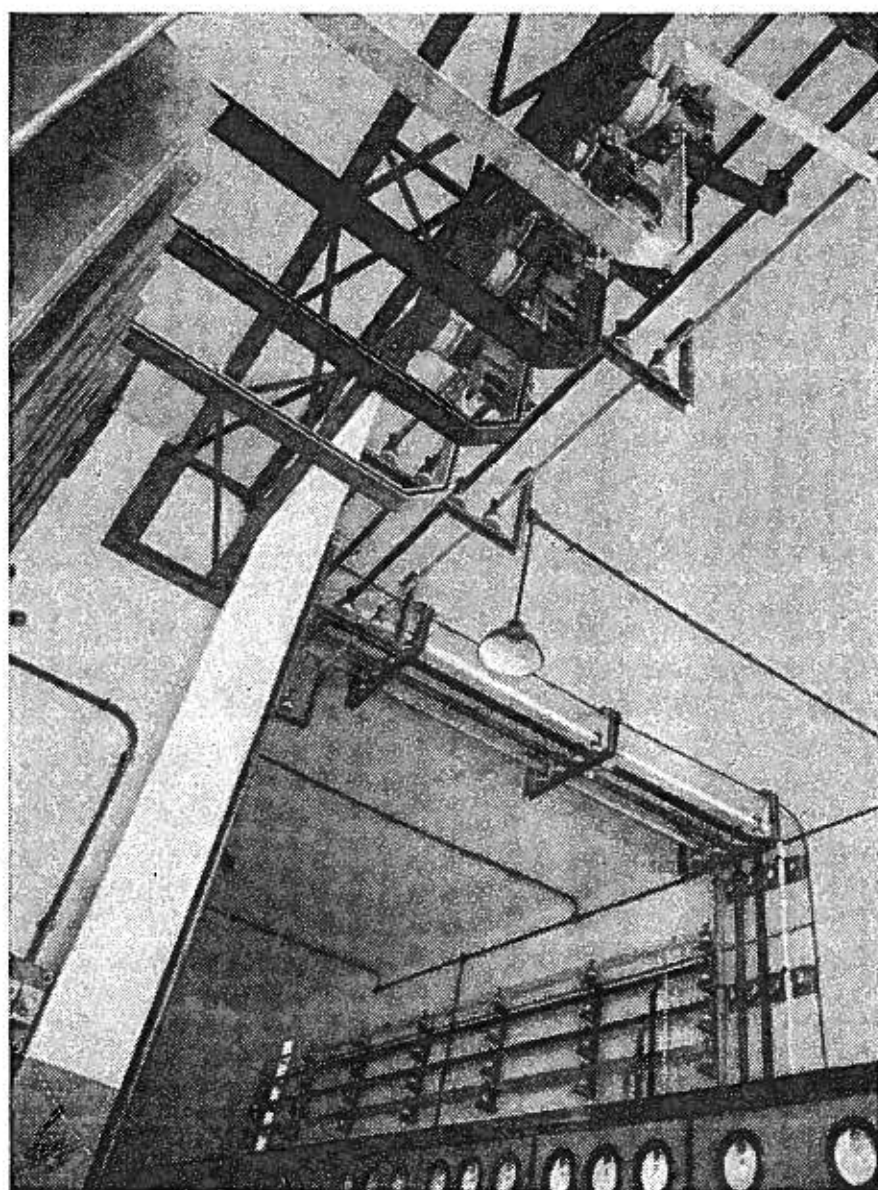


Montagem de condutores nus nas instalações de alta e baixa tensão



(6210)

Montagem de barras num posto de transformação

Depois de estudado o esquema duma instalação eléctrica e determinada a intensidade normal que percorre tanto as barras colectoras como as suas derivações, bem assim a disposição de montagem da aparelhagem, distâncias mínimas entre condutores e entre os seus apoios no sentido longitudinal, é necessário um cálculo cuidadoso tanto do ponto de vista de aquecimento, como dos esforços electrodinâmicos a que esses condutores estão sujeitos, no caso de se dar um curto-circuito na instalação.

1) Aquecimento dos condutores

Os condutores ou barras colectoras sofrem aumento de temperatura quando percorridos quer pela corrente eléctrica normal e permanente, quer pela corrente de curto-circuito anormal que se estabelece com carácter temporário, mesmo de poucos segundos.

Esse aumento de temperatura resulta da perda de energia que se transforma em calor, determinada pela intensidade de corrente que percorre o condutor e pela sua resistência.

O calor desenvolvido depende, portanto, dos valores da intensidade, secção, resistência específica e coeficiente de temperatura do condutor.

Por outro lado, o seu arrefecimento depende da superfície do condutor, sua característica de irradiação, poder de condutibilidade térmica e ambiente.

O calor desenvolvido em calorías será:

$$Q_c = 0,24 \times I^2 \times R = 0,24 \times I^2 \times R_0 (1 + a \times t) \quad (1)$$

Representando:

R = a resistência em ohms a qualquer temperatura.

R_0 = a resistência em ohms a 0° C.

a = o coeficiente de temperatura do metal do condutor.

I = a intensidade da corrente em Ampéres.

t = a temperatura em °C.

Nesta fórmula verifica-se que um pequeno aumento de intensidade tem grande influência, visto esse aumento ser uma função do quadrado da intensidade.

Parte do calor desenvolvido é acumulado no condutor, aumentando-lhe a temperatura, e parte comunicado ao ambiente por contacto, convecção e irradiação.

A capacidade térmica, isto é, o poder de acumulação de calor do condutor, é

[illegible]

representando:

$P =$ o peso do condutor.

$c =$ o calor específico.

A irradiação do calor é:

$$A = S \times c_a \quad (3)$$

portanto dependente da superfície S e do factor c_a que toma em consideração o poder de irradiação de calor, correntes de ar, temperatura ambiente, etc.

Quando um condutor é submetido à passagem da corrente, observamos que a sua temperatura, a partir, do estado frio, aumenta rapidamente, como nos mostra a figura 1, o que se explica pela sua grande capacidade térmica e pequena diferença de temperatura entre o condutor e o ar ambiente.

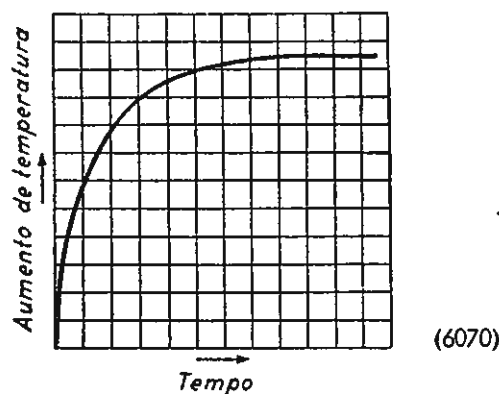


Figura 1

À medida que a sua temperatura aumenta, diminui a sua capacidade térmica, a irradiação começa a aumentar devido à diferença de temperatura entre o condutor e o ambiente, de forma que, passado algum tempo, a temperatura mantém-se constante, desde que constante se mantenha também a intensidade.

**2) Características do cobre empregado nos condutores nus
para barras colectoras e suas derivações**

Emprega-se exclusivamente cobre electrolítico laminado, semi-duro,
com as seguintes características :

Peso específico

$$\gamma = 8,87 \text{ a } 8,91 \text{ (em média } 8,9) \text{ g/cm}^3$$

Condutividade (Condutância específica) a 20° C.

$$\sigma = 56 \text{ a } 58 \text{ (em média } 57) \frac{\text{m}}{\text{ohm mm}^2}$$

Resistividade (Resistência específica) a 20° C.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 0,0178 \text{ — } 0,01724 \text{ (em média } 0,0175) \frac{\text{ohm mm}^2}{\text{m}}$$

Temperatura de fusão °C

$$\vartheta_s = 1083 \text{ °C}$$

Resistência à tracção

$$\sigma_z = 3800 \text{ kg/cm}^2 \text{ (duro)}; \sigma_z = 2100 \text{ kg/cm}^2 \text{ (recosido)}$$

Limite aparente de elasticidade a frio (0,2 % de alongamento)

$$\sigma_s = 3800 \text{ kg/cm}^2$$

Resistência à flexão admissível a quente

$$\sigma_b = 1200 \text{ kg/cm}^2$$

Módulo de elasticidade

$$E = 1\,200\,000 \text{ a } 1\,300\,000 \text{ kg/cm}^2$$

Coeficiente de alongamento

$$\alpha = \frac{1}{E} = 0,000083 \text{ a } 0,000077$$

Limite real de elasticidade (0,01 % de alongamento)

$$\sigma_e = 22000 \text{ kg/cm}^2$$

Calor específico

$$c = 0,0938 \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$$

$$c = 3,45 \frac{\text{Ws}}{\text{cm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Constante de aquecimento 1)

$$C = 172$$

Constante do material 2)

$$k = 0,0058$$

Coefficiente de temperatura, a 20° C

$$\alpha = 0,0039 \text{ a } 0,004$$

Coefficiente de dilatação térmica por °C

$$(0 - 100 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad \varepsilon_t = 16,5 \times 10^{-6}$$

$$(100 - 200 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad \varepsilon_t = 17,5 \times 10^{-6}$$

Condutividade calorífica

$$\lambda = 0,92 \frac{\text{cal}}{\text{cm seg } ^\circ\text{C}} = 3,85 \times \frac{\text{Wseg}}{\text{cm seg } ^\circ\text{C}}$$

3) Perfis dos contadores nus

Os tipos de perfis usados, quer para barras colectoras, quer para as ligações entre estas e a aparelhagem, são os seguintes:

- a) Com **secção rectangular**, tanto quanto possível montados com a face maior no sentido vertical, e formando conjuntos, quando montadas as barras em paralelo, devendo ficar sempre, entre barras, um espaço mínimo igual à espessura das barras, para facilitar o seu arrefecimento.

$$1) \quad C = \frac{\rho}{\tau} = \frac{\text{Resistividade a } 50 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{Calor específico a } 50 \text{ } ^\circ\text{C}} \text{ sendo } \tau \text{ em } \frac{\text{Ws}}{^\circ\text{C} \times \text{cm}^3} \text{ Factor de con-}$$

versão para kcal / kg : 1 Ws = 0,000 239 kcal : 1 kcal = 4190 Ws.

2) Constante do material:

$$k = \frac{\rho_0}{4,19 \times \gamma \times c} = \frac{\text{Resistividade à temperatura inicial } 20^\circ \text{ C}}{4,19 \times \text{peso específico} \times \text{calor específico em kcal / kg.}}$$

- b) Com a **secção em forma de U**, para grandes intensidades, como substituto de 3 ou mais barras em paralelo, com a vantagem de oferecerem maior resistência mecânica e maior superfície de arrefecimento.
- c) Com **secção circular**, para pequenas intensidades e curtas distâncias entre apoios.
- d) **Tubos**, como substituto da secção circular, com a vantagem de economia em peso e maior resistência mecânica à flexão, para uma dada secção.

Os tubos são muito usados em instalações de subestações ao ar livre, com grandes distâncias entre apoios e tensões elevadas, devido ao «efeito de pele», tanto maior quanto maior for a frequência em corrente alternada, visto não ser uniforme a densidade de corrente nos diferentes pontos da secção, diminuindo essa intensidade da periferia para o interior do condutor.

4) Perfis usados em função de tensão de serviço

Em geral, os tipos de perfis mais usados são os seguintes :

- a) **Instalações de baixa tensão** : barras de quadros para pequenas intensidades — barras de secção rectangular; derivações e ligações de aparelhagem entre si — barras de secção rectangular ou de secção circular.
- b) **Quadros blindados de baixa tensão** : barras colectoras e ligações da aparelhagem entre si — barras de secção rectangular e circular.
- c) **Instalações de alta tensão interiores até 30 kV** : barras de secção circular e rectangular.
- d) **Instalações de alta tensão ao ar livre** : barras colectoras e derivações — cabos de alumínio com alma de aço para grandes vãos, em geral com a secção de 185 a 240 mm². Para pequenos vãos : tubos com o diâmetro exterior de 30 mm até 60 kV e 50 a 60 mm até 220 kV.

Quanto ao emprego de tubos, convém verificar a flecha, para que se não torne a instalação desagradável à vista, se esta for exagerada.

$$f = \frac{1}{185} \times \frac{P \times l^3}{E \times I} \quad (4)$$

I = momento de inércia em cm^4 (Ver tabela n.º 13).

$$f = \frac{1}{185} \times \frac{64,50 \times 242,3 \times 10^6}{1150 \times 10^3 \times 15,40} = 4,77 \text{ cm.}$$

Quando de grandes distâncias entre apoios, convém, portanto, evitar a montagem de condutores de secção circular, pelo menos de

pequena dimensão, e a de barras rectangulares com a maior dimensão horizontalmente.

Os regulamentos em vigor exigem a máxima distância entre apoios de 1,5 metros, porém, em instalações de tensões elevadas, quando as barras são montadas sobre as celas, nem sempre é possível manter as condições rígidas dos regulamentos, sendo mesmo necessário, devido à resistência mecânica, prever secções maiores do que as indispensáveis do ponto de vista de aquecimento.

Em geral as barras são fabricadas em comprimentos de 4 a 7 metros, por razões de facilidade de transporte e muitas vezes precisam de ser emendadas.

As ligações e derivações nos condutores de secção circular, fazem-se, em geral, por meio de terminais concêntricos, que dão perfeito contacto eléctrico e fácil montagem ou desmontagem.

As figuras 2 a 6 mostram, em corte, a forma de construção de vários tipos de terminais concêntricos ¹⁾.

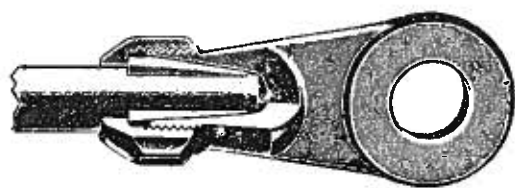


Figura 2

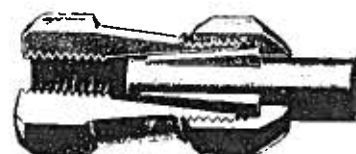


Figura 3

Embora os condutores de secção circular facilitem muito a montagem, têm o inconveniente de não oferecerem tanta resistência mecânica como as barras de secção rectangular, ou em U, contra os esforços electrodinâmicos, quando dum forte curto-circuito.

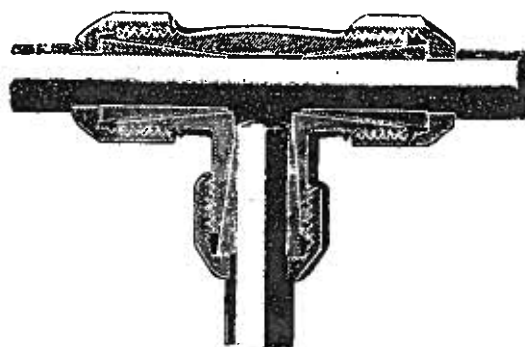


Figura 4

Deve-se evitar, tanto quanto possível, a montagem de barras ou outros condutores nus, com cantos vivos, bem assim torcer as barras em espiral.

1) Para tamanhos e dimensões consultar a nossa lista de materiais n.º 0225, pág. 215.

Devem igualmente evitar-se as emendas de barras e, quando tenham de se executar, empregar juntas sobrepostas de preferência às de topo, donde resulta economia de material, menor possibilidade de aquecimento e diminuição na resistência de contacto.

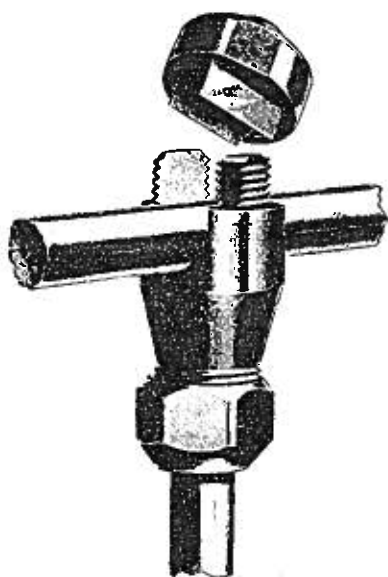


Figura 5 (6031)

Está provado ser desnecessário a estanagem dos condutores de cobre no sítio das emendas à excepção dos locais onde existem gases corrosivos, pois a resistência de contacto depende especialmente da pressão de encosto e rugosidade da superfície.

A passagem da corrente faz-se por pontos, portanto uma superfície lisa e pulida é mais prejudicial do que a rugosa, a qual apresenta mais pontos de contacto.

A superfície de contacto deve ser bem limpa e desoxidada.

Com poucos parafusos, mas bem apertados, consegue-se melhor contacto do que com muitos mal apertados e fracos, os quais

nem sempre ficam apertados por igual.

Como é indispensável, portanto, um bom aperto, indispensável é também usar parafusos de aço de grande resistência mecânica, porém não devem ser apertados de tal forma que seja ultrapassado o limite de alongamento do material empregado.

Quando de intensidades superiores a 3 000 Ampéres, os parafusos devem ser de aço anti-magnético.

Há vantagem em que as porcas dos parafusos sejam providas de anilhas de pressão de aço,

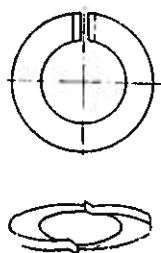


Figura 7 (6057)

como mostra a Figura 7, obtendo-se assim maior segurança, especialmente em locais sujeitos a trepidações, como acontece nas ligações a disjuntores para grandes intensidades, com corte rápido.

Nos condutores de alumínio, as ligações precisam de ser revistas de tempos a tempos e apertados os parafusos.

Quando se trata de perfis rectangulares, especialmente de grandes secções, as derivações podem ser apertadas por placas ¹⁾ dos tipos representados nas figuras 8 e 9.

É condição essencial que nestas peças se não formem circuitos magnéticos e por isso as placas devem ser de material não magnético, em geral de latão ou bronze.

As derivações podem ser apertadas por parafusos, tornando-se assim mais económicas.

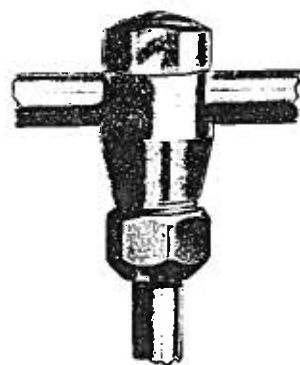


Figura 6 (6032)

¹⁾ Para tamanhos e dimensões consultar a nossa lista de materiais n.º 0225, pág. 220

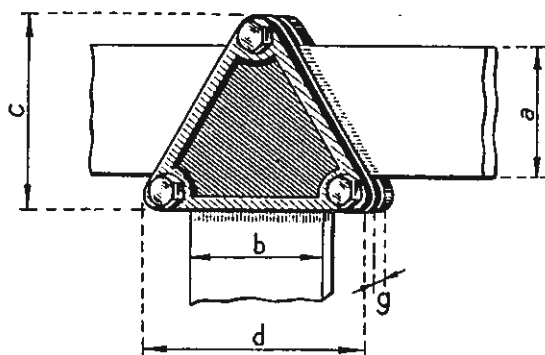


Figura 8

(5295)

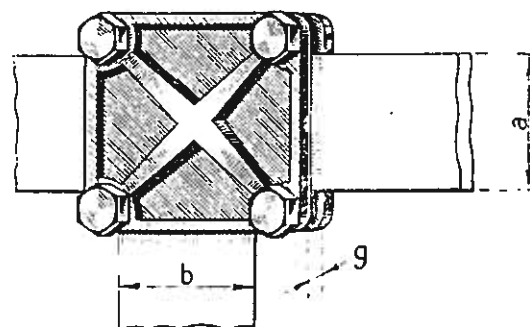


Figura 9

(5290)

Quando se trate de ligações de topo, são empregados contrafortes com parafusos, ou então são as barras sobrepostas, como nos mostram as figuras e tabelas n.ºs 4 e 5. A tabela n.º 6 mostra as dimensões para derivações entre barras e aparelhagem.

Em geral as barras, no sítio das ligações, incluindo as cabeças dos parafusos e porcas, são pintados com tinta à base de alumínio; porém existe o inconveniente de ficar a pintura defeituosa, no caso de ser preciso apertar ou desapertar os parafusos de ligação.

A firma alemã I. G. Farben Industrie, fabrica uma tinta própria para as ligações, de cor vermelha, que se torna preta quando a temperatura sobe a 80-85° C e volta à cor primitiva quando a temperatura desce. Desta forma se verifica com facilidade, ao inspeccionarem-se as ligações, se estas aquecem demasiadamente 1).

No caso de as ligações não serem pintadas, convém usar parafusos, porcas e anilhas cadmiadas, para não ganharem ferrugem.

Quando as barras são de grande comprimento, devido à sua dilatação, provocada pelo aquecimento, convém estabelecer ligações flexíveis, a fim de evitar esforços demasiados sobre os isoladores de suporte, etc.

1) A firma Badische Anilin und Sodafabrik A. G. de Ludwigshafen/Rhein fornece várias tintas denominadas «Termocolor» com os seguintes resultados :

| Termacolor N.º | Cor natural | Cor no estado quente | Temperatura de aquecimento °C |
|-------------------|-------------|-------------------------|----------------------------------|
| 1 | rosa | azul | 40 |
| 2 | verde claro | azul | 60 |
| 2 b | rosa | azul | 95 |
| 3 | amarelo | violeta | 110 |
| 4 | púrpura | azul | 140 |

Nas derivações, este caso não é, em geral, de supor, quando os condutores são curvados com raio suficientemente grande.

Quando de grandes intensidades, podem-se estabelecer campos magnéticos que provocam aquecimentos e trepidações nas armações metálicas próximas, como seja o caso de vigas de betão armado dos edifícios, etc.

Nas armações metálicas de quadros ou celas de alta tensão, é indispensável também, quando de grandes intensidades, passarem as barras das fases por uma só abertura, para não se estabelecerem circuitos metálicos fechados em volta dum condutor.

As flânjias de passa-muros serão também, para as grandes intensidades, construídas em metal não magnético, ou em metades, de forma a não se encostarem e, quando da sua fixação a chapas metálicas, estas terão um rasgo entre os três furos, pela mesma razão.

As derivações de pequena secção, em geral feitas com condutores isolados até 6 mm² de secção, para circuitos auxiliares, são feitas com garras especiais ¹⁾ que facilitam muito a montagem, dispensando o trabalho de furar as barras. A figura 10 mostra um exemplo.

A fixação das barras colectoras aos isoladores de suporte é feita por meio de garras, como representadas nas figuras 11 a 13, quando se trata de secções circulares ou pequenas secções rectangulares, e como nas figuras 14 a 16 quando de grandes secções e barras montadas em paralelo ²⁾.

Deve-se ter em consideração que, nas ligações de condutores, existem duas qualidades de parafusos.

Temos feito referência até aqui somente aos que se destinam a apertar uma barra contra a outra, ou uma barra contra uma peça de contacto qualquer, como seja a parilha de um interruptor, etc., portanto para estabelecer um bom contacto entre duas faces conductoras, não se pretendendo que a passagem de corrente seja feita exclusivamente

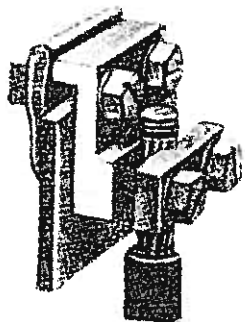


Figura 10
(6052)

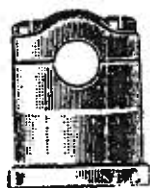


Figura 11

(6028)



Figura 12

(6045)



Figura 13

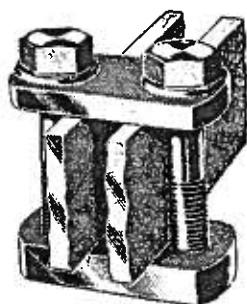
(6029)

através do corpo do parafuso, e assim se justifica que o material de que é constituído o parafuso, porca e anilha, seja de aço.

1) Para tamanhos e dimensões consultar a nossa lista de materiais n.º 0326, pág. 206.

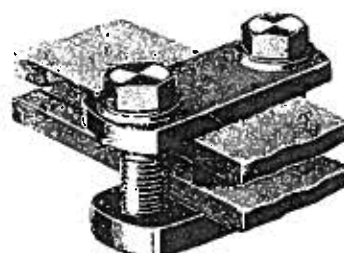
2) Para tamanhos e dimensões consultar a nossa lista de materiais n.º 0258, pág. 200 e 201.

Há contudo parafusos condutores de corrente, como nos passa-muros, por exemplo, e nestes casos o corpo do parafuso será de cobre ou latão laminado, devidamente dimensionado para a corrente que tem de conduzir.



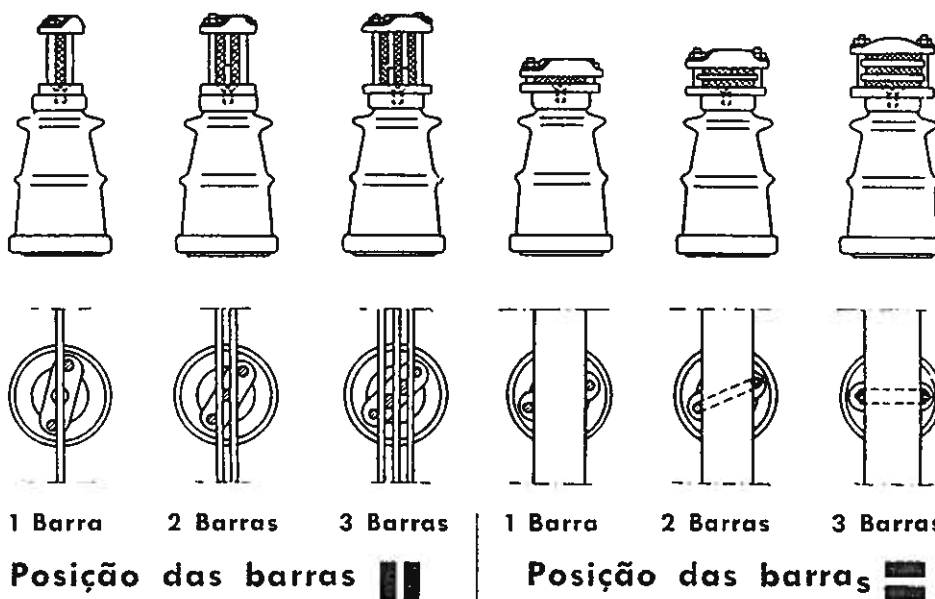
(6033)

Figura 14



(6044)

Figura 15



(5214)

Figura 16

Neste caso, as porcas e anilhas terão de ser de latão, bem facejadas e desoxidadas, bem assim as barras ou condutores que apertam, para evitar uma grande resistência de contacto entre a face das porcas ou anilhas e o condutor.

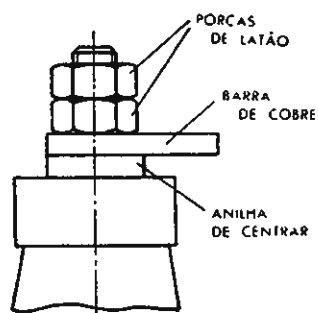
Como segurança contra o desaperto empregam-se então contra-porcas, com a vantagem de se aumentar a superfície de contacto entre as faces da rosca do parafuso e estas.

As figuras 17 a 20 mostram exemplos de ligação de barras aos pernos de isoladores passa-muros ¹⁾.

1) Para tamanhos e dimensões consultar a nossa lista de materiais n.º 0471.

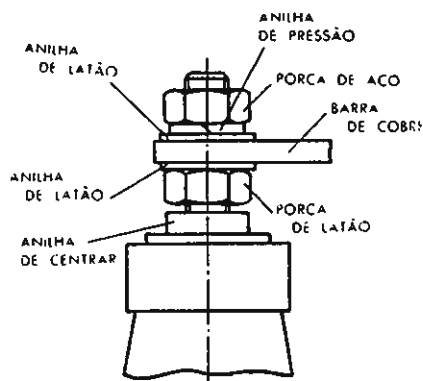
Para maior segurança, os pernos condutores de corrente são com rosca métrica fina, ou de tubo Whitworth, vulgarmente chamada rosca de gás.

A tabela n.º 2 indica os diâmetros usados, em função da intensidade.



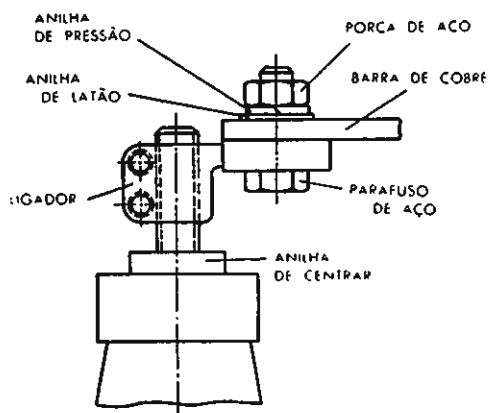
(6053)

Figura 17



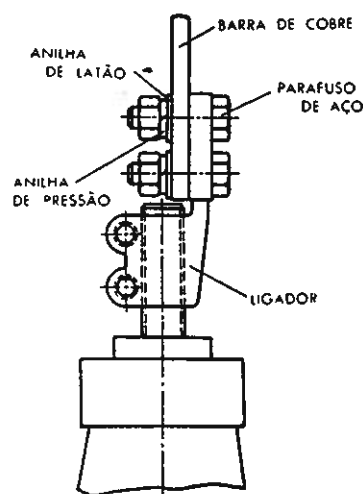
(6054)

Figura 18



(6055)

Figura 19



(6056)

Figura 20

7) Esforços sobre os apoios, devidos à dilatação das barras

Quando da montagem de barras colectoras com grande comprimento, tem de tomar-se em consideração quer a dilatação, quer a contracção que nestas se pode dar por alteração não só da temperatura ambiente, como do aumento de temperatura que nas mesmas se estabelece, devido à carga permanente, ou quando de sobrecarga motivada por curto-circuito.

Essa dilatação, ou contracção, pode exercer fortes esforços nos pontos rígidos de apoio ou fixação, que ficam assim sujeitos a forças anormais de tracção, compressão e flexão.

Designando :

- l_0 — o comprimento da barra à temperatura ϑ_0 .
 l_{\max} e l_{\min} — o comprimento a maior e menor temperatura, respectivamente.
 ϑ_{\max} — a soma das temperaturas, ambiente ϑ_r (máximo 35° C) e aquecimento a carga normal ϑ_d (30° C).
 ϑ_k — a temperatura final da barra em caso de curto-circuito.
 Δl — a alteração do comprimento da barra em metros.
 ε — o coeficiente de dilatação linear para :

| | |
|----------|--------------------------|
| Cobre | 0 — 100° C = 0,000017 |
| | 100 — 200° C = 0,0000175 |
| Alumínio | 0 — 100° C = 0,000024 |
| | 100 — 200° C = 0,0000258 |

Assim teremos :

Em geral :

$$\Delta l = (l - l_0) = l_0 \times \varepsilon (\vartheta - \vartheta_0) (5)$$

Para aquecimento :

$$\Delta l_w = (l_{\max} - l_0) = l_0 \times \varepsilon (\vartheta_{\max} - \vartheta_0) (6)$$

Para arrefecimento :

$$\Delta l_k = (l_0 - l_{\min}) = l_0 \times \varepsilon (\vartheta_0 - \vartheta_{\min}) (7)$$

A diferença de temperatura a admitir para o cálculo da dilatação das barras deverá ser a mínima no inverno, sem carga, e a máxima do ambiente no verão (cerca de 35° C), bem assim o aumento de temperatura da barra acima do ambiente de 30° C, para a plena carga desta em Ampères, segundo os dados da tabela adiante indicada.

Para um caso de curto-circuito, as barras devem ser calculadas, segundo as normas alemãs, para um aumento máximo de temperatura de 200° C acima do ambiente, como adiante se menciona.

Exemplo : Uma barra de cobre de 60×10 mm, com comprimento de 20 metros, montada numa subestação, à temperatura de 0° C no inverno, chega a alcançar a temperatura a plena carga de 30° C acima do ambiente de 35° no verão, ou seja, portanto, uma diferença de 65° C. Qual foi a dilatação da barra ?

Pela fórmula (6) temos :

$$\Delta l_w = l_0 \times \varepsilon \left(\vartheta_{\max} - \Delta_0 \right)$$

$$\Delta l_w = 20 \times 0,00017 \times 65 = 0,0221 \text{ m} = 22,1 \text{ mm}$$

Se no caso de um curto-circuito a barra atingir a temperatura de 200° C acima do ambiente, teríamos uma dilatação de:

$$\Delta l_w = 20 \times 0,0000175 \times 235 = 0,082 \text{ m} = 82 \text{ mm}$$

Com os resultados obtidos em face das fórmulas (6) e (7), podemos agora calcular o esforço F em kg sobre os pontos de apoio ou fixação das barras, partindo do princípio de que a fixação é rígida, ou seja:

$$F = S \times E \times \frac{\Delta l_s}{l_s} \text{ cm kg.} \quad (8)$$

representando

Δl_s – a alteração do comprimento da barra em cm entre dois apoios.

l_s — a distância entre dois apoios em cm.

S — a secção da barra em cm^2 .

E — o módulo de elasticidade:

para cobre = 1150 000 kg/cm².

para alumínio = 560 000 kg/cm².

No caso de arrefecimento (contração) o esforço é evidente, porém quando de aquecimento (dilatação) o esforço calculado pode ser menor, se a barra flectir, como nos mostra a figura 21,

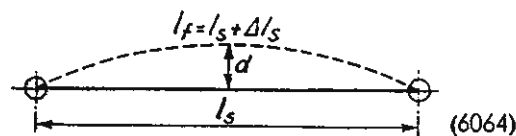


Figura 21

o que pode acontecer quando o valor de F for superior à carga de encurvadura da barra (F_k) sendo:

[illegible]

em que I representa o momento de inércia em cm^2 .

Havendo portanto uma flexão da barra, o valor de F será igual a F_k , donde resulta :

$$F = F_k = \frac{\pi^2 \times E \times I}{l_f^2} = \frac{10 \times E \times I}{l_f^2} \dots \dots \dots (10)$$

sendo, como nos mostra a fig. 38 :

$$l_f = l_s + \Delta l_s$$

A flexa d em cm pode ser calculada segundo a fórmula :

$$d = \sqrt{\frac{2 \times E \times I \times (l_f' - l_s'')}{F \times l_s^2}} \dots \dots \dots (11)$$

sendo F o valor em kg obtido segundo a fórmula (8).

Exemplo: Qual será o esforço sobre os apoios distanciados entre si de 2 metros, e a flecha no caso do exemplo anterior, quando a barra dilata 22 mm ?

Como a barra dilata 22 mm em 20 metros, temos, para 2 metros

$$\Delta l_s = \frac{22}{20} \times 2 = 2,2 \text{ mm} = 0,22 \text{ cm.}$$

A secção da barra é

$$S = 60 \times 10 = 600 \text{ mm}^2 = 6 \text{ cm}^2$$

e segundo a fórmula (8) temos o esforço

$$F = S \times E \times \frac{\Delta l_s}{l_s} = 6 \times 1150000 \times \frac{0,22}{200} = 7620 \text{ kg}$$

Pela tabela 12 temos, para a secção rectangular da barra, o momento da inércia :

$$I = 0,0833 \times h \times b^3 = 0,0833 \times 6 \times 1^3 = 0,4998 \text{ cm}^4$$

donde resulta a carga de encurvadura, segundo a fórmula (9):

$$F_k = \frac{E \times I}{l_s^2} = \frac{1150000 \times 0,4998}{200^2} = 14,4 \text{ kg.}$$

Como F é maior que F_k sofrerá uma flexão, e, portanto, temos:

$$l_f = l + \Delta l_s = 200 + 0,22 = 200,22 \text{ cm}$$

donde resulta, segundo a fórmula (10), o verdadeiro esforço sobre os apoios:

$$F = F_k = \frac{10 \times E \times I}{l_f^2} = \frac{10 \times 1150000 \times 0,4998}{200,22^2} = 143 \text{ kg.}$$

A flecha, ou seja a encurvadura da barra, será então, segundo a fórmula (11):

$$\begin{aligned} d &= \sqrt{\frac{2 \times E \times I \times (l_f^2 - l_s^2)}{F \times l_s^2}} = \\ &= \sqrt{\frac{2 \times 1150000 \times 0,4998 \times (200,22^2 - 200^2)}{7620 \times 200}} = \\ &= 0,815 = 8 \text{ mm} \end{aligned}$$

Tanto a dilatação como a contracção dos condutores rígidos provocam, portanto, como verificamos, um esforço sobre os apoios ou pontos de fixação na aparelhagem, que tende a afastá-los ou aproximá-los no sentido do comprimento do condutor.

Como os apoios, quer dos condutores, quer da aparelhagem, são em geral constituídos por isoladores de porcelana e sendo esta muito tenaz, com facilidade podem partir quando os esforços provocados pelas diferenças da temperatura nos condutores não são compensados.

Devemos contudo notar que as dilatações e contracções dos condutores se fazem lentamente, em regime normal de trabalho, permitindo assim que os esforços se propaguem lentamente às estruturas, o que dá certa flexibilidade às peças de fixação da aparelhagem, que vão flectindo sem choque.

Quando de um curto-circuito, aumentando a temperatura dentro de poucos segundos, resultam então esforços muito maiores, tanto nos condutores como nos seus apoios, e muitas vezes atribuem-se certas avarias aos efeitos electrodinâmicos, quando na verdade se deviam atribuir aos esforços provocados pelo aumento de temperatura nos condutores.

A fim de se evitarem, tanto quanto possível, as reacções provocadas pelas diferenças de temperatura, as barras colectoras não devem ter comprimentos superiores a 20 metros, o que nem sempre é possível. Empregam-se então ligações de dilatação, usadas, também, nas ligações de disjuntores acima de 1000 Amperes, com corte rápido, a fim de as vibrações se não transmitirem a outra aparelhagem através das barras de ligação.

Estas ligações são constituídas por uma série de lâminas do mesmo metal, com cerca de 0,2 a 0,5 mm de espessura, em forma de V, com a mesma largura das barras colectoras, soldadas nos extremos e apertadas convenientemente às barras.

A tabela 3 mostra as dimensões normais destas juntas de dilatação, as quais devem ter a mesma secção das barras.

A figura 22 mostra uma disposição muito prática da forma de fixação de barras colectoras aos isoladores de apoio, a qual permite a dilatação do condutor, sem exercer esforços sobre o isolador ¹⁾.

Quando de várias barras em paralelo, o espaçamento entre as mesma faz-se por calços de material antimagnético, sendo o aperto feito sobre estes e assim a barra corre livremente no sentido do comprimento.

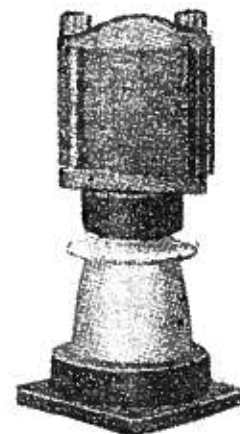


Fig. 22 (6047)

8) Secções de condutores nus em função da intensidade normal permanente

Segundo as normas estabelecidas, admite-se em geral para os condutores nus o aumento de temperatura de 30° C acima da temperatura ambiente de 30° a 35° C, isto é, totalizado 60° a 65° C.

A fim de se evitar um aumento exagerado da temperatura das barras, é conveniente prever a montagem destas de forma que o ar possa circular ou subir livremente, para o que as paredes ou celas de protecção devem ficar bastante afastadas da barra.

As barras devem ser pintadas com uma ou mais camadas de tinta de óleo, o que facilita a irradiação do calor desenvolvido. Quando de barras em paralelo, basta que seja pintada a face exterior do conjunto.

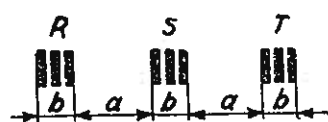
As tabelas N.ºs 7 a 11 indicam as cargas normais e permanentes para condutores de cobre, sendo as barras rectangulares montadas com a face maior ao alto e, horizontalmente, no sentido longitudinal.

1) Para tamanhos e dimensões, consultar a nossa lista de materiais n.º 0258.

Quando montadas verticalmente, até cerca de 3 metros, podemos admitir os valores indicados nas tabelas, porém, se o comprimento exceder 3 metros, esses valores deverão ser multiplicados por 0,85 a 0,9.

Quando as barras são montadas com a face maior horizontalmente, os valores da tabela 9 devem reduzir-se, segundo as indicações da tabela 10.

As cargas admissíveis, indicadas na tabela 9, são baseadas no caso de a distância entre cada pacote de barras de fases diferentes ser



$$a = 10 \times b$$

Fig. 23 (6073) representando, como indica a fig. 23,

a = a distância entre fases

b = a largura total de cada pacote de barras.

Para $\frac{a}{b} < 10$ são igualmente válidos os valores da citada tabela porém, se tivermos $\frac{a}{b} > 10$, os valores das cargas admissíveis devem ser multiplicados pelo factor k , nunca devendo ser $\frac{a}{b} < 2$.

| $\frac{a}{b}$ | k |
|---------------|------|
| 2 | 0,80 |
| 3 | 0,85 |
| 4 | 0,88 |
| 5 | 0,92 |
| 6 | 0,95 |
| 7 | 0,97 |
| 8 | 0,98 |
| 9 | 0,99 |
| 10 | 1,00 |

Para facilidade da montagem empregam-se frequentemente duas barras em paralelo, sendo esta disposição a mais vantajosa no que diz respeito a perdas.

O espaço entre barras, quando se prevê duas ou três barras em paralelo, faz-se em geral igual à espessura das barras.

Quando de grandes intensidades em corrente alternada a 50 c/s, empregando-se mais de duas barras em paralelo, a corrente não se

distribui uniformemente pelas várias barras, além de que se estabelecem correntes de Foucault provocando aquecimento, convindo assim, em alguns casos, instalar vários jogos de barras em paralelo (ver figura 24).

Está provado que, em corrente alternada, a densidade da corrente é maior nas barras exteriores, bem assim nos cantos destas, quando se trata dum conjunto de barras em paralelo.

As correntes de Foucault aumentam quase proporcionalmente à frequência e condutividade do material, e proporcionalmente ao quadrado da secção.

Para grandes intensidades, a melhor solução é a de 4 barras em paralelo, devendo escolher-se a distância entre a segunda e terceira maior que entre a primeira e segunda, e a terceira e quarta.

Não traz grande vantagem passar a distância de 10 a 30 mm, e de preferência não baixar de 50, mesmo melhor 70 mm, que se traduz numa diferença de intensidade por barra de cerca de $\pm 7\%$. A carga por barra será, então:

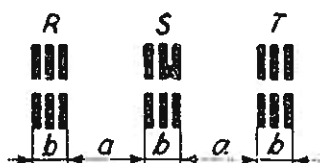


Fig. 24 (6074)

| Barra | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------------------|------|------|------|------|
| Correntes em % da carga total | 26,7 | 23,3 | 23,3 | 26,7 |

Um conjunto de 7 barras em paralelo, por exemplo, daria uma distribuição da carga ¹⁾.

| Barra | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------------------------------|------|------|-----|-----|-----|------|------|
| Corrente em % da carga total . . | 25,6 | 14,2 | 7,5 | 5,5 | 7,5 | 14,2 | 25,6 |

Os valores para jogos de 4 barras em paralelo da tabela 9 estão previstos para a distância das barras interiores de 50 mm.

Modernamente, quando 4 barras em paralelo não são suficientes, empregam-se perfis em U.

Uma possibilidade de transmitir grandes intensidades seria o emprego de barras grossas e portanto em menor quantidade; porém a

1) Ver «Comunicações ao Congresso VDE 1935» — Dr. Johann, pág. 71.

$\sigma_x = 48 - 36 - 18$ para bronze, com a resistividade de 0,020 - 0,027 - 0,055 respectivamente.

Em face dos valores das cargas admissíveis e secções indicadas nas tabelas, obtemos a carga específica

$$i = \frac{I}{S} = \frac{\text{Amp.}}{\text{mm}^2}$$

Verifica-se pelas tabelas que a carga específica para o cobre varia entre 4 e 0,8 Amp/mm², sendo tanto menor quanto maior for a secção, a quantidade de barras em paralelo, e a espessura da barra em relação à sua largura.

Além disso as barras pintadas, tendo a vantagem de se poderem identificar as fases com mais facilidade, podem ainda sobrecarregar-se com cerca de 10 %, como se verifica pelas cargas respectivas indicadas nas tabelas.

Nas instalações de corrente alternada com a frequência de 16.2/3 podemos admitir as cargas para corrente contínua indicadas nas tabelas 7 a 11.

Quando se trata de frequências superiores a 50 c/s, as cargas a admitir devem calcular-se segundo a fórmula :

$$I_x = I \times \sqrt{\frac{50}{f}} \dots \dots \dots (15)$$

sendo f a frequência dada.

9) Aquecimento dos condutores devido à intensidade permanente de curto-circuito

No caso de se dar um curto-circuito na rede, a intensidade nos condutores atinge um valor tal que pode ser um múltiplo da intensidade nominal de plena carga. Esse valor depende das características da rede e da central que alimenta a instalação, e ainda da distância onde se der o curto-circuito, em relação à fonte de energia.

A irradiação do calor desenvolvido nos condutores é praticamente nula, devido à rapidez com que a intensidade aumenta na ocasião do curto-circuito, havendo portanto condições diferentes das que se apresentam quando de cargas permanentes. E assim a temperatura desenvolvida nos condutores do circuito de que as barras fazem parte, pode

atingir tais valores que o material de que são constituídos perde as suas características de resistência mecânica.

Num condutor com a condutância específica σ , tendo o comprimento l e a secção S , se passar pelo mesmo a intensidade I , durante t segundos, desenvolve-se uma quantidade de calor, como já vimos no capítulo 1:

$$Q_e = \frac{I^2 \times l}{S \times \sigma} \times t \dots \dots \dots (16)$$

em Watts/segundo.

Representando:

ϑ — o aumento de temperatura durante t segundos.

P — o peso do condutor.

c — o calor específico.

resulta o calor acumulado:

$$P \times c \times \vartheta$$

ou seja,

$$4190 \times P \times c \times \vartheta \text{ (Watts/segundo)}$$

e assim temos:

$$\frac{I^2 \times l \times t}{S \times \sigma} = 4190 \times P \times c \times \vartheta$$

Se introduzirmos nesta fórmula o peso específico γ do material do condutor, e substituirmos

$$\frac{I}{S} = i$$

ou seja pela densidade de corrente, temos:

$$\vartheta = \frac{i^2 \times t}{4,19 \times c \times \gamma \times \sigma} = \frac{i^2 \times t}{C} \dots \dots \dots (17)$$

sendo C a constante de aquecimento ¹⁾.

Por esta fórmula verifica-se que o aquecimento depende das características do material empregado e da densidade de corrente, não tendo entrado em consideração a forma da secção do condutor.

1) Ver capítulo 2.

Para simplificação do cálculo, admite-se como nula a irradiação de calor, e a condutância específica entra com valor constante, embora na verdade esta varie com a temperatura, porém, para os limites de temperatura que entram na prática, pode-se considerar constante o valor de σ .

Se todavia desejarmos um cálculo mais exato ¹⁾, teremos de partir da hipótese que a resistência do condutor aumenta com a temperatura segundo a fórmula aproximada :

$$r_{\vartheta} = r (1 + \alpha \times \vartheta)$$

donde resulta o aumento de temperatura :

$$\vartheta = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\frac{\alpha \times i^2}{m} \times t}{e} - 1 \right)$$

sendo

$$m = 4,19 \times c \times \gamma \times \sigma$$

e - a base do logarítmo neperiano ou natural.

Esta fórmula não é, contudo, empregada na prática.
Para vários materiais, temos :

| | Cobre | Alumínio | Zinco | Ferro |
|--|-------|----------|-------|-------|
| Calor específico $\frac{\text{k cal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \dots c$ | 0,093 | 0,21 | 0,094 | 0,11 |
| Peso específico $\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \dots \gamma$ | 8,9 | 2,7 | 7,2 | 7,8 |
| Condutância específica à 50 $^\circ\text{C}$ $\frac{\text{m}}{\text{ohms mm}^2} \dots \sigma$ | 50 | 31 | 14 | 6 |
| Constante de aqueci- mento $^\circ\text{C}$ | 172 | 74 | 40 | 21 |

¹⁾ Ludwig Binder — Elektrotechnische Zeitschrift 1916, pág. 590.

A seguinte tabela indica, para diferentes densidades de corrente, o aumento de temperatura em graus C durante 1 segundo.

Para tempo superior multiplicam-se os valores da tabela pelo tempo dado.

| Condutor | Densidade de corrente em Amp./mm ² | | | | | | | | | |
|-------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| | Graus centígrados por segundo | | | | | | | | | |
| Cobre . . | 0,6 | 2,3 | 5,2 | 9,3 | 15 | 21 | 28 | 37 | 47 | 58 |
| Alumínio . | 1,4 | 5,4 | 12 | 22 | 34 | 49 | 71 | 86 | 110 | 135 |
| Zinco . . . | 2,6 | 10 | 22 | 40 | 65 | 90 | 120 | 160 | 200 | 250 |
| Ferro . . . | 4,8 | 19 | 43 | 76 | 120 | 172 | 230 | 304 | 385 | 476 |

Em geral toma-se a máxima temperatura admissível ϑ para dada intensidade de curto-circuito permanente I_p (valor eficaz) e assim a fórmula (17) tem a expressão:

$$t = \frac{\vartheta \times S^2 \times 172}{I_p^2} \text{ para cobre (17 a)}$$

$$t = \frac{\vartheta \times S^2 \times 74}{I_p^2} \text{ para alumínio (17 b)}$$

ou então determina-se a secção mínima do condutor:

$$S = \sqrt{\frac{I_p^2 \times t}{172 \times \vartheta}} \text{ para cobre (17 c)}$$

$$S = \sqrt{\frac{I_p^2 \times t}{74 \times \vartheta}} \text{ para alumínio (17 d)}$$

Segundo as normas VDE a temperatura máxima dos condutores nus não deve ultrapassar 200° C, para cobre, e 150° C para alumínio ¹⁾,

1) Para cabos armados com condutores de cobre, em média. . . = 150° C.
 Para transformadores de intensidade = 190° C.
 Para bobinas de relés directos de sobre-intensidade = 190° C.

conforme já foi atrás mencionado. Se introduzirmos estes valores nas fórmulas (17c) e (17d), temos finalmente :

$$S = \frac{I_p}{185} \times \sqrt{t} \text{ para cobre (200° C) (17 e)}$$

$$S = \frac{I_p}{105} \times \sqrt{t} \text{ para alumínio (150° C) (17 f)}$$

Conforme já se fez notar, estas fórmulas são baseadas no caso de o calor desenvolvido ficar contido no condutor e para uma intensidade de curto-circuito permanente, o que é admissível para a duração do curto-circuito de 0,5 a 5 segundos ¹⁾.

Em muitas redes de distribuição, os disjuntores são providos de mecanismo automático, de forma a serem ligados novamente passados alguns segundos, duas ou mais vezes, sempre que disparem por sobre-intensidade, mantendo-se o curto-circuito que o faz desligar.

Este facto, que pode acontecer, tem de tomar-se em consideração, introduzindo-se nas fórmulas (17c) e (17d) o factor k , igual ao número de vezes que os disjuntores se previram para tornarem a ligar, mesmo que o curto-circuito se mantenha (em geral $k = 3$), e então essas fórmulas passam a :

$$S = \sqrt{\frac{I_p^2 \times t}{172 \times \vartheta}} \times k \text{ para cobre (17 g)}$$

$$S = \sqrt{\frac{I_p^2 \times t}{74 \times \vartheta}} \times k \text{ para alumínio (17 h)}$$

Este factor pode contudo ser inferior, quando se dá um intervalo de tempo entre cada nova ligação, de forma a permitir uma curta dissipação de calor nos condutores.

¹⁾ Segundo H. Buchholz, Aquecimento de condutores — Revista de Matemática e Mecânica aplicada. 1927 — Caderno n.º 4.

10) Efeito da intensidade inicial de curto-circuito

Quando se trata de curtas distâncias entre a fonte de energia (como seja o caso de uma central ou subestação de grande potência) e o ponto onde se pode dar um curto circuito, precisamos então de contar com os efeitos da corrente de curto-circuito inicial, devido à pequena impedância da linha de alimentação.

Sendo a corrente de curto-circuito inicial superior à corrente de curto-circuito permanente, podemos compensar de forma prática, na fórmula (17) e seguintes, essa diferença para mais, com um aumento fictício do tempo de curto-circuito considerado, e que designamos por Δt , isto é:

$$t_k = t + \Delta t$$

Contamos, portanto, com maior duração do curto-circuito, e mantemos constante o valor da intensidade de curto-circuito permanente I_p .

O valor Δt é aproximadamente:

$$\Delta t = \left(\frac{I_a}{I_p} \right)^2 \times T \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (18)$$

sendo :

I_a = a intensidade inicial de curto-circuito (valor eficaz) em Amperes.

T = a constante de tempo de gerador em que podemos admitir:

$T = 0,3$ a $0,1$ segundos no caso de curto-circuito trifásico;

$T = 0,6$ a $0,2$ segundos no caso de curto-circuito entre duas fases.

diminuindo os valores com a relação entre a distância da fonte de energia e o ponto onde se der o curto-circuito.

A fórmula (17) passa portanto a:

$$\vartheta' = \frac{i_p^2 \times (t + \Delta t)}{C} = \frac{i_p^2 \times t_k}{C} \dots \dots \dots (19)$$

sendo : i_p a densidade de corrente de curto-circuito permanente.

Dada a densidade de corrente num condutor, em função da sua secção e intensidade de curto-circuito permanente, bem assim a duração do curto-circuito em segundos, podemos, segundo o ábaco de Kesselring (Fig. 25), determinar o aumento de temperatura.

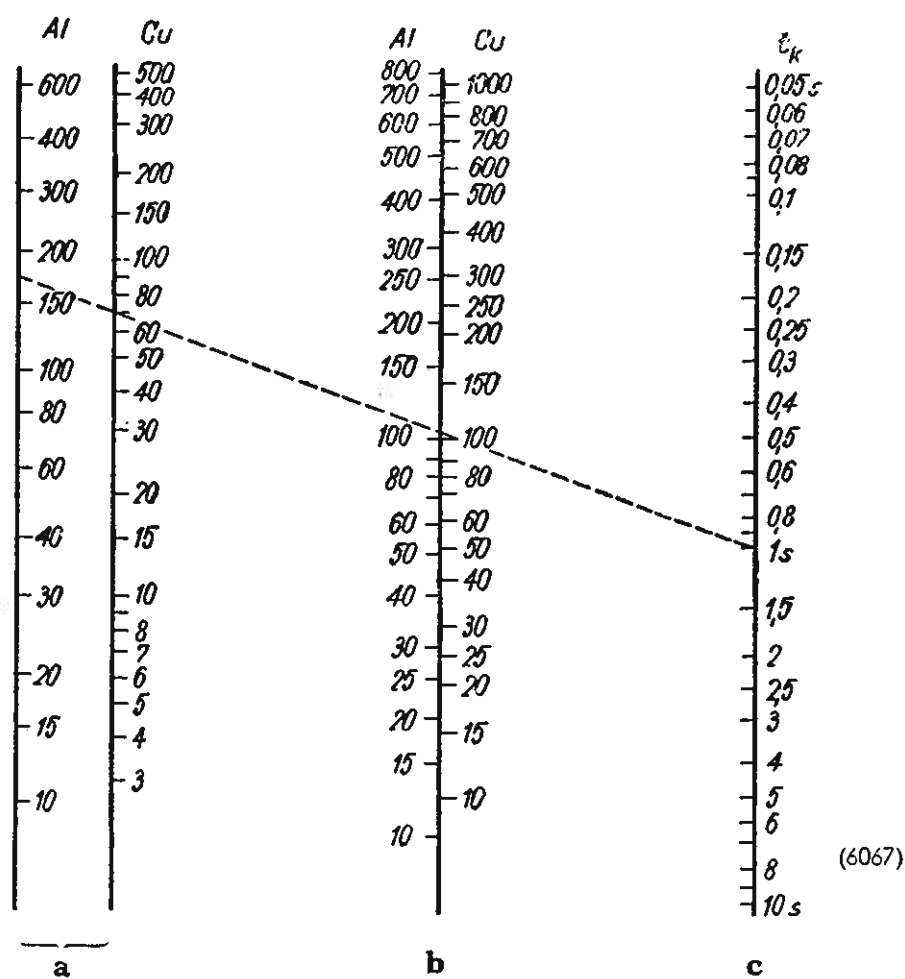


Figura 25

Ábaco de Kesselring para determinar o aquecimento de condutores nus de cobre e alumínio, em função de intensidade de curto-circuito

- a) Elevação de temperatura em graus C.
- b) Densidade de corrente A/mm²
- c) Duração do curto-circuito, $t_k = t + \Delta t$

As figuras 26 e 27 indicam-nos os valores das secções de condutores nus, em função da intensidade de curto-circuito permanente I_p .

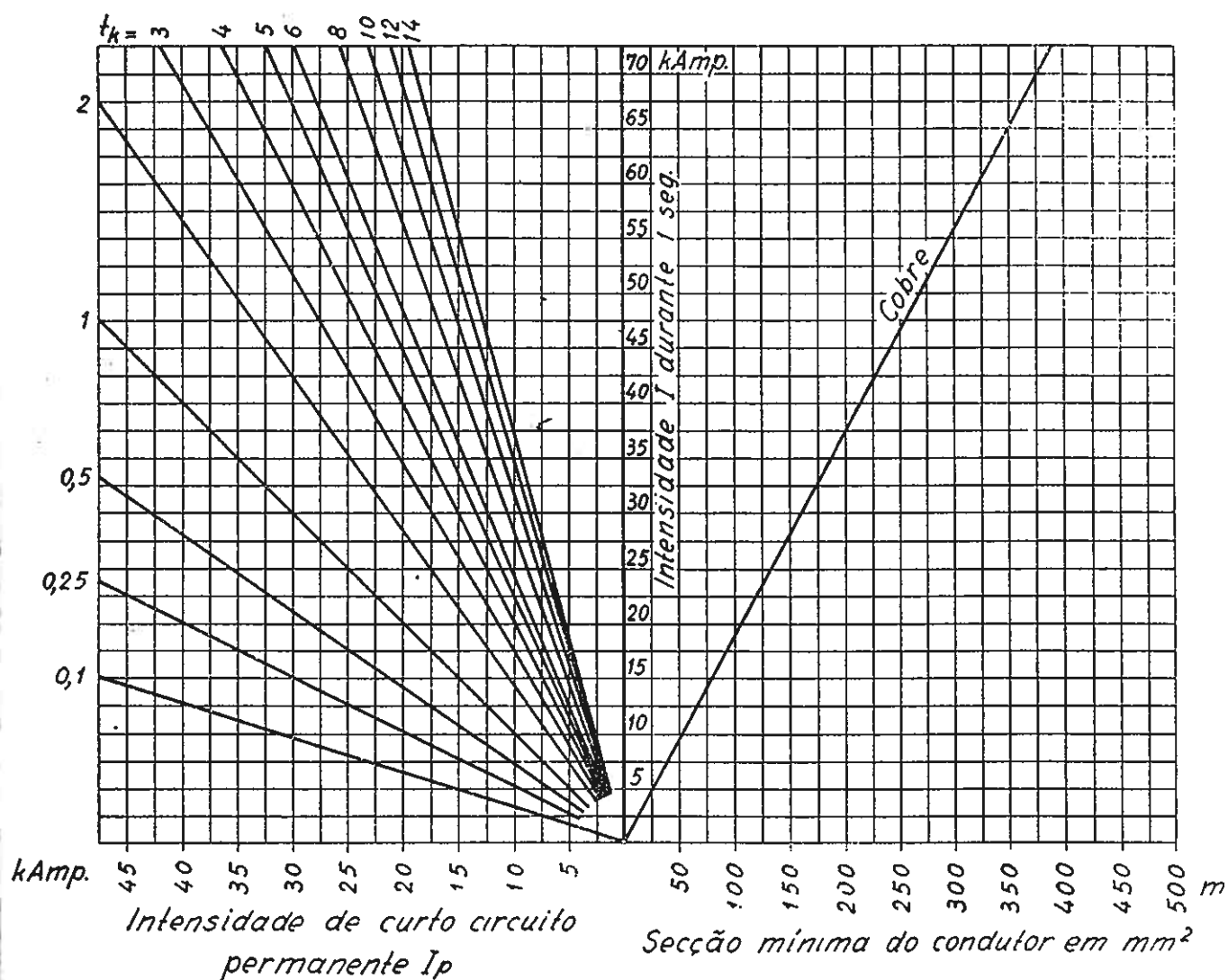
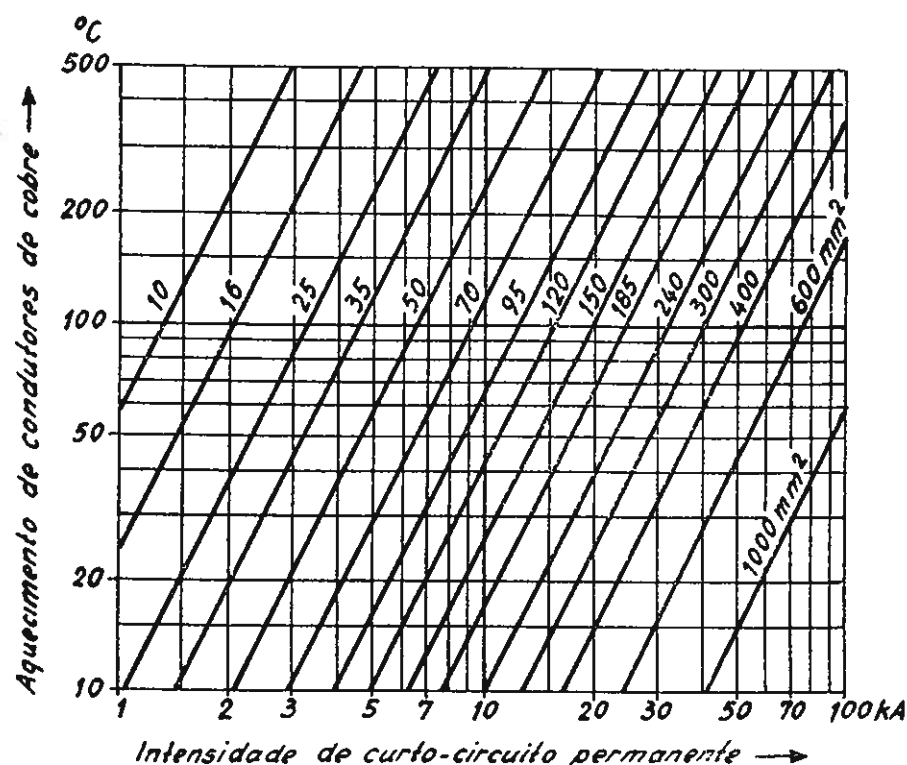


Figura 26

(6059)

Secção mínima de condutores de cobre nu em função da intensidade de curto-circuito permanente



(6071)

Figura 27

Aquecimento de condutores de cobre em função da intensidade de curto-circuito permanente passado 1 segundo. Para condutores de alumínio, os valores das temperaturas devem ser multiplicados por 2,3.

Exemplo: Das barras do quadro de distribuição numa central com alternadores trifásicos, deseja-se tirar uma derivação para os serviços auxiliares com o consumo nominal de $I_n = 150$ Amperes.

Segundo dados da instalação, temos de contar nas barras gerais com a intensidade de curto-circuito permanente $I_p = 9000$ Amperes, e de curto-circuito inicial $I_a = 27000$ Amperes.

O tempo de disparo do disjuntor que alimenta o circuito dos serviços auxiliares está prevista para $t = 3$ segundos.

Deseja-se saber qual deve ser a secção dos condutores de cobre a prever para a derivação desse circuito, não devendo a sua temperatura ultrapassar 200°C , no caso dum curto-circuito entre duas fases.

Segundo a fórmula (17e), temos a secção.

$$S = \frac{I_p}{185} \times \sqrt{t} = \frac{9000}{185} \times \sqrt{3} = 84 \text{ mm}^2$$

e pela fórmula (17g) temos, para o factor $k = 3$

$$S = \sqrt{\frac{I_p^2 \times t}{172 \times \vartheta}} \times k = \sqrt{\frac{9000^2 \times 3}{172 \times 200}} \times 3 = 145 \text{ mm}^2$$

Segundo a tabela n.º 9 podíamos escolher a secção $15 \times 2 = 30 \text{ mm}^2$, para a intensidade nominal de 150 Amperes, porém vemos já que se torna indispensável a secção mínima de 84 e, para maior segurança, 145 mm^2 . Segundo a mesma tabela a secção normalizada a empregar seria portanto: $30 \times 5 = 150 \text{ mm}^2$.

Segundo a fórmula (19) temos:

$$\vartheta' = \frac{i_p^2 \times t_k}{C} \quad \text{sendo } t_k = t + \Delta t$$

No nosso caso, temos:

$$i_p = \frac{I_p}{S} = \frac{9000}{150} = 60 \text{ A/mm}^2$$

e segundo a fórmula (18)

$$\Delta t = \left(\frac{I_a}{I_p} \right) \times T$$

onde podemos considerar, para o caso dum curto-circuito entre duas fases, $T = 0,6$ segundos, e assim resulta:

$$\Delta t = \left(\frac{27000}{9000} \right)^2 \times 0,6 = 5,4 \text{ segundos}$$

finalmente temos, na pior das hipóteses, a temperatura dos condutores com a secção de 150 mm^2 (barra de $30 \times 5 \text{ mm}$)

$$\vartheta' = \frac{i_p^2 \times t_k}{C} = \frac{60^2 \times (3 + 5,4)}{172} = 175^\circ \text{ C}$$

inferior portanto a 200° C .

Pelo ábaco da Figura 25 obtemos para $i_p = 60 \text{ A/mm}^2$ e $T_k = 8,4$ segundos, cerca de 200° C , ou pelo ábaco da Figura 26 para $S = 150 \text{ mm}^2$ obtemos $I_p =$ cerca de 9000 Amperes, o que confirma os cálculos atrás expostos.

Podíamos também recorrer à Figura 27, onde obtínhamos para esta mesma secção com $I_p = 9000$ Amperes, passado 1 segundo, a temperatura de cerca de 21°C , donde resultava para 8,4 segundos $21 \times 8,4 = 177^\circ \text{C}$.

11) Esforços dinâmicos devidos à intensidade de curto-circuito

Além dos efeitos provocados pelo aquecimento, que vimos nos capítulos anteriores, temos de contar também, ao projectar uma instalação, com os esforços electrodinâmicos que se exercem sobre os condutores e seus apoios, quando dum curto-circuito. O resultado do cálculo desses esforços obriga-nos muitas vezes a modificar a disposição dada aos condutores, como seja, maior afastamento entre si, maior número de apoios, ou o seu reforço.

Quando de dois condutores de fases diferentes, montados paralelamente, devido à passagem da corrente, desenvolve-se uma força que tende a aproximá-los ou afastá-los.

Por cada centímetro de comprimento e para a distância (a) em cm entre condutores, calculamos essa força pela fórmula:

$$F = \frac{1,02 \times 2 \times i_1^2 \times i_2^2 \times 10^{-8}}{a} \text{ kg/cm} \quad . \quad . \quad . \quad (16)$$

sendo i_1 e i_2 a amplitude máxima das intensidades que percorrem os condutores.

Como nos mostra a Figura 28, quando duas intensidades per-

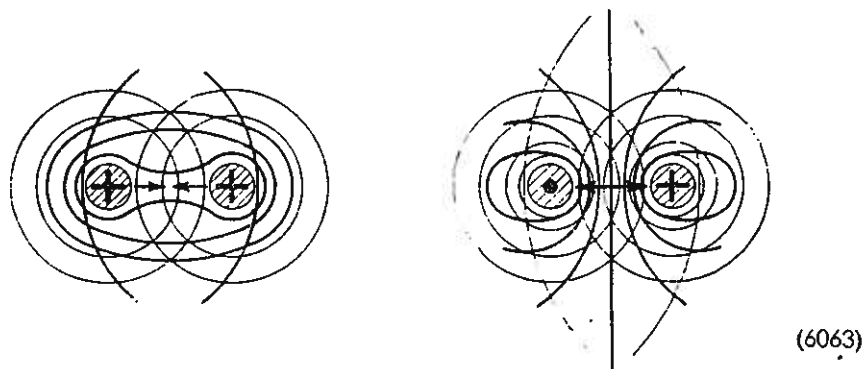


Figura 28

correm os condutores no mesmo sentido, estes tendem a aproximar-se, e quando em sentidos contrários a afastar-se, visto no segundo caso o valor de F ser negativo. Isto depreende-se facilmente pela forma como se geram as linhas de força magnéticas, em volta dos condutores representados na figura.

Sendo as duas intensidades iguais, isto é, $i_1 = i_2 = I_s$ bem assim l o comprimento entre os apoios, em centímetros, dos condutores que correm paralelos, a fórmula (20) toma a seguinte expressão:

$$F = \frac{2,04 \times I_s^2 \times l \times 10^{-8}}{a} \text{ kg} \dots \dots \dots (21)$$

A força F aumenta com o quadrado da intensidade, enquanto que os valores de l e a) na relação linear.

A figura 29 dá-nos valores de F em kg por metro, em função da intensidade em Amperes (Amplitude máxima) e distância entre condutores em cm.

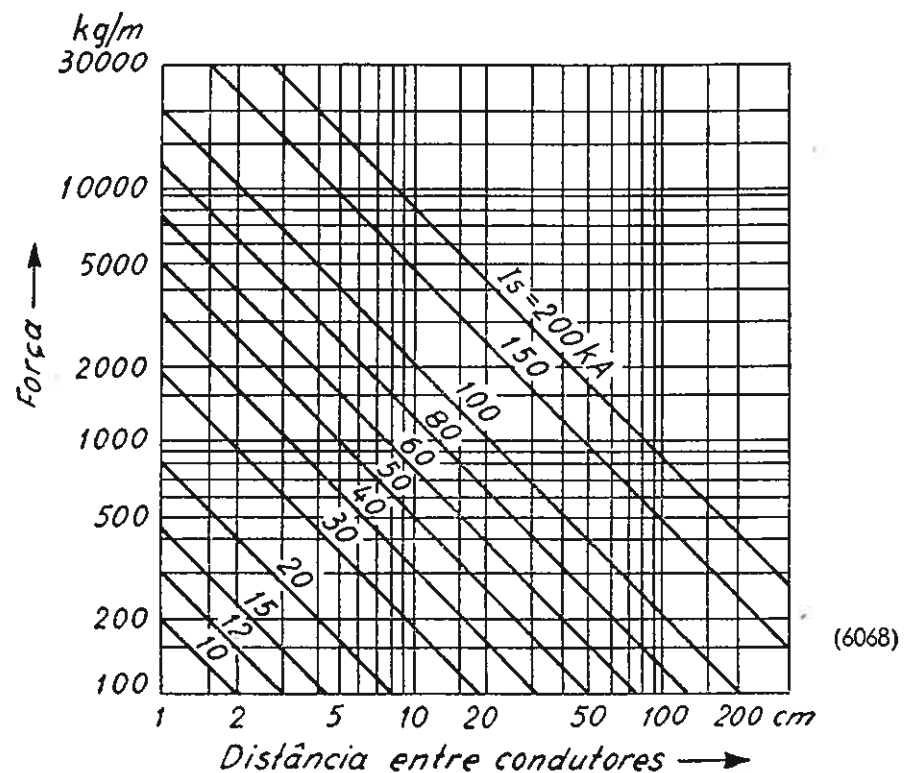


Figura 29

Esforços desenvolvidos entre dois condutores quando percorridos por uma corrente de igual intensidade e em fase

Em corrente trifásica, quando dum curto-circuito entre duas fases, as intensidades nos dois condutores são em sentido contrário e de igual valor, visto que um condutor faz de retorno, mas quando dum curto-circuito entre as três fases, nem as três intensidades são todas iguais,

nem em sentidos opostos, visto estarem esfasadas de 120° e portanto resulta a força F ser menor.

A fórmula (21) pode considerar-se exacta quando se trata de condutores finos, o comprimento (l) for grande e a permeabilidade do ambiente igual a l .

Praticamente não acontece assim em instalações de baixa tensão, visto termos barras de grande secção e a distância entre barras ser relativamente pequena, o que convém tomar em consideração, como veremos mais adiante.

A intensidade do curto-circuito inicial assimétrica I_s que temos de tomar em consideração, é o valor máximo de amplitude da corrente de choque, formada pela componente alternada I_a , adicionada da componente contínua I_{ag} . Este valor é a máxima intensidade que se pode desenvolver e a tomar sempre em consideração, quando dos esforços que se podem desenvolver sobre os condutores, isoladores de apoio, suas ferragens de fixação, etc. Obtém-se pela fórmula :

$$I_s = \sqrt{2} \times \kappa \times I_a = \sqrt{2} \times \kappa \times \frac{P_a}{\sqrt{3} \times U} \quad . . . \quad (22)$$

sendo

I_a — A intensidade inicial de curto-circuito (valor eficaz) em Amperes.

P_a — A potência de curto-circuito nominal em VA no ponto do curto-circuito.

$\sqrt{2}$ — O factor de ponta (determinação da máxima amplitude em face do valor eficaz).

κ — O factor de choque do curto-circuito, ou seja a relação dos valores das componentes das intensidades de choque de curto-circuito e a intensidade inicial, valor eficaz, tomando em consideração a componente contínua. O seu valor máximo é 1,8 que se dá quando a relação entre a resistência óhmica do circuito e a reactância deste é praticamente nula, portanto quando o curto-circuito se dá nas proximidades da Central que alimenta o curto-circuito considerado.

Quando o curto-circuito se dá num ponto afastado, e portanto os valores da resistência óhmica e a reactância são praticamente iguais, este valor chega a atingir 1,06.

2) Consultar a nossa lista 0250 sobre dimensões.

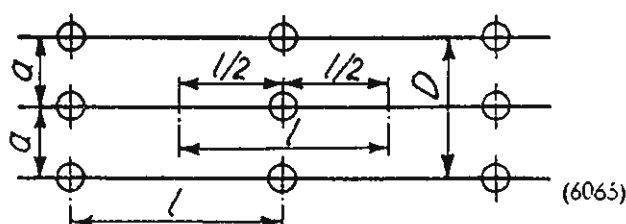


Figura 31

Praticamente podemos admitir que as barras estão apoiadas livremente nos isoladores e a força F se exerce uniformemente no comprimento l , figura 31, donde resulta o momento flector máximo:

$$M_{b\max} = \frac{F \times l}{8} = \frac{2,04 \times I_s^2 \times l^2 \times 10^{-8}}{8 \times a} \text{ cmkg.} \quad (24)$$

O módulo de flexão do perfil das barras, em relação ao eixo de gravidade perpendicular à direcção da força F , como mostra a figura 32, deverá ser:

$$W \geq \frac{M_{b\max}}{\sigma_b} \text{ cm}^3. \quad (25)$$

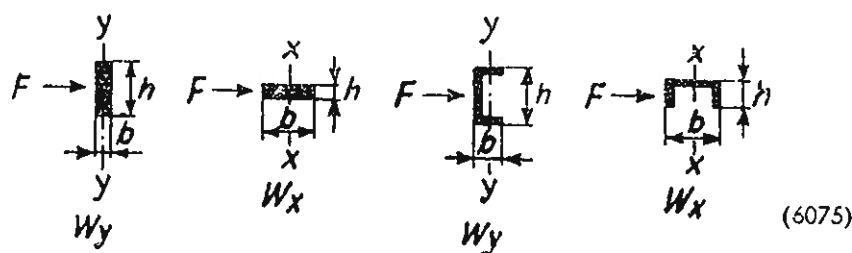


Figura 32

representando σ_b a carga de segurança à flexão do material em kg/cm^2 . Em geral admite-se:

Carga à flexão $\sigma_b = 1000$ a 1200 kg/cm^2 , para cobre
 " " " $\sigma_b = 400$ a 600 kg/cm^2 , para alumínio

A distância entre apoios não deve ultrapassar

$$l = \frac{10^5}{I_s} \times \sqrt{W \times a \times 40} \text{ (cm)}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (26)$$

A tabela n.º 12 indica as fórmulas para o cálculo dos módulos à flexão e momentos de inércia, tanto das barras simples como de conjuntos de barras. Por essa tabela se verifica que, não só tem grande influência a forma dos perfis, como a sua disposição. Como exemplo, basta chamar a atenção para o facto de que, se montarmos 3 barras de 100×100 mm, num sistema trifásico, segundo a disposição b) da Figura 33, estas resistem a um esforço 10 vezes maior do que o da montagem segundo a disposição a) da mesma figura.

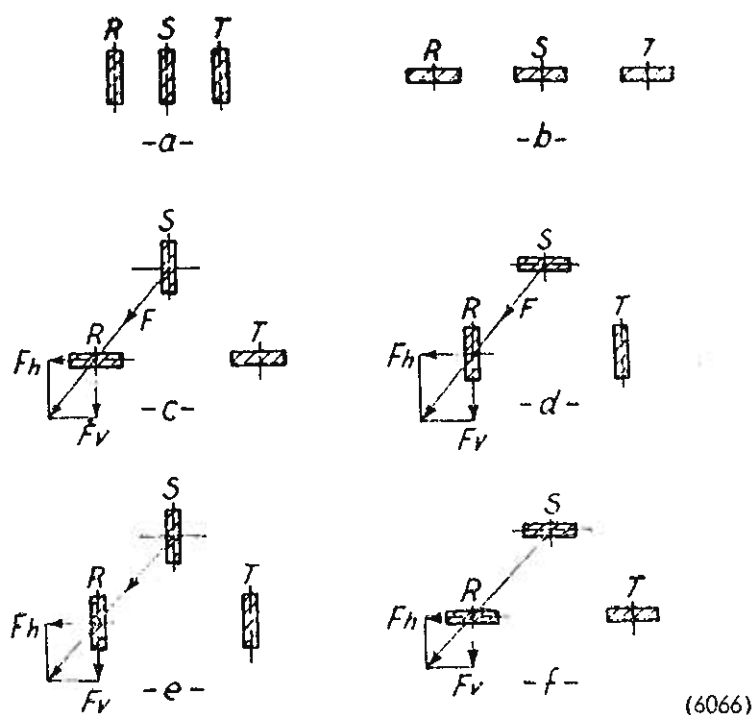


Figura 33

As fórmulas da tabela 12 são baseadas (na parte que diz respeito a conjuntos de barras por fase) no princípio de que as distâncias entre barras de cada conjunto se mantêm constantes, quando se exerce a força F , o que na prática não é bem assim. Para que essas distâncias se mantenham tanto quanto possível, convém montar calços entre as barras, pelo menos de 4 em 4 metros, com a vantagem de se distribuir melhor a densidade de corrente pelas várias barras.

As tabelas 13 a 16 indicam os valores dos módulos de flexão e momentos de inércia dos vários perfis, tanto para montagem de barras colectoras simples, como de conjuntos de barras por fase.

Quando da montagem de conjuntos de barras por fase, podemos admitir praticamente o módulo de flexão desse conjunto igual à soma dos módulos de cada barra.

Como a densidade de corrente não é igual em toda a secção das barras, e como podemos admitir a sua distribuição segundo a figura 34, para o efeito de cálculo devemos contar com a diminuição de cerca de 10 a 25 % da cota a_m (distância verdadeira entre centros das barras).

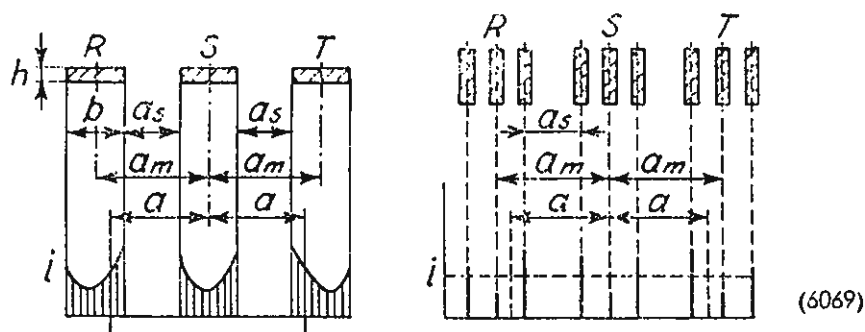


Figura 34

Quando do conjunto de 4 barras, para que a densidade de corrente seja tão uniforme quanto possível, previu-se nas tabelas 9 e 15 distância maior (50 mm) entre a segunda e a terceira barras, ou seja 5 vezes a sua espessura, além de haver a vantagem da melhor circulação do ar.

Exemplo: Numa instalação será prevista a intensidade de curto-circuito inicial $I_s = 80000$ Amp. (amplitude máxima). A distância entre fases é de $a = 20$ cm e a distância entre apoios de cada barra $l = 100$ cm.

A força máxima que se desenvolve no caso de um curto-circuito será, segundo a fórmula (21):

$$F = \frac{2,04 \times I_s^2 \times l \times 10^{-8}}{a} = \frac{2,04 \times 80000^2 \times 100}{20 \times 10^8} = 652 \text{ kg}$$

Esta força tende a derrubar os isoladores de suporte, e portanto teremos de empregar o tipo B.

Encontramos o mesmo valor segundo a figura 29.

Exemplo: Num quadro de distribuição para corrente trifásica temos barras por fase de 100×10 mm montadas ao alto, mantendo-se os restantes dados do exemplo anterior, isto é,

$$F = 650 \text{ kg}; l = 100 \text{ cm}$$

Segundo a fórmula (25) temos o momento flector :

$$M_{\max} = \frac{F \times l}{8} = \frac{650 \times 100}{8} = 8125 \text{ cmkg}$$

Segundo a tabela 12) o módulo de flexão :

$$W_y = \frac{h \times b^2}{6} = \frac{10 \times 1^2}{6} = 1,67 \text{ cm}^3$$

(o mesmo poderíamos ler na tabela 14).

O esforço à flexão será, segundo a fórmula (25) :

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_y} = \frac{8125}{1,67} = 4900 \text{ kg/cm}^2$$

A carga de segurança à flexão para cobre deve ser $\sigma_b \leq 1200 \text{ kg/cm}^2$, portanto a disposição dada às barras não oferece a devida segurança. Temos portanto de afastar mais as barras entre si, reforçar estas, diminuir a distância entre apoios, ou montá-las horizontalmente.

Qualquer destas soluções terá de ser escolhida em função das possibilidades de instalação, e também do ponto de vista económico.

Se optarmos pela diminuição do comprimento entre apoios, temos, segundo a fórmula (26) :

$$\begin{aligned} l &= \frac{10^5}{I_s} \times \sqrt{W \times a \times 40} = \\ &= \frac{10^5}{80000} \times \sqrt{1,67 \times 20 \times 40} = 46 \text{ cm} \end{aligned}$$

solução esta que não seria possível, quer do ponto de vista prático quer económico.

Se as barras forem, porém, montadas horizontalmente, temos o módulo de flexão :

$$W_x = \frac{h \times b^2}{6} = \frac{1 \times 10^2}{6} = 16,7 \text{ cm}^3$$

e o esforço à flexão :

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_x} = \frac{8125}{16,7} = 490 \text{ kg/cm}^2$$

Sendo permitida a carga de segurança à flexão $\sigma_b \leq 1200 \text{ kg/cm}^2$, verificamos que esta solução é a mais prática a adoptar.

12) Ressonância mecânica das barras

Temos de considerar que uma barra apoiada em dois pontos pode sofrer vibrações que, quando dum curto-circuito, aumentam consideravelmente os esforços electrodinâmicos ¹⁾. Isto acontece sempre que a ressonância própria da barra é aproximadamente igual à ressonância provocada pela passagem da corrente alternada na mesma barra.

A ressonância própria das barras em caso algum se deve aproximar do valor simples ou duplo da frequência da instalação, com a diferença mínima de cerca de $\pm 10\%$

Segundo Biermanns, a ressonância própria duma barra apoiada entre dois pontos, obtém-se pela fórmula:

$$n = 112 \sqrt{\frac{E \times I}{p \times l^4}} \text{ Hertz} \dots \dots \dots (27)$$

representando:

p — o peso da barra em kg/cm.

E — o módulo de elasticidade do material em kg/cm².

I — o momento de inércia do perfil da barra em cm⁴.

l — o comprimento da barra entre apoios em cm.

Para cobre temos $E = 1,20 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$.

« alumínio » $E = 0,70 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$.

O momento de inércia pode-se obter pelas fórmulas indicadas na tabela 12, sendo a altura h perpendicular à direcção da vibração da barra, ou seja da força F , como indicado também na figura 32.

Quando se trata de perfis em U , torna-se desnecessário calcular a ressonância das barras.

A fórmula (27) pode ser simplificada, tomando os expressões:

$$n = 368 \times \frac{b}{l^2} \times 10^3 \text{ Hertz} \quad \text{para cobre de secção rectangular}$$

$$n = 468 \times \frac{b}{l^2} \times 10^3 \text{ Hertz} \quad \text{para alumínio de secção rectangular}$$

1) Segundo Biermanns, no caso de ressonância, os esforços electrodinâmicos chegam a aumentar 2 a 5 vezes o seu valor.

$$n = 316 \times \frac{10^3 \times d}{l^2} \text{ Hertz para cobre maciço de secção circular}$$

$$n = \frac{316 \times 10^3}{l^2} \times \sqrt{D^2 + d^2} \text{ Hertz para tubos de cobre}$$

sendo d o diâmetro interior e D o diâmetro exterior em cm.

O cálculo mostra-nos que, para distâncias entre apoios normais de 1 a 1,5 metros, não existe o receio de ressonância nas instalações a 50 c/s quando se empregam barras de secção rectangular, o que já não acontece com barras de secção circular.

Se tivermos por acaso uma barra de secção circular de 16 mm de diâmetro e a distância entre apoios de 1 metro, obtemos exactamente o valor de 50 c/s.

A tabela 17 indica, para os vários perfis e distâncias entre apoios, os valores da ressonância.

Exemplo: Determinar a ressonância das barras de cobre num quadro, tendo estas a espessura $b = 1$ cm e a altura $h = 10$ cm. A distância entre apoios é $l = 1,0$ m.

Pela fórmula da tabela 12 temos o momento de inércia:

$$I_y = \frac{h \times b^3}{12} = \frac{10 \times 1^3}{12} = 0,833 \text{ cm}^4$$

O peso da barra de cobre é, segundo a tabela, $p = 0,089$ kg/cm. O módulo de elasticidade para cobre é $E = 1,20 \times 10^6$ kg/cm², e assim resulta, pela fórmula (27):

$$n = 112 \sqrt{\frac{E \times I}{p \times l^4}} = 112 \sqrt{\frac{1,20 \times 10^6 \times 0,833}{0,089 \times 100^4}} = 39 \text{ c/s}$$

O mesmo resultado aproximado obtemos pela fórmula:

$$n = 368 \times \frac{b}{l^2} \times 10^3 = 368 \times \frac{1}{100^2} \times 10^3 = 37 \text{ c/s}$$

Segundo a tabela 17 obtemos $n = 40$.

$$L = 2 \times l \times \left(\log_2 2 \times \frac{\pi \times D + h}{\pi \times b + 2 \times h} + 0,03 \right) \times 10^{-7}$$

representando :

E_s — a queda de tensão indutiva em Volts (tensão composta em corrente trifásica).

f — Frequência da rede, em ciclos por segundo, em geral 50 c/s

I — Intensidade do circuito em Amp.

D — Distância entre centros dos condutores em cm.

b — Largura do conjunto de barras em cm.

h — Altura das barras em cm.

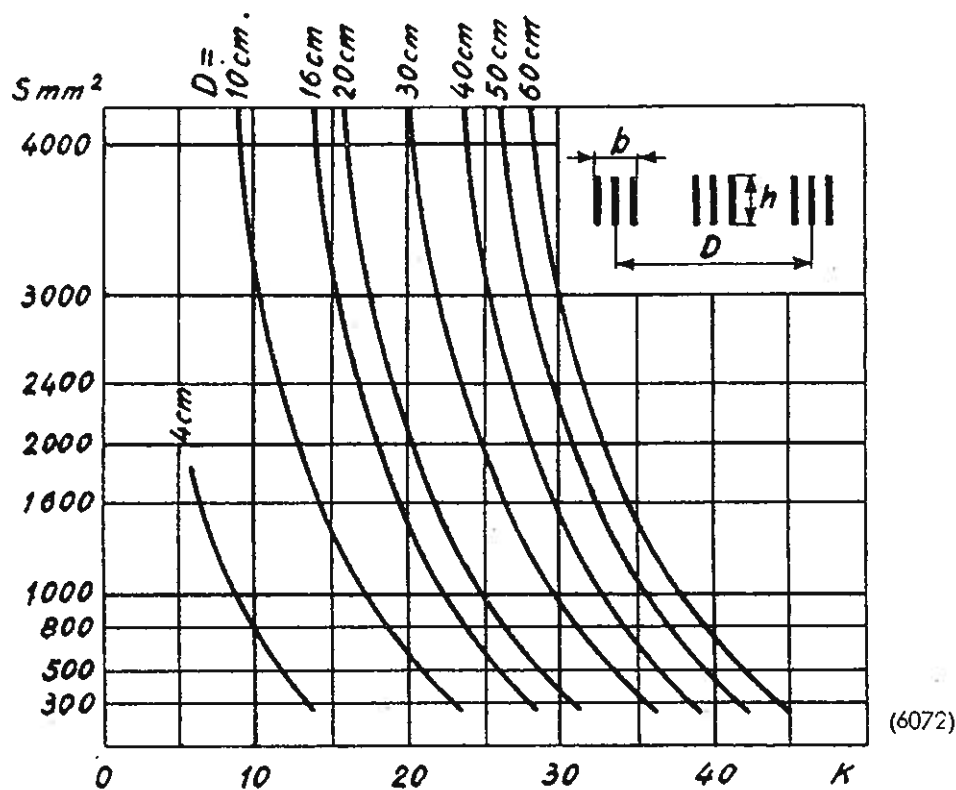


Figura 35

Para facilidade do cálculo, as curvas da figura 35 dão-nos o valor de $k = 2 \times \pi \times L$ por metro, para várias secções de barras e distâncias entre estas, e assim as fórmulas tomam as seguintes expressões:

para corrente alternada :

$$E_s = f \times k \times l \times I \times 10^{-7} (30)$$

para corrente trifásica :

$$E_s = \sqrt{3} \times f \times k \times l \times I \times 10^{-7} (31)$$

Exemplo : Instalação trifásica com o comprimento de $l = 40$ metros, sendo a intensidade $I = 3000$ Amperes. Por fase seriam montadas 3 barras de 80×10 mm (2400 mm^2) com a distância entre fases extremas $D = 30$ cm, à tensão de 500 Volts, 50 c/s.

Segundo a figura 35 temos, para $S = 2400 \text{ mm}^2$ e $D = 30 \text{ cm}$, $k = 24$, donde resulta pela fórmula (31):

$$E_s = 1,73 \times 50 \times 24 \times 40 \times 3000 \times 10^{-7} = 25 \text{ Volts}$$

Como 25 Volts correspondem a 5% da tensão de serviço, é este valor exagerado e assim torna-se necessário reduzi-lo. Podíamos aproximar mais as barras, o que geralmente não pode ser, devido aos esforços que se desenvolvem quando dum curto-circuito sobre as barras e isoladores. Temos ainda a solução de dispor as 9 barras entremeadas, colocando estas pela ordem R-S-T-R-S-T-R-S-T. A distância entre barras pode ser de 10 cm, fixando-se estas segundo a disposição da figura 30.

A carga por barra é de 1000 Amperes. Segundo as curvas da figura 35, temos para $S = 800 \text{ mm}^2$, $D = 10 \text{ cm}$, resulta $k = 19$ e a queda de tensão:

$$E_s = 1,73 \times 50 \times 19 \times 40 \times 1000 \times 10^{-7} = 6,5 \text{ Volts}$$

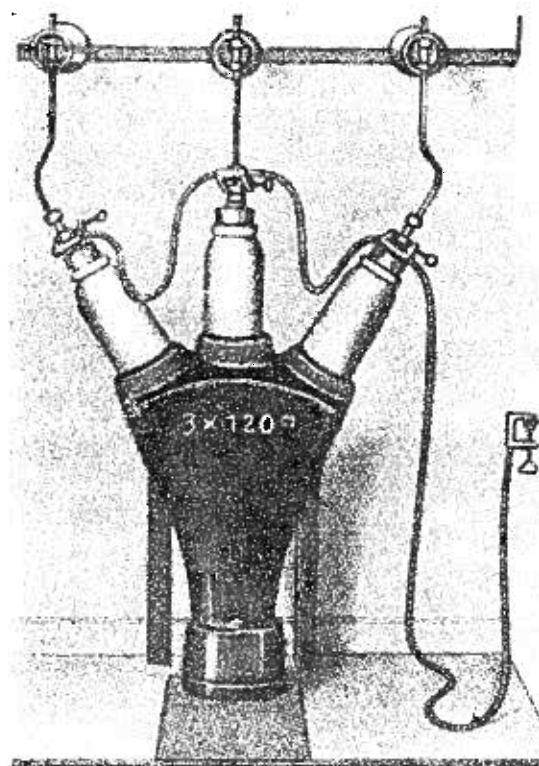
Convém, sempre que tivermos de lançar mão duma solução como a acima indicada, repetir os cálculos dos esforços electrodinâmicos, pois pode acontecer ser necessário reforçar os apoios e as barras com tubos ou placas de baquelite, etc.

14) Condutores de protecção e ligação à terra

Segundo as normas alemãs (VDE 0141), as cargas admissíveis para os condutores de terra, partindo da máxima temperatura de 150° C que podem atingir, são as seguintes:

| Secção mm ² | Intensidade máxima permanente Amp. | Intensidade máxima durante 1 segundo Amp. |
|---------------------------|--|---|
| 16 | 150 | 2500 |
| 35 | 250 | 5500 |
| 50 | 350 | 8000 |
| 70 | — | 11500 |
| 100 | — | 16000 |
| 200 | — | 32500 |

Quando de trabalhos numa rede de alta tensão, em que não haja seccionadores para ligação à terra, a terra provisória a estabelecer, para efeitos de segurança do pessoal, será formada por cabos multifilares muito flexíveis, com garras de aperto a assegurar bom contacto dessa linha de terra, tanto entre as 3 fases como à linha geral de terra da instalação, e dimensionada para a corrente máxima de curto-circuito durante um segundo, ver figura 36.



(6049)

Figura 36

Os contactos serão dimensionados de forma a resistirem aos esforços electrodinâmicos que se possam desenvolver.

A secção das linhas de terra provisórias serão dimensionadas segundo a tabela seguinte:

| Secção do cabo mm ² | Intensidade máxima de curto-circuito em Amperes, durante : | | |
|--------------------------------------|---|--------|--------|
| | 10 seg. | 5 seg. | 1 seg. |
| 35 | 2000 | 2500 | 5500 |
| 50 | 3000 | 4000 | 8000 |
| 70 | 4000 | 5500 | 11000 |

TABELA N.º 1

Distâncias mínimas em milímetros nas instalações de alta tensão
a partir de 1000 Volts

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|----------------------|--------------------|----------------|------------------------------------|----------------|------------------------------------|-------------|---|-----------|--------------|-------------|
| Tensão nominal em kV | Distâncias mínimas | | Distâncias entre barras colectoras | | Do pavimento aos órgãos sob tensão | | Distâncias mínimas das protecções aos órgãos sob tensão | | | |
| | no interior 1) | no exterior 1) | no interior 3) | no exterior 3) | no interior | no exterior | Redes 4) | Chapas 5) | Corrimãos 6) | |
| | | | | | | | no interior | | no interior | no exterior |
| 1 | 50 2) | — | 120 | — | 2500 | — | 150 | 80 | 1100 | — |
| 3 | 75 | — | 150 | — | 2500 | — | 180 | 110 | 1100 | — |
| 6 | 100 | — | 250 | — | 2500 | — | 200 | 130 | 1100 | — |
| 10 | 125 | 180 | 300 | — | 2500 | — | 230 | 160 | 1150 | — |
| 20 | 180 | 260 | 350 | 500 | 2560 | 2650 | 280 | 210 | 1200 | 1300 |
| 30 | 260 | 360 | 400 | 700 | 2500 | 2650 | 360 | 300 | 1300 | 1400 |
| 45 | 360 | 470 | 600 | 1000 | 2650 | 2800 | 460 | 400 | 1400 | 1500 |
| 60 | 470 | 580 | 900 | 1300 | 2800 | 3000 | 570 | 500 | 1500 | 1600 |
| 110 | 800 | 1000 | 1400 | 2200 | 3300 | 3600 | 900 | 850 | 1800 | 2000 |
| 150 | — | 1450 | — | 3000 | 3700 | 4200 | — | — | — | 2500 |
| 220 | — | 2200 | — | 4400 | 4400 | 5000 | — | — | — | 3300 |

1) Estas distâncias não podem ser inferiores, e compreendem-se entre condutores ou órgãos sob tensão, às paredes, tetos, pavimentos ou peças metálicas ligadas a outra fase.

2) Esta distância pode ser menor nas instalações de tensão inferior a 1 kV, baixando para 40 e 30 mm quando a distância entre apoios é de cerca de 1 metro e não são de reear fortes efeitos dinâmicos em caso de curto-circuito.

3) Distâncias práticas, não normalizadas, e entre barras simples. Quando de conjuntos de barras em paralelo, estas distâncias podem ser maiores, por motivos de grandes distâncias entre apoios, efeitos dinâmicos em caso de curto-circuito, etc.

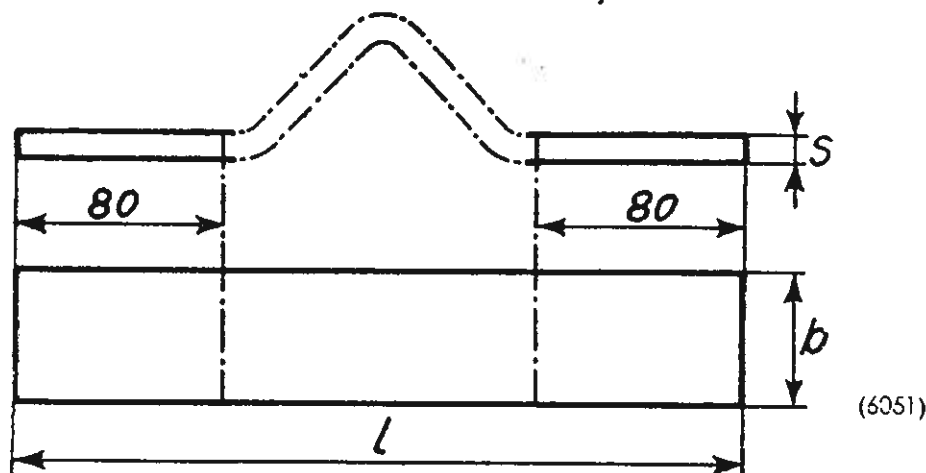
4) Ou portas de rede com a altura mínima de 1,60 metros.

5) Ou portos de chapa.

6) E balaustradas ou portas de rede com a altura inferior a 1,60 metros.

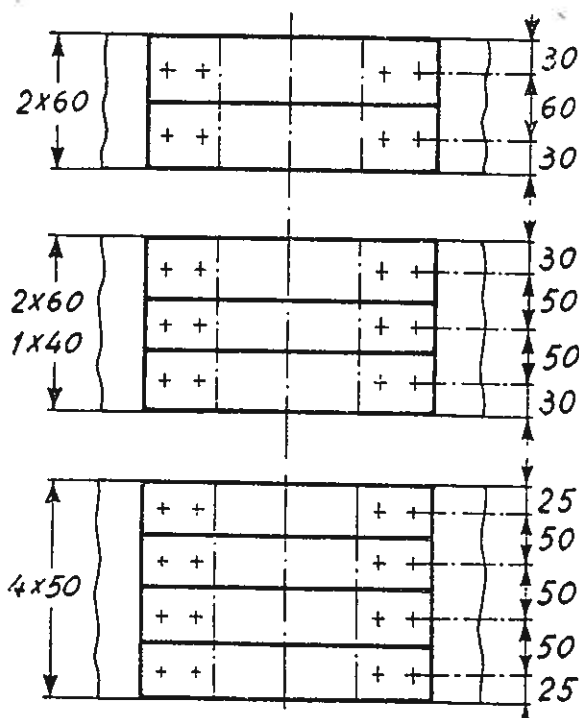
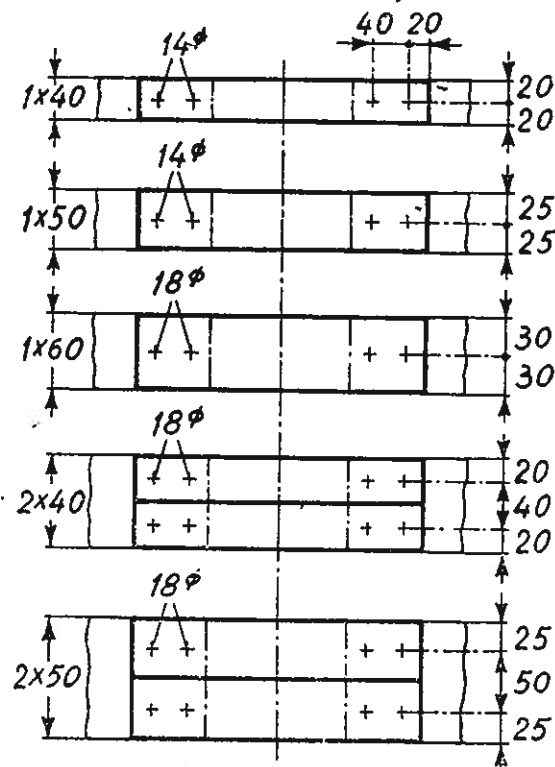
Pernos condutores de corrente em cobre laminado

| Intensidade Amp. | Diâmetro do perno com rosca | | | | | |
|---------------------|-----------------------------|-------|------------------|-------|---------------|------|
| | Whitworth | | Whitworth Gaz | | Métrica mm | |
| | poleg. | mm | poleg. | mm | Grossa | Fina |
| 200 | 1/2 " | 12,70 | 1/4 " | 13,16 | 12 | 12 |
| 400 | 5/8 " | 15,87 | 3/8 " | 16,63 | 16 | 16 |
| 600 | 3/4 " | 19,05 | 1/2 " | 20,95 | 18 | 18 |
| 800 | 1 " | 25,40 | 3/4 " | 26,44 | 27 | 27 |
| 1000 | 1 1/8 " | 28,57 | 7/8 " | 30,20 | 30 | 30 |
| 1200 | 1 1/4 " | 31,75 | 1 " | 33,25 | 33 | 33 |
| 1600 | 1 5/8 " | 41,27 | 1 1/4 " | 41,91 | 42 | 42 |
| 1800 | 1 7/8 " | 47,62 | 1 1/2 " | 47,80 | 48 | 48 |
| 2000 | 2 " | 50,80 | 1 3/4 " | 53,75 | 52 | 52 |
| 2500 | | | | | | |

TABELA N.º 3
Juntas de dilatação

| b mm | s mm | l mm | Amp. (cobre) |
|---------|---------|---------|-----------------|
| 40 | 5 10 | 280 | 600 835 |
| 50 | 5 10 | 280; | 700 1025 |
| 60 | 5 10 | 280 | 825 1200 |

Furação e suas distâncias

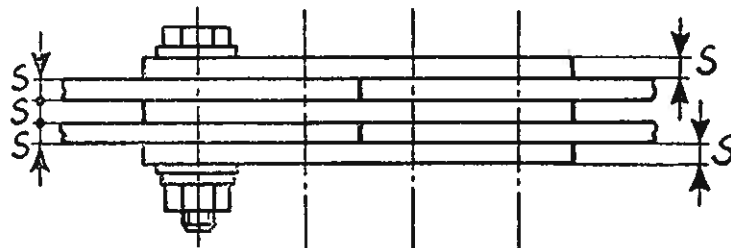
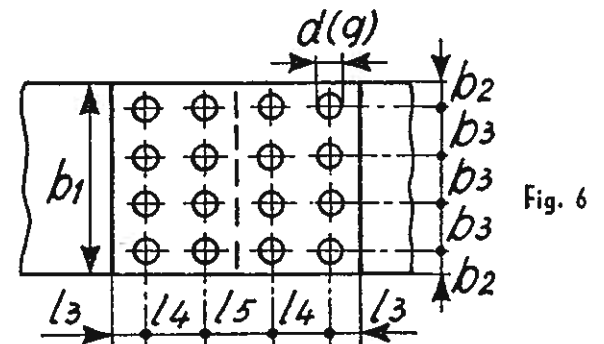
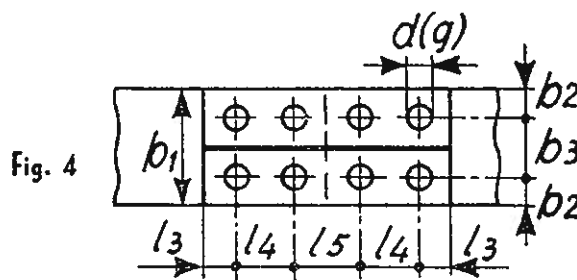
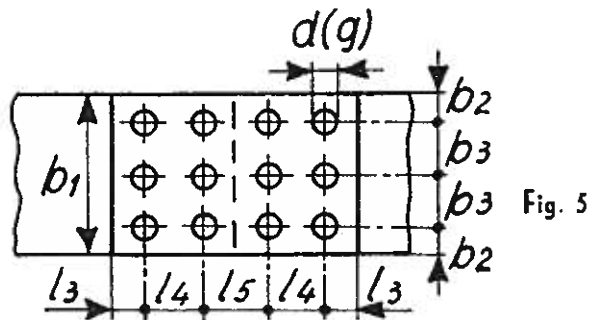
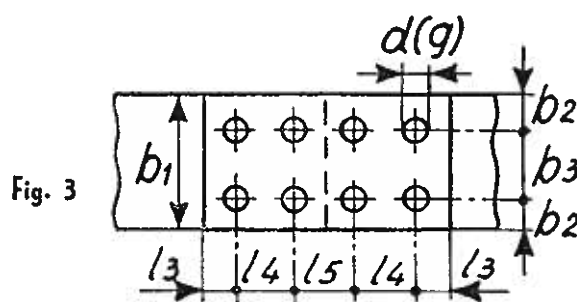
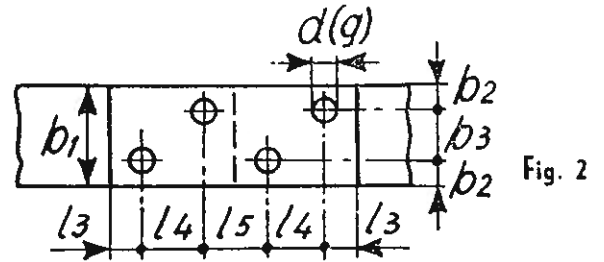
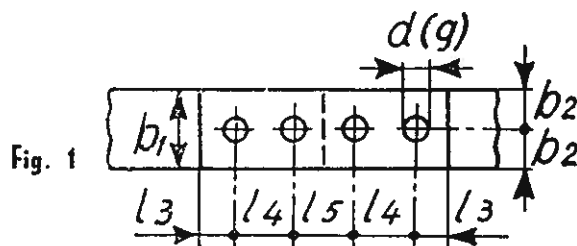
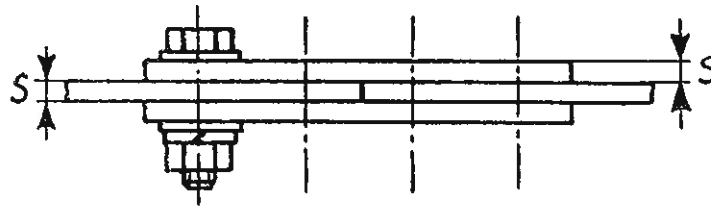


(6050)

Para barras de 10 mm de espessura empregam-se duas juntas de 5 ou uma junta de 10 mm de espessura.

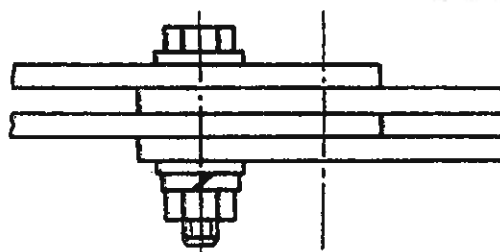
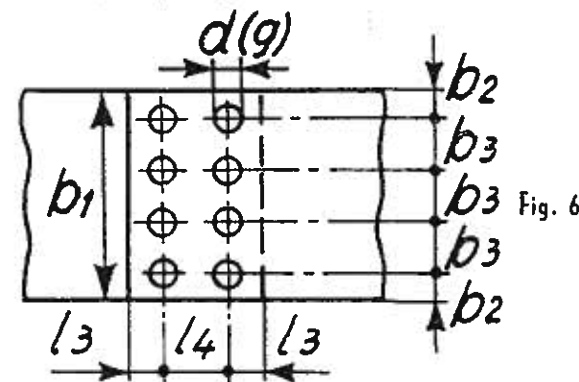
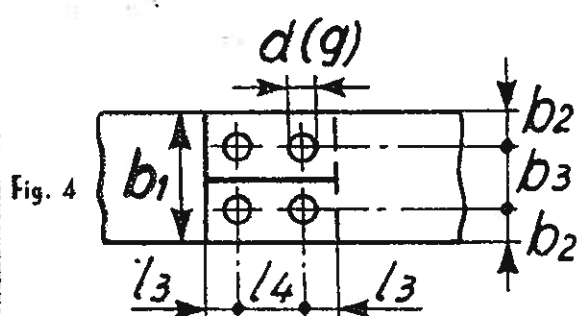
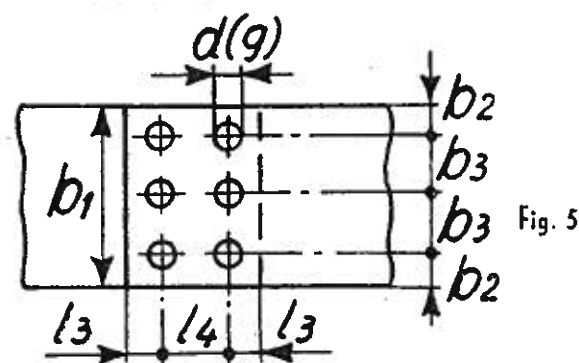
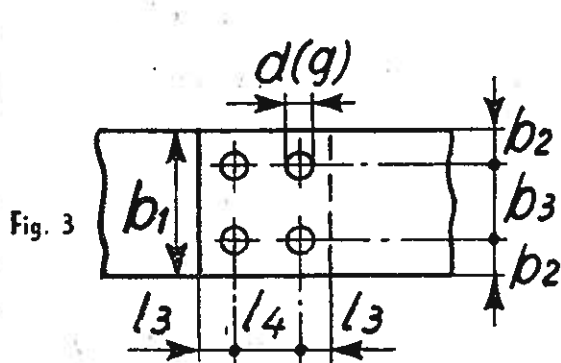
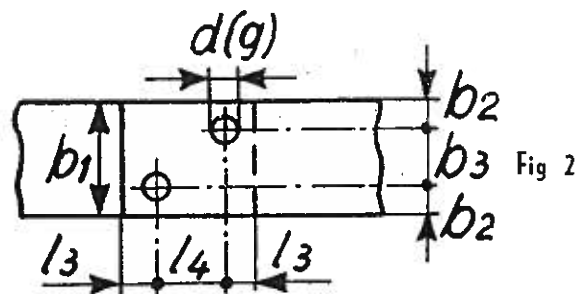
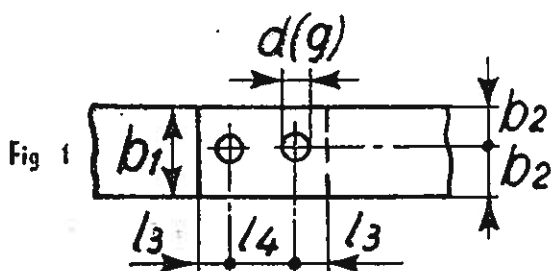
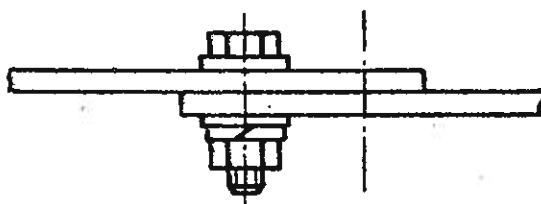
Para 4 barras de 200 × 10 mm empregam-se 16 juntas de 10, ou 32 de 5 mm de espessura.

Juntas de tampo



| Figura | b ₁ | b ₂ | b ₃ | l ₃ | l ₄ | l ₅ | d | Parafuso (g) |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|--------------|
| 1 | 12 | 6 | — | 6 | 12 | 12 | 7 | M6 (1/4") |
| | 15 | 7,5 | — | 7,5 | 15 | 15 | 7 | M6 (1/4") |
| | 20 | 10 | — | 10 | 20 | 20 | 8,3 | M8 (5/16") |
| | 25 | 12,5 | — | 12,5 | 25 | 25 | 10,3 | M10 (3/8") |
| | 30 | 15 | — | 15 | 30 | 30 | 14 | M12 (1/2") |
| | 40 | 20 | — | 20 | 40 | 40 | 18 | M12 (1/2") |
| 2 | 50 | 14 | 22 | 14 | 22 | 30 | 14 | M16 (5/8") |
| | 60 | 17 | 26 | 17 | 26 | 35 | 18 | M16 (5/8") |
| 3 | 80 | 20 | 40 | 20 | 40 | 40 | 18 | M16 (5/8") |
| | 100 | 25 | 50 | 20 | 40 | 40 | 18 | M16 (5/8") |
| 4 | 120 | 30 | 60 | 20 | 40 | 40 | 18 | M16 (5/8") |
| 5 | 160 | 30 | 50 | 20 | 40 | 40 | 18 | M16 (5/8") |
| 6 | 200 | 25 | 50 | 20 | 40 | 40 | 18 | M16 (5/8") |

Juntas sobrepostas



| Figura | b ₁ | b ₂ | b ₃ | l ₃ | l ₄ | d | Parafuso (g) |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|---------------|
| 1 | 12 | 6 | — | 6 | 12 | 7 | M6 (1/4 ") |
| | 15 | 7,5 | — | 7,5 | 15 | 7 | M6 (1/4 ") |
| | 20 | 10 | — | 10 | 20 | 8,3 | M8 (5/16 ") |
| | 25 | 12,5 | — | 12,5 | 25 | 10,3 | M10 (3/8 ") |
| | 30 | 15 | — | 15 | 30 | 14 | M12 (1/2 ") |
| | 40 | 20 | — | 20 | 40 | 18 | M16 (5/8 ") |
| 2 | 50 | 14 | 22 | 14 | 22 | 14 | M16 (5/8 ") |
| | 60 | 17 | 26 | 17 | 26 | 18 | M16 (5/8 ") |
| 3 | 80 | 20 | 40 | 20 | 40 | 18 | M16 (5/8 ") |
| | 100 | 25 | 50 | 20 | 40 | 18 | M16 (5/8 ") |
| 4 | 120 | 30 | 60 | 20 | 40 | 18 | M16 (5/8 ") |
| 5 | 160 | 30 | 50 | 20 | 40 | 18 | M16 (5/8 ") |
| 6 | 200 | 25 | 50 | 20 | 40 | 18 | M16 (5/8 ") |

Derivações

Fig. 1

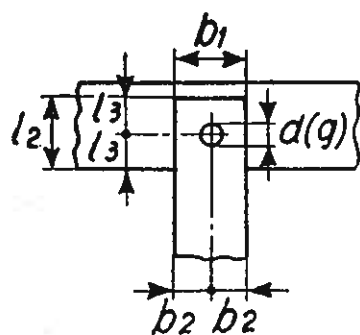


Fig. 2

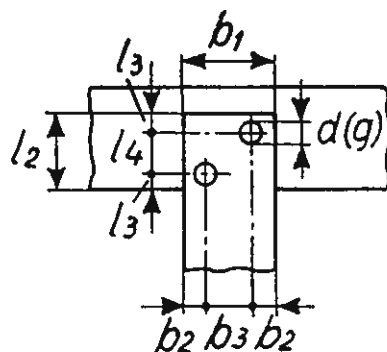


Fig. 3

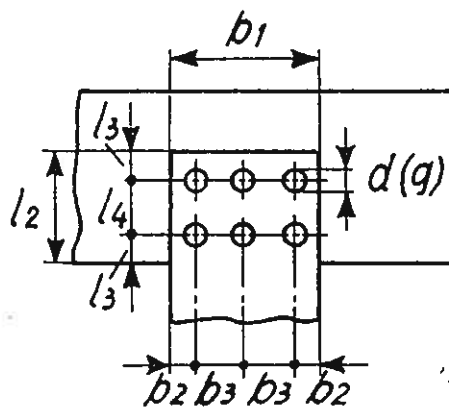
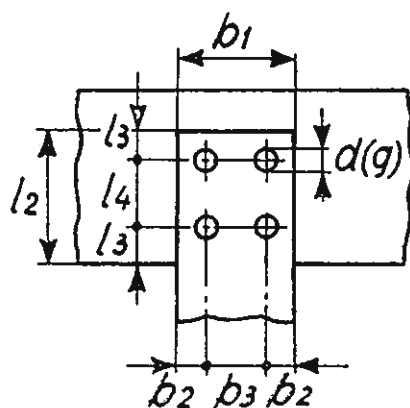


Fig. 5

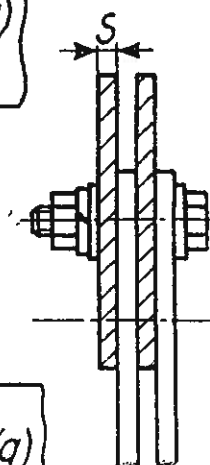


Fig. 6

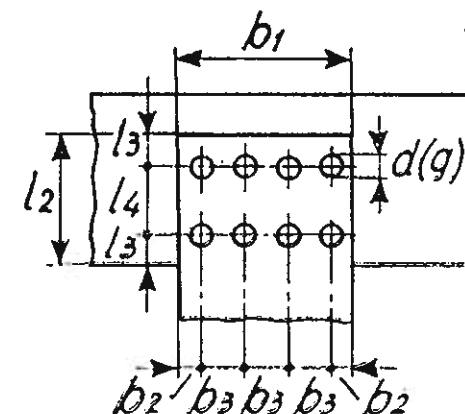
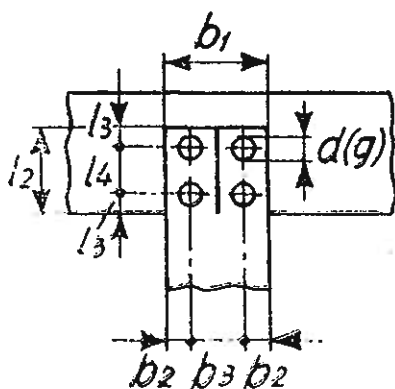


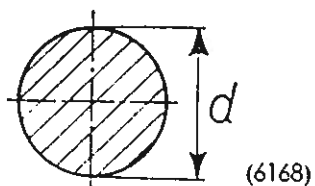
Fig. 6

(6062)

| Figura | b ₁ | b ₂ | b ₃ | l ₂ | l ₃ | l ₄ | d | Parafuso (g) |
|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|--------------|
| 1 | 12 | 6 | — | 12 | 6 | — | 7 | M6 (1/4") |
| | 15 | 7,5 | — | 15 | 7,5 | — | 7 | M6 (1/4") |
| | 20 | 10 | — | 20 | 10 | — | 8,3 | M8 (5/16") |
| | 25 | 12,5 | — | 25 | 12,5 | — | 10,3 | M10 (3/8") |
| | 30 | 15 | — | 30 | 15 | — | 14 | M12 (1/2") |
| | 40 | 20 | — | 40 | 20 | — | 18 | M16 (5/8") |
| 2 | 50 | 14 | 22 | 50 | 14 | 22 | 14 | M12 (1/2") |
| | 60 | 17 | 26 | 60 | 17 | 26 | 18 | M16 (5/8") |
| 3 | 80 | 20 | 40 | 80 | 20 | 40 | 18 | M16 (5/8") |
| | 100 | 25 | 50 | 80 | 20 | 40 | 18 | M16 (5/8") |
| 4 | 120 | 30 | 60 | 80 | 20 | 40 | 18 | M16 (5/8") |
| 5 | 160 | 30 | 50 | 80 | 20 | 40 | 18 | M16 (5/8") |
| 6 | 200 | 25 | 50 | 80 | 20 | 40 | 18 | M16 (5/8") |

TABELA N.º 7

Intensidade para condutores de cobre nu de secção circular

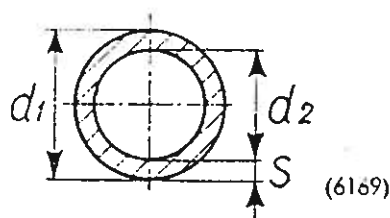


| Diâmetro d mm | Secção mm ² | Peso kg/m | Intensidade permanente em Amperes | | | |
|---------------------|---------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|-------------------|--------------|
| | | | Corrente alternada 40 ... 60 Hz | | Corrente contínua | |
| | | | Pintados | Não pintados | Pintados | Não pintados |
| 6 | 28 | 0,252 | 125 | 120 | 125 | 120 |
| 8 | 50 | 0,447 | 160 | 150 | 160 | 150 |
| 10 | 78,5 | 0,699 | 250 | 210 | 250 | 210 |
| 16 | 201 | 1,789 | 480 | 410 | 480 | 410 |
| 20 | 314 | 2,796 | 640 | 540 | 660 | 550 |
| 30 | 707 | 6,291 | 1100 | 900 | 1150 | 950 |

Elevação da temperatura 30° C.
Temperatura ambiente 30 a 35° C.

TABELA N.º 8

Intensidades permanentes para tubos de cobre nu



| Diâmetro | | Espes- sura s mm | Secção mm² | Peso kg/m | Intensidade permanente em Amperes | | | |
|----------------------|----------------------|---------------------------|-------------------|------------------|--|-----------------|---|-----------------|
| d ₁ mm | d ₂ mm | | | | Corrente contínua e alternada montagem no interior | | Corrente trifásica 40-60 Hertz montagem no exterior | |
| | | | | | Pintados | Não pintados | Pintados | Não pintados |
| 20 | 16 | 2 | 113,1 | 1,01 | 360 | 325 | 450 | 400 |
| | 14 | 3 | 160,2 | 1,43 | 430 | 400 | 530 | 500 |
| | 12 | 4 | 201,0 | 1,79 | 480 | 430 | 600 | 550 |
| 30 | 26 | 2 | 175,9 | 1,57 | 550 | 500 | 680 | 620 |
| | 24 | 3 | 254,5 | 2,26 | 650 | 600 | 800 | 750 |
| | 22 | 4 | 326,7 | 2,90 | 800 | 650 | 1000 | 800 |
| 50 | 44 | 3 | 443,0 | 3,94 | 1100 | 950 | 1350 | 1200 |
| | 42 | 4 | 578,1 | 5,15 | 1200 | 1100 | 1500 | 1400 |
| | 40 | 5 | 706,9 | 6,29 | 1400 | 1200 | 1700 | 1500 |
| 60 | 54 | 3 | 537,2 | 4,78 | 1250 | 1200 | 1600 | 1400 |
| | 52 | 4 | 703,7 | 6,26 | 1500 | 1300 | 1800 | 1600 |
| | 50 | 5 | 863,9 | 7,69 | 1600 | 1450 | 2000 | 1800 |

Elevação da temperatura 30° C.
Temperatura ambiente 30 a 35° C.

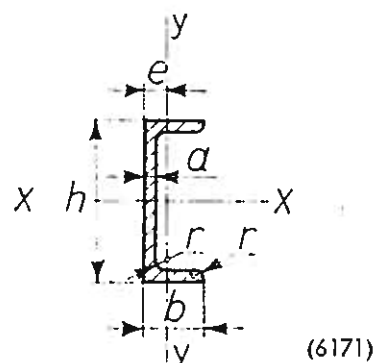
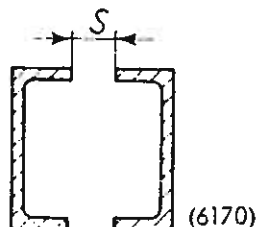
TABELA N.º 10

**Diminuição das intensidades permanentes indicadas
na tabela 9 quando as barras são montadas
com a face maior horizontalmente**

| Quantidade de barras | Largura das barras mm | Espessura e espaço entre barras mm | Diminuição da intensidade permanente indicada na tabela 9 | |
|----------------------------|--------------------------------|--|---|-------------------|
| | | | Pintadas % | Não pintadas % |
| 1 — | 50 ... 200 | 5 ... 10 | 10 | 15 |
| 2 ≡ | | | 15 | 20 |
| 3 ≡≡ | 50 ... 80 100 ... 120 | 5 ... 10 | 15 20 | 20 25 |
| 4 ≡≡≡ | 160 200 | | 25 30 | 30 35 |

TABELA N.º 11

Dimensões e cargas permanentes para perfis de cobre em U



| Perfil | Dimensões em mm | | | | | Secção | |
|--------|-----------------|------|----|-------|------|----------|------------|
| | h | b | a | e | s 1) | [mm² | [] mm² |
| 5 | 50 | 25 | 4 | 7,71 | 25 | 368 | 736 |
| 6 | 60 | 30 | 4 | 8,96 | 25 | 448 | 896 |
| 7 | 70 | 32,5 | 5 | 9,65 | 25 | 625 | 1250 |
| 8 | 80 | 37,5 | 6 | 10,96 | 25 | 858 | 1716 |
| 10 | 100 | 37,5 | 8 | 11,26 | 25 | 1272 | 2544 |
| 12 | 120 | 45 | 10 | 13,29 | 30 | 1900 | 3800 |
| 14 | 140 | 52,5 | 11 | 15,27 | 35 | 2453 | 4906 |
| 16 | 160 | 60 | 12 | 17,25 | 40 | 3072 | 6144 |
| 18 | 180 | 67,5 | 13 | 19,23 | 45 | 3757 | 7514 |
| 20 | 200 | 75 | 14 | 21,21 | 50 | 4508 | 9016 |

1) Os valores das cargas abaixo indicadas são válidos mantendo-se esta distância entre perfis.

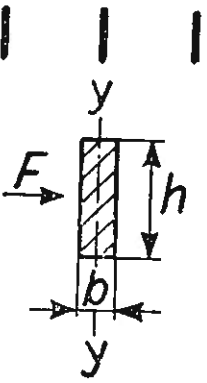
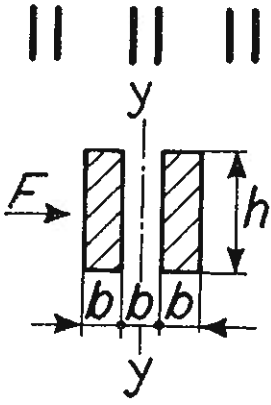
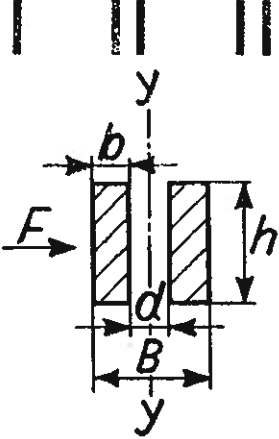
| Perfil | Peso | | Carga permanente em Ampères Corrente alternada 40 ... 60 Hz | | | |
|--------|------------|--------------|--|-------|--------------|-------|
| | [kg/m. | [] kg/m. | Pintados | | Não pintados | |
| | | | [| [] | [| [] |
| 5 | 3,28 | 6,56 | 940 | 2130 | 850 | 1920 |
| 6 | 3,99 | 7,98 | 1100 | 2250 | 990 | 2300 |
| 7 | 5,57 | 11,14 | 1450 | 2600 | 1290 | 2340 |
| 8 | 7,65 | 15,3 | 1800 | 3200 | 1650 | 2900 |
| 10 | 11,3 | 22,6 | 2500 | 4300 | 2300 | 3900 |
| 12 | 16,9 | 33,8 | 3400 | 5900 | 3100 | 5300 |
| 14 | 21,8 | 43,6 | 4200 | 7300 | 3800 | 6500 |
| 16 | 27,3 | 54,6 | 5000 | 8800 | 4500 | 7900 |
| 18 | 33,5 | 67 | 6000 | 10300 | 5400 | 9200 |
| 20 | 40,1 | 80,2 | 6900 | 11900 | 6200 | 10700 |

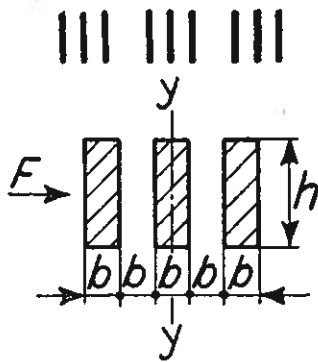
Elevação da temperatura 30°.

Temperatura ambiente 30 a 35°.

TABELA N.º 12

Momentos de inércia e módulos de flexão
de secções simples e compostas

| Perfis (posição vertical) | Momento de inércia I_y (cm ⁴) | Módulo de flexão W_y (cm ³) |
|---|--|---|
|  <p>(6192)</p> | $I_y = \frac{h \times b^3}{12}$ $I_y = 0,0833 \times h \times b^3$ | $W_y = \frac{I_y}{\frac{b}{2}} = \frac{h \times b^2}{6}$ $W_y = 0,167 \times h \times b^2$ |
|  <p>(6174)</p> | $I_y = \frac{13 \times h \times b^3}{6}$ $I_y = 2,17 \times h \times b^3$ | $W_y = \frac{I_y}{1,5 \times b}$ $W_y = 1,44 \times h \times b^2$ |
|  <p>(6181)</p> | $I_y = \frac{h}{12} \times (B^3 - d^3)$ $I_y = 0,0833 \times h \times (B^3 - d^3)$ | $W_y = \frac{h}{6 \times B} \times (B^3 - d^3)$ $W_y = 0,167 \times \frac{h}{B} \times (B^3 - d^3)$ |



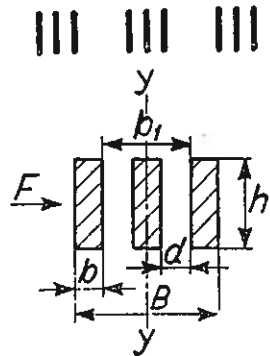
(6176)

$$I_y = \frac{99}{12} \times h \times b^3$$

$$I_y = 8,25 \times h \times b^3$$

$$W_y = \frac{I_y}{2,5 \times b}$$

$$W_y = 3,33 \times h \times b^2$$



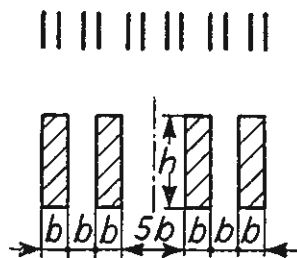
(6184)

$$I_y = \frac{h}{12} \times (B^3 - b_1^3 + b^3)$$

$$I_y = 0,0833 \times h \times (B^3 - b_1^3 + b^3)$$

$$W_y = \frac{h}{6 \times B} \times (B^3 - b_1^3 + b^3)$$

$$W_y = 0,167 \times \frac{h}{B} \times (B^3 - b_1^3 + b^3)$$



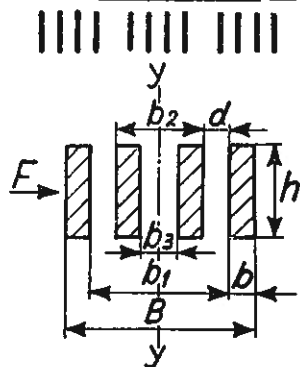
(6178)

$$I_y = \frac{820}{12} \times h \times b^3$$

$$I_y = 68,33 \times h \times b^3$$

$$W_y = \frac{I_y}{5,5 \times b}$$

$$W_y = 12,42 \times h \times b^2$$



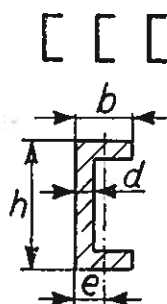
(6185)

$$I_y = \frac{h}{12} \times (B^3 - b_1^3 + b_2^3 - b_3^3)$$

$$I_y = 0,0833 \times h \times (B^3 - b_1^3 + b_2^3 - b_3^3)$$

$$W_y = \frac{h}{6 \times B} \times (B^3 - b_1^3 + b_2^3 - b_3^3)$$

$$W_y = 0,167 \times \frac{h}{B} \times (B^3 - b_1^3 + b_2^3 - b_3^3)$$

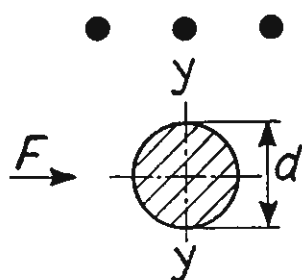


(6180)

$$I_y = \frac{1}{3} \times \left[h \times e^3 \times (h - 2 \times d) \times (e - d^3) + 2 \times d \times (b - e)^3 \right]$$

e - ver tabela 11

$$W_y = \frac{I_y}{b - e}$$



(6187)

$$I = \frac{\pi \times d^4}{64} = \frac{S \times r^2}{4}$$

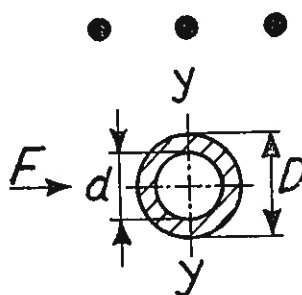
$$I = 0,0491 \times d^4$$

$$I \approx 0,05 \times d^4$$

$$W = \frac{\pi \times d^3}{32} = \frac{S \times r}{4}$$

$$W = 0,0982 \times d^3$$

$$W \approx 0,1 \times d^3$$



(6186)

$$I = \frac{\pi}{64} \times (D^4 - d^4)$$

$$I = \frac{S}{4} \times (R^2 - r^2)$$

$$I \approx 0,05 \times (D^4 - d^4)$$

$$W = \frac{\pi}{32} \times \frac{D^4 - d^4}{D}$$



(6190)

$$I_y = \frac{h^4 - (h - 2 \times d)^4}{12}$$

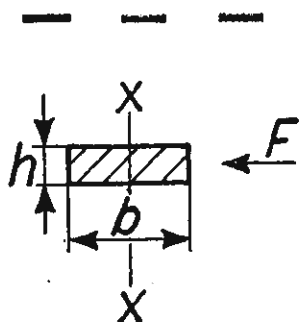
$$I_y = \frac{h^4}{24} = 0,0416 \times h^4$$

S — ver tabela 11

$$W_y = \frac{h^4 - (h - 2 \times d)^4}{6 \times h}$$

$$W_y = \frac{h^3}{12} = 0,0833 \times h^3$$

Perfis (posição horizontal)

Momento de inércia I_x
(cm⁴)Módulo de flexão W_x
(cm³)

(6183)

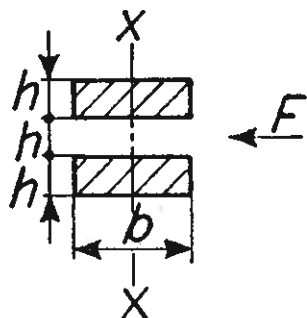
$$I_x = \frac{h \times b^3}{12}$$

$$I_x = 0,0833 \times h \times b^3$$

$$W_x = \frac{I_x}{\frac{b}{2}} = \frac{h \times b^2}{6}$$

$$W_x = 0,167 \times h \times b^2$$

== == ==



(6182)

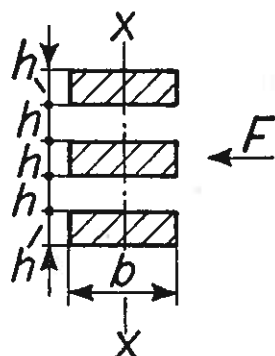
$$I_x = \frac{h \times b^3}{6}$$

$$I_x = 0,167 \times h \times b^3$$

$$W_x = \frac{I_x}{\frac{b}{2}} = \frac{h \times b^2}{3}$$

$$W_x = 0,333 \times h \times b^2$$

≡ ≡ ≡



(6191)

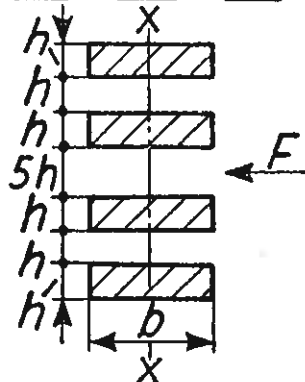
$$I_x = \frac{h \times b^3}{4}$$

$$I_x = 0,25 \times h \times b^3$$

$$W_x = \frac{I_x}{\frac{b}{2}} = \frac{h \times b^2}{2}$$

$$W_x = 0,5 \times h \times b^2$$

≡ ≡ ≡



(6177)

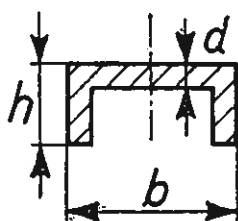
$$I_x = \frac{h \times b^3}{3}$$

$$I_x = 0,333 \times h \times b^3$$

$$W_x = \frac{I_x}{\frac{b}{2}} = \frac{h \times b^2}{1,5}$$

$$W_x = 0,666 \times h \times b^2$$

□ □ □



(6179)

$$I_x = \frac{h \times b^3 - [(h-d) \times (b-2 \times d)^3]}{12}$$

$$W_x = \frac{2 \times I_x}{b}$$

TABELA N.º 13

Momentos de inércia e módulos de flexão de perfis em cobre

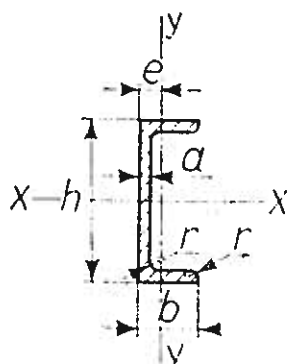


Fig. 1 (6171)

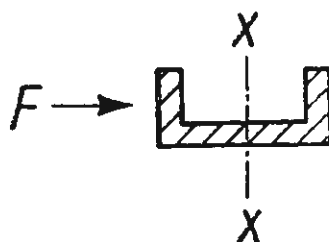


Fig. 2 (6189)

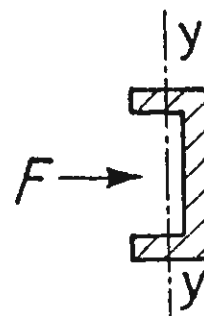


Fig. 3 (6188)

| Perfil U Tama- nho | Figura 1 | | | | | Figura 2 | | Figura 3 | |
|-----------------------------|-----------------|------|----|---|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Dimensões em mm | | | | | I_x | W_x | I_y | W_y |
| | h | b | a | r | e | cm ⁴ | cm ³ | cm ⁴ | cm ³ |
| 5 | 50 | 25 | 4 | 2 | 7,71 | 13,1 | 5,24 | 2,07 | 1,20 |
| 6 | 60 | 30 | 4 | 2 | 8,96 | 23,5 | 7,83 | 3,71 | 1,76 |
| 7 | 70 | 32,5 | 5 | 2 | 9,65 | 43,4 | 12,4 | 5,87 | 2,57 |
| 8 | 80 | 37,5 | 6 | 2 | 11,26 | 77,5 | 19,38 | 10,70 | 4,08 |
| 10 | 100 | 37,5 | 8 | 2 | 10,96 | 167 | 33,4 | 14,29 | 5,38 |
| 12 | 120 | 45 | 10 | 3 | 13,29 | 356 | 59,3 | 30,53 | 9,63 |
| 14 | 140 | 52,5 | 11 | 3 | 15,27 | 632 | 90,3 | 54,13 | 14,54 |
| 16 | 160 | 60 | 12 | 3 | 17,25 | 1042 | 130 | 89,22 | 20,87 |
| 18 | 180 | 67,5 | 13 | 3 | 19,23 | 1622 | 180 | 138,90 | 28,77 |
| 20 | 200 | 75 | 14 | 3 | 21,21 | 2414 | 241 | 206,72 | 38,43 |

Perfis de secção circular

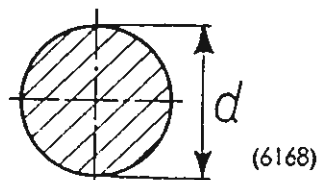


Fig. 4

| d mm | 6 | 8 | 10 | 13 | 16 | 20 | 25 | 30 |
|---------------------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|
| I cm ⁴ | 0,063 | 0,02 | 0,049 | 0,14 | 0,32 | 0,78 | 1,92 | 3,97 |
| W cm ³ | 0,021 | 0,05 | 0,1 | 0,21 | 0,40 | 0,78 | 1,53 | 2,65 |

TUBOS

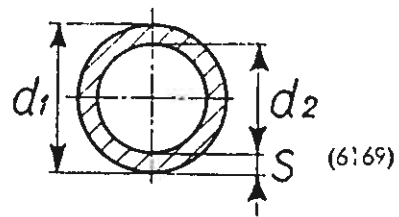


Figura 5

| d ₁ mm | 20 | | | 30 | | | 50 | | | 60 | | |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| d ₂ mm | 16 | 14 | 12 | 26 | 24 | 22 | 44 | 42 | 40 | 54 | 52 | 50 |
| S mm | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 3 | 4 | 5 | 3 | 4 | 5 |
| I cm ⁴ | 0,46 | 0,60 | 0,68 | 1,73 | 2,35 | 2,82 | 12,3 | 15,4 | 18,1 | 21,9 | 27,7 | 32,9 |
| W cm ³ | 0,47 | 0,6 | 0,7 | 1,16 | 1,6 | 1,9 | 4,9 | 6,2 | 7,3 | 7,3 | 9,2 | 11 |

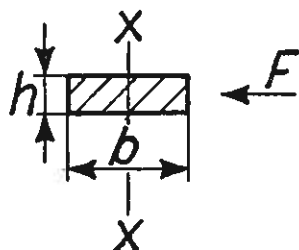
TABELA N.º 14

Momentos de inércia I e módulos de flexão W
de barras simples

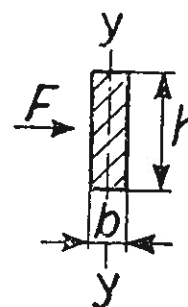
Montagem da barra

Horizontal — — —

Vertical |||



(6183)



(6192)

| Dimensões das barras mm | W_x cm ³ | I_x cm ⁴ | W_y cm ³ | I_y cm ⁴ |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 12 × 2 | 0,048 | 0,0288 | 0,008 | 0,0008 |
| 15 × 2 | 0,075 | 0,0562 | 0,010 | 0,001 |
| 15 × 3 | 0,112 | 0,084 | 0,022 | 0,003 |
| 20 × 2 | 0,133 | 0,133 | 0,0133 | 0,00133 |
| 20 × 3 | 0,200 | 0,200 | 0,030 | 0,0045 |
| 20 × 5 | 0,333 | 0,333 | 0,083 | 0,0208 |
| 25 × 3 | 0,312 | 0,390 | 0,037 | 0,005 |
| 25 × 5 | 0,521 | 0,651 | 0,104 | 0,026 |
| 30 × 3 | 0,450 | 0,675 | 0,045 | 0,007 |
| 30 × 5 | 0,750 | 1,125 | 0,125 | 0,031 |
| 40 × 3 | 0,800 | 1,600 | 0,060 | 0,009 |
| 40 × 5 | 1,333 | 2,666 | 0,166 | 0,042 |
| 40 × 10 | 2,666 | 5,333 | 0,666 | 0,333 |
| 50 × 5 | 2,080 | 5,200 | 0,208 | 0,052 |
| 50 × 10 | 4,160 | 10,400 | 0,833 | 0,416 |
| 60 × 5 | 3,000 | 9,000 | 0,250 | 0,063 |
| 60 × 10 | 6,000 | 18,000 | 1,000 | 0,500 |
| 80 × 5 | 5,333 | 21,330 | 0,333 | 0,0833 |
| 80 × 10 | 10,660 | 42,600 | 1,333 | 0,666 |
| 100 × 5 | 8,333 | 41,660 | 0,4166 | 0,104 |
| 100 × 10 | 16,660 | 83,300 | 1,666 | 0,833 |
| 120 × 10 | 24,000 | 144,000 | 2,000 | 1,000 |
| 160 × 10 | 42,600 | 341,300 | 2,666 | 1,333 |
| 200 × 10 | 66,600 | 666,000 | 3,333 | 1,660 |

TABELA N.º 15

Momentos de inércia I_y e módulos de flexão W_y
de secções compostas normais

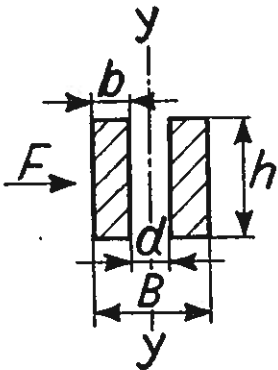
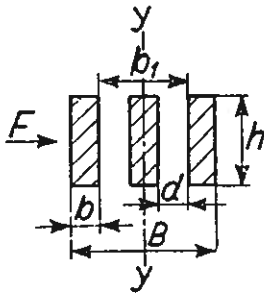
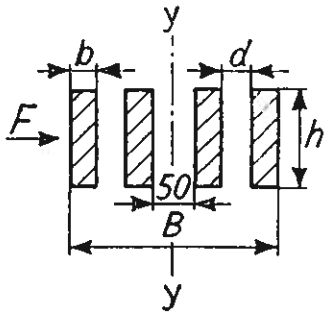



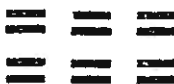
| | | | | | | |
|---|---|--------------------------|--|--------------------------|---|--------------------------|
| h — altura da barra em cm. d — espessura da barra em cm. |  (618') | |  (6184) | |  (6209) | |
| | I_y cm ⁴ | W_y cm ³ | I_y cm ⁴ | W_y cm ³ | I_y cm ⁴ | W_y cm ³ |
| | Valores de I_y e W_y , sendo $d = b$ | | | | | |
| 50 × 5 | 1,355 | 1,80 | 5,15 | 4,125 | — | — |
| 50 × 10 | 10,830 | 7,20 | 41,25 | 16,5 | 341,65 | 62,10 |
| 60 × 5 | 1,625 | 2,16 | 6,18 | 4,95 | — | — |
| 60 × 10 | 12,996 | 8,64 | 49,50 | 19,8 | 409,98 | 74,52 |
| 80 × 5 | 2,168 | 2,88 | 8,24 | 6,60 | — | — |
| 80 × 10 | 17,328 | 11,52 | 66,00 | 24,6 | 546,64 | 199,36 |
| 100 × 5 | 2,71 | 3,6 | 10,3 | 8,25 | — | — |
| 100 × 10 | 21,66 | 14,4 | 82,5 | 33 | 683,3 | 124,2 |
| 120 × 10 | 26 | 17,28 | 99 | 39,6 | 819,96 | 149,04 |

TABELA N.º 16

Momentos de inércia e módulo de flexão de conjuntos de barras

I em cm⁴ — W em cm³

| Barras |  | |  | |  | |  | |
|----------|---|-------|---|-------|---|-------|---|-------|
| mm | I | W | I | W | I | W | I | W |
| 40 × 5 | 5,34 | 2,66 | | | | | | |
| 40 × 10 | 10,66 | 5,33 | | | | | | |
| 50 × 5 | 10,4 | 4,16 | 15,60 | 6,25 | | | | |
| 50 × 10 | 20,8 | 8,32 | 31,2 | 12,48 | 342 | 62,10 | 41,6 | 16,64 |
| 60 × 5 | 18,0 | 6,0 | 27,0 | 9,0 | 51,4 | 18,65 | 36,0 | 12,0 |
| 60 × 10 | 36,0 | 12,0 | 54,0 | 18,0 | 410 | 74,5 | 72,0 | 24,0 |
| 80 × 5 | 42,6 | 10,66 | 63,9 | 16,0 | 68,5 | 24,9 | 85,2 | 21,34 |
| 80 × 10 | 85,2 | 21,32 | 127,8 | 32,1 | 547 | 199,4 | 170,4 | 42,6 |
| 100 × 5 | 83,4 | 16,65 | 124,1 | 25,0 | 85,6 | 31 | 166,6 | 33,4 |
| 100 × 10 | 166,0 | 33,3 | 249,9 | 50,4 | 683 | 124 | 333 | 66,8 |
| 120 × 10 | 288 | 48,0 | 432 | 72 | 820 | 149 | 576 | 96 |
| 160 × 10 | 682 | 85,2 | 1023 | 127,8 | 1092 | 198 | 1364 | 170,4 |
| 200 × 10 | 1333 | 133 | 2000 | 200 | 1370 | 248 | 2672 | 267,2 |

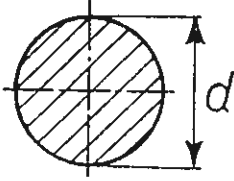
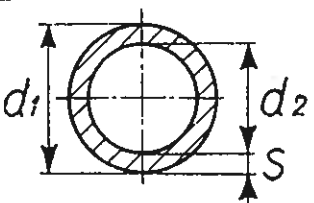
A distância entre barras de cada conjunto é igual à espessura da barra.

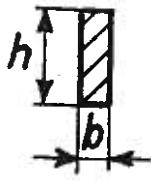

Nos conjuntos de 4 barras, a distância entre a segunda e a terceira barra é igual a 5 vezes a espessura das barras.

TABELA N.º 17

Valores de ressonância por segundo para barras de cobre

$$n = 112 \sqrt{\frac{E \times I}{p \times l^4}} \text{ Hertz; } E = 1200000 \text{ kg/cm}^2 \text{ para cobre}$$

| | Diâmetro mm | Distância entre apoios em cm. | | | | | | | |
|--|----------------|-------------------------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|
| | | 50 | 80 | 100 | 120 | 150 | 180 | 200 | 250 |
|  (6168) | 10 | 122 | 47 | 31 | 22 | 16 | 11 | 8 | 5 |
| | 14 | 173 | 71 | 45,5 | 31 | 22 | 11 | 11 | 8 |
| | 20 | | 102 | 64 | 42 | 31 | 22 | 16 | 11 |
|  (6169) | 20/16 | | 131 | 84 | 59 | 38 | 26 | 21 | < 50 |
| | 30/26 | | 200 | 128 | 89 | 57 | 40 | 33 | |

| | |
|---|--|
|  (6207) |  (6208) |
|---|--|

| b mm | Distância entre apoios em cm | | | | | b mm | Distância entre apoios em cm | | | | | | |
|---------|------------------------------|----|-----|-----|------------------------|---------|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 50 | 80 | 100 | 120 | 150 ; 180 200 ; 250 | | 50 80 | 100 | 120 | 150 | 180 | 200 | 250 |
| 5 | 76 | 29 | 20 | | n < 50 | 40 | n > 100 | 150 | 104 | 73 | 50 | 37 | 24 |
| 6 | 91 | 35 | 23 | | » | 50 | » | 185 | 130 | 88 | 62 | 46 | 30 |
| 8 | 121 | 47 | 33 | | » | 60 | » | 225 | 156 | 108 | 74 | 55 | 36 |
| 10 | 152 | 58 | 40 | | » | 80 | » | 300 | 207 | 142 | 100 | 74 | 48 |
| | | | | | | 100 | » | 370 | 260 | 176 | 125 | 92 | 60 |
| | | | | | | 120 | » | 450 | 312 | 216 | 148 | 110 | 72 |