção do condutor, para cabos isolados em Borracha Etileno Propileno (EPR).



CÁLCULO DA ESPESSURA ISOLANTE

A espessura isolante é usualmente fixada pela especificação relativa ao cabo, já considerados todos os fatores de segurança necessários. Seu valor mínimo, entretanto, pode ser facilmente calculado a partir das relações existentes entre tensão, gradiente e dimensões do cabo.

A fórmula de cálculo é deduzida considerando a distribuição do campo elétrico ao redor do condutor supondo que este seja o condutor ideal infinito de Gauss. Nestas condições, o campo elétrico será com-

CAP 4

DIMENSIONAMENTO

pletamente radial e podemos aplicar o Teorema de Gauss à superfície cilíndrica hipotética ao redor do condutor, obtendo:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{h} = \frac{Q}{\epsilon} \quad (1)$$

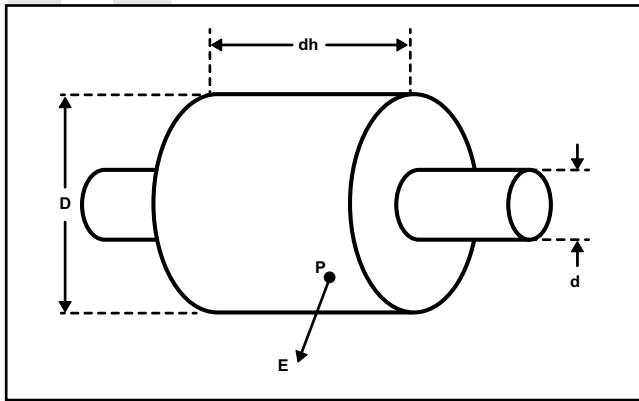
Onde:

Q = cargas (coulombs)

ϵ = constante dielétrica relativa

Sendo E perpendicular à superfície, se reduz a:

$$E \oint ds = \frac{Q}{\epsilon} \quad (2)$$



Fazendo a integração em toda a superfície para um elemento medindo dh no sentido longitudinal, obtemos:

$$E 2\pi r \int dh = \frac{Q}{\epsilon} \quad (3)$$

sendo r = raio do condutor (mm)

Representando nesta equação a distribuição de carga $\frac{Q}{dh}$ pela letra ρ , vem

$$E = \frac{\rho}{2\pi r \epsilon} \quad (4)$$

Por outro lado, sabemos que a diferença de potencial no ponto P, na superfície hipotética, em relação ao condutor é dada por:

$$V - v = \int_r^R \vec{E} \cdot d\vec{e} \quad (5)$$

com e = espessura isolante

Sendo o campo normal ao condutor e considerando a igualdade (4), resulta em:

$$V - v = \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \int_r^R \frac{1}{r} \cdot dr \quad (6)$$

ou, integrando:

$$V - v = \frac{\rho}{2\pi\epsilon} \cdot \ln \frac{R}{r} \quad (7)$$

substituindo o resultado (4) nesta equação, obtém-se:

$$V - v = E \cdot r \cdot \ln \frac{R}{r} \quad (8)$$

Como as proteções metálicas são aterradas, $v = 0$ e podemos reescrever a equação na forma:

$$E = \frac{V}{r} \cdot \frac{1}{\ln \frac{R}{r}} \quad (9)$$

ou

$$E = \frac{0,868V}{d \cdot \log \frac{D}{d}} \quad (10)$$

Nesta equação, a tensão V é a tensão fase-terra e o campo E é o gradiente utilizado no projeto. Para trabalhar com a tensão fase-fase, ela pode ser colocada na forma:

$$E = \frac{0,502V_{ff}}{d \cdot \log \frac{D}{d}} \quad (11)$$

ou, para trabalhar com a tensão de impulso, na forma:

$$E = \frac{0,868 BIL}{d \cdot \log \frac{D}{d}} \quad (12)$$

Como a espessura isolante

$$e = \frac{D - d}{2}$$

concluimos, a partir das equações (10) e (11)

$$e = \frac{d}{2} \left[\text{antilog} \left(\frac{0,868 V}{E \cdot d} \right) - 1 \right]$$

$$e = \frac{d}{2} \left[\text{antilog} \left(\frac{0,502 V_{ff}}{E \cdot d} \right) - 1 \right]$$

expressões que permitem calcular a espessura isolante mínima a partir do diâmetro do condutor, da tensão do sistema e do gradiente máximo de projeto E.

CAP 4

DIMENSIONAMENTO

CÁLCULO DA CORRENTE ADMISSÍVEL

Consideremos um corpo de forma qualquer que se ache à temperatura t do ambiente. Suponhamos que a partir de determinado instante a temperatura de um ponto interno P do corpo seja elevada e mantida no valor T , sendo $T > t$.

Observa-se que a temperatura das regiões do corpo em redor do ponto P começará a subir progressivamente. Se traçarmos idealmente a superfície ocupada pelos pontos que se acham numa determinada temperatura intermediária entre T e t , verificaremos facilmente tratar-se de uma superfície fechada, aproximadamente paralela ao contorno externo do corpo e às superfícies correspondentes às demais temperaturas intermediárias.

Estas superfícies tomam o nome de superfícies isotérmicas e servem para caracterizar a distribuição das temperaturas do corpo. Durante o período de aquecimento, a temperatura em cada ponto do corpo estará subindo, o que significa que cada superfície isotérmica se movimentará em direção à superfície externa. Este período é chamado período variável.

Ao aumentar a temperatura da superfície externa, esta começará a ceder calor ao ambiente, em intensidade tanto maior quanto maior for sua temperatura em relação à do ambiente. Quando a cessão de calor ao ambiente igualar a quantidade de calor recebida no ponto P , chegaremos a um equilíbrio dinâmico: a temperatura da superfície externa permanecerá constante e da mesma forma todas as superfícies isotérmicas internas se imobilizarão.

O calor continua passando do interior para o exterior, mas sem acarretar variações da temperatura dos diversos pontos do corpo. Foi atingido o chamado estado estacionário.

Como não há fluxo de calor entre 2 pontos na mesma temperatura, não haverá componente tangencial do fluxo e este se processará no sentido ortogonal às superfícies isotérmicas.

Esta descrição corresponde à transferência de calor por condução, que é regida pelo postulado de Fourier, cujo enunciado é o seguinte:

“A quantidade infinitesimal de calor dq que no intervalo infinitesimal de tempo $d\theta$ passa através da superfície dS é proporcional a esta superfície, ao tempo, gradiente térmico dt/dx e a um coeficiente K , característico do material constituinte do corpo.”

$$\text{Matematicamente: } \frac{dq}{d\theta} = \frac{-dt}{KdS}$$

Esta expressão é válida tanto para o estado estacionário como para o período variável, já que o tempo considerado é infinitesimal.

O sinal negativo indica que o fluxo de calor ocorre dos pontos de maior para os de menor temperatura, ou seja, no sentido decrescente de t .

O postulado de Fourier tem uma analogia mais do que puramente formal com a lei de Ohm. Com efeito, a lei de Ohm pode ser escrita:

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{onde } R = \frac{\ell}{S \cdot \sigma}$$

sendo: ℓ = comprimento do condutor (km)
 S = seção do condutor (mm²)
 σ = condutividade

e o postulado de Fourier

$$\frac{dq}{d\theta} = \frac{dt}{dx/dS \cdot K}$$

Observando-se que:

I (corrente elétrica) corresponde a $\frac{dq}{d\theta}$ (intensidade do fluxo de calor)

V (diferença de potencial) corresponde a dt (salto térmico)

$R = \frac{\ell}{S \cdot \sigma}$ (resistência elétrica) corresponde a $\frac{dx}{dS \cdot K}$ (resistência térmica)

Assim, o postulado de Fourier se resume em:

intensidade do fluxo de calor = $\frac{\text{salto térmico}}{\text{resistência térmica}}$

Em um cabo conduzindo corrente, haverá aumento de temperatura no condutor, que é um ponto interno, e conseqüente transmissão de calor, conforme descrito. Sabemos que a energia gerada pode ser expressa por: $P = I^2R$, onde a resistência R do condutor é conhecida. Também conhecemos o salto térmico entre a superfície do condutor e o meio ambiente, sendo seu valor máximo definido pela temperatura admissível no material isolante.

CAP 4

DIMENSIONAMENTO

Como as resistências térmicas dos materiais que serão atravessados pelo fluxo de calor são conhecidas, observa-se que o valor de I máximo admissível pode ser calculado.

O Comitê Eletrotécnico Internacional, em sua publicação IEC 60287, sistematizou este procedimento como o mais recomendável para o cálculo da corrente admissível nos cabos, em regime permanente. De acordo com ela, levando em consideração também as perdas de energia em cada uma das camadas que serão atravessadas pelo fluxo de calor, pode-se escrever:

$$\Delta t = (I^2 R + 1/2 W d) T_1 + [(I^2 R (1 + \lambda) + W d) \cdot (T_{2-3} + T_4)]$$

Simbologia:

Δt = diferença de temperatura entre o condutor e o ambiente (°C)

I = corrente no condutor (Ampères)

R = resistência elétrica do condutor (ohm/cm)

Wd = perdas no dielétrico (W/cm)

λ = $\frac{\text{perdas nas proteções metálicas}}{\text{perdas no condutor}}$

T_1 = resistência térmica entre o condutor e a blindagem metálica da isolamento (°C.cm/W)

T_{2-3} = resistência térmica do enchimento, capa interna e cobertura (°C.cm/W)

T_4 = resistência térmica entre a superfície do cabo e o meio ambiente (°C.cm/W)

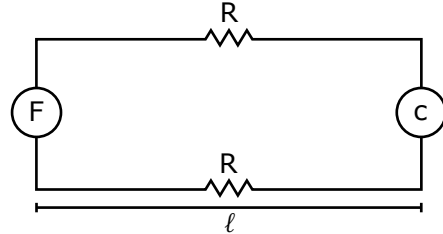
e portanto concluir que:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta t - W d \left[\frac{1}{2} T_1 + (T_{2-3} + T_4) \right]}{R T_1 + R (1 + \lambda) (T_{2-3} + T_4)}}$$

A IEC 60287 contém os métodos de cálculo e as tabelas necessárias para utilização desta fórmula.

CÁLCULO DA QUEDA DE TENSÃO

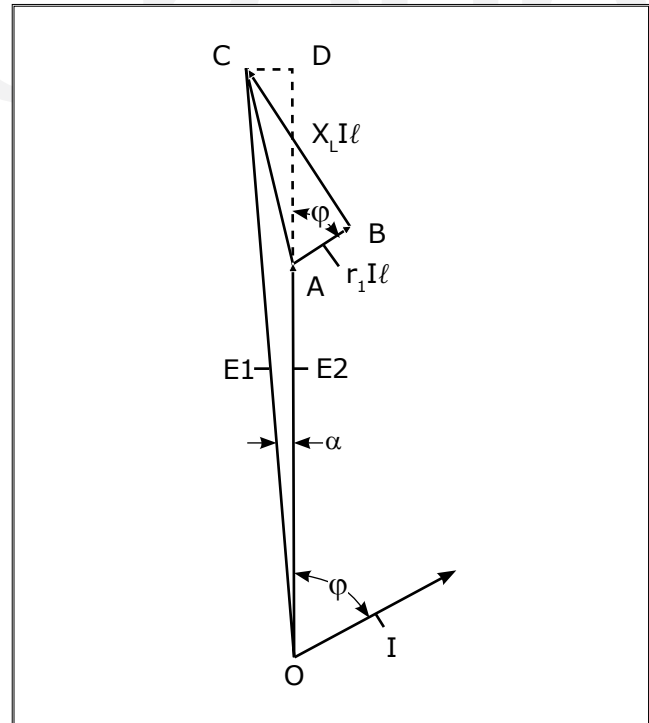
Consideremos uma carga C alimentada por uma fonte F de tensão V a uma distância ℓ . Se a alimentação for feita em corrente contínua,



a Lei de Ohm estabelece que a queda de tensão nos condutores ocasionada pela passagem da corrente pelo circuito será $\Delta V = 2RI$ onde I é a corrente consumida pela carga e R a resistência de cada um dos condutores utilizados na ligação. Em função da resistência r por unidade de comprimento dos condutores, esta igualdade pode ser escrita na forma:

$$\Delta V = 2rI\ell \quad (1)$$

Se a alimentação for feita em corrente alternada considerando carga indutiva e a indutância da linha, o circuito terá que ser analisado pelo diagrama vetorial:



CAP 4

DIMENSIONAMENTO

Simbologia:

E_1 = tensão na fonte (volts)

E_2 = tensão na carga (volts)

I = corrente absorvida pela carga (ampères)

$\cos\varphi$ = fator de potência da carga

X_L = reatância indutiva da linha de alimentação (ohm/km)

r_1 = resistência dos alimentadores em corrente alternada (ohm/km)

ℓ = distância da alimentação à carga (km)

Desprezando o ângulo α , que na maioria dos casos é muito pequeno, o segmento OC pode ser confundido com OD, e a queda de tensão $E_1 - E_2$ com módulo AC, pode ser considerada como tendo módulo AD. Como $AD = r \cdot I \cdot \ell \cos\varphi + X_L \cdot I \cdot \ell \cdot \sin\varphi$ (ver diagrama), podemos escrever (respectivamente para circuitos monofásicos e trifásicos):

$$\Delta V = 2 \cdot I \cdot \ell (r_1 \cdot \cos\varphi + X_L \cdot \sin\varphi) \quad (2)$$

ou

$$\Delta V = \sqrt{3} \cdot I \cdot \ell (r_1 \cdot \cos\varphi + X_L \cdot \sin\varphi) \quad (3)$$

Se o ângulo α não puder ser desprezado, a queda de tensão terá que ser calculada a partir da relação entre E_1 e E_2 , que pode ser facilmente deduzida por relações trigonométricas no diagrama vetorial:

$$E_1 = \sqrt{(E_2 \cdot \cos\varphi + r_1 \cdot I \cdot \ell)^2 + (E_2 \cdot \sin\varphi + X_L \cdot I \cdot \ell)^2} \quad (4)$$

$$E_2 = \sqrt{E_1^2 - (X_L \cdot I \cdot \ell \cdot \cos\varphi - r_1 \cdot I \cdot \ell \cdot \sin\varphi)^2} - (r_1 \cdot I \cdot \ell \cdot \cos\varphi + X_L \cdot I \cdot \ell \cdot \sin\varphi) \quad (5)$$

A queda de tensão máxima admissível nas instalações elétricas de baixa tensão é regulamentada pela ABNT.

Como se pode ver nas equações (2) e (3), a queda de tensão depende do sistema (monofásico ou trifásico), da carga (corrente absorvida I) e do comprimento da instalação (ℓ).

Por outro lado, sabemos que:

$$X_L = 2\pi f L \cdot 10^{-3} \Omega/\text{km}$$

onde

f = frequência em hertz

L = indutância do cabo em mH/km

sendo:

$$L = K + 0,46 \log \frac{2 \cdot S_n}{d_c}$$

com

K = parâmetro que depende do número de fios do condutor (mH/km)

d_c = diâmetro do condutor (mm)

S_n = distância média geométrica dos condutores (mm)

Portanto, a reatância indutiva X_L , e consequentemente a queda de tensão, depende também da disposição dos cabos na instalação, traduzida na distância média geométrica S_n .

Assim, quando verificamos a queda de tensão, estamos na realidade verificando o efeito de todos estes fatores de instalação sobre a seção de cabo necessária. Até 440V esta verificação pode ser de terminante, exigindo uma seção algumas vezes bem maior que a calculada pelo critério térmico.

Segundo a NBR 5410, a queda de tensão não deve exceder os valores da tabela abaixo:

		VALOR MÁXIMO
A	Calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT, no caso de transformador próprio.	7%
B	Calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT, da empresa distribuidora de eletricidade quando o ponto de entrega for aí localizado.	7%
C	Calculados a partir do ponto de entrega, nos demais casos com fornecimento em tensão secundária de distribuição.	5%
D	Calculados a partir dos terminais de saída do gerador, no caso do grupo gerador próprio.	7%

CAP 4

DIMENSIONAMENTO

CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Também as sobrecargas a que os sistemas elétricos estão sujeitos devem ser consideradas quando da determinação da bitola de cabo necessária.

O caso mais crítico é o de curto-circuito, quando o condutor pode ser submetido a sobrecorrentes de alguns kA, ameaçando seriamente a integridade do isolamento.

Para a resolução do problema de curto-circuito em cabos isolados, foram desenvolvidas 2 fórmulas: uma para condutor de cobre e outra para condutor de alumínio.

É importante realçar que a temperatura anormal no condutor persiste por um intervalo de tempo maior que o de duração do curto. Por exemplo, uma corrente de 36.000 ampères em um Cabo Eprotenax 240 mm², eleva a temperatura do cobre de 90°C para 250°C em aproximadamente 1 segundo, mas, com a corrente reduzida a zero o condutor só retornará à temperatura normal de operação depois de 3.000 segundos. O tempo de resfriamento variará com a geometria do cabo e com o local de instalação.

CONDUTOR	FÓRMULA
Cobre	$\left[\frac{I}{S} \right]^2 t = 115679 \log \left[\frac{T_2 + 234}{T_1 + 234} \right]$
Alumínio	$\left[\frac{I}{S} \right]^2 t = 48686 \log \left[\frac{T_2 + 228}{T_1 + 228} \right]$
SIMBOLOGIA	
I = Corrente de curto-circuito (A)	
S = Seção transversal (mm ²)	
t = Tempo de duração do curto-circuito (s)	
T ₁ = Máxima temperatura admissível no condutor em operação normal (°C)	
T ₂ = Máxima temperatura admitida para o condutor no curto-circuito (°C)	

Estas fórmulas se baseiam na energia térmica armazenada no material condutor e no limite máximo de temperatura admitida pelo isolamento. Admite-se ainda que o intervalo de tempo da passagem da corrente de curto-circuito é pequeno, de forma que o calor desenvolvido durante o curto fica contido no condutor.

Geralmente a temperatura do condutor no momento do curto-circuito não é precisamente conhecida, uma vez que depende da carga do cabo e das condições do ambiente. Por motivos de segurança, deve-se adotar a máxima temperatura admissível no condutor nas condições normais de trabalho contínuo do cabo.