

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE FIOS E CABOS DE COBRE E ALUMÍNIO EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE EDIFICAÇÕES

COPPER ALLIANCE

JANEIRO DE 2016

SUMÁRIO

Este artigo faz uma avaliação comparativa entre fios e cabos com condutores de cobre e de alumínio/ligas de alumínio utilizados em instalações elétricas de edificações. São examinados argumentos relativos às propriedades físicas do cobre e do alumínio e feitas comparações entre os dois tipos de fios e cabos para a capacidade de corrente, capacidade térmica, peso, seção transversal, resistência mecânica, facilidade e confiabilidade da instalação, confiabilidade das conexões e terminações, aspectos de corrosão e custos.

Com base nestes argumentos, o artigo conclui que os condutores de cobre superam os condutores de alumínio e de ligas de alumínio para todos os tipos de fios e cabos utilizados nas edificações.

INTRODUÇÃO

Todos os metais conduzem eletricidade e calor como pode ser visto na Tabela 1 (abaixo), mas excluindo-se os metais preciosos devido à sua escassez e custo, só o cobre e o alumínio são considerados para o uso em fios e cabos elétricos em edificações devido à sua relativamente alta condutividade elétrica e térmica.

Material	Condutividade Elétrica (S/m) a 20°C	Condutividade Térmica (W-cm/cm ² °C) a 20°C
Prata	$6,3 \times 10^7$	4,30
Cobre 99,95%	$5,80 \times 10^7$	3,94
Ouro	$4,1 \times 10^7$	3,20
Alumínio (1XXX)	$3,5 \times 10^7$	2,50
Ferro	$1,0 \times 10^7$	0,80
Bronze	$7,5 \times 10^6$	-
Chumbo	$4,55 \times 10^6$	0,35
Aço Inoxidável	$1,45 \times 10^6$	0,16

Tabela 1 - Características elétricas e térmicas do cobre e do alumínio (1)

Historicamente, dos dois metais, o cobre tem sido o material condutor preferido para fios e cabos utilizados em instalações de edificações e o uso de condutores de alumínio (*) tem sido comparativamente restrito por normas nacionais e internacionais (#) devido a várias razões, que são exploradas em detalhe neste artigo.

1. CONDUTIVIDADE, CAPACIDADE DE CORRENTE E CAPACIDADE TÉRMICA VOLUMÉTRICA

Entre os dois metais, um cabo fabricado com cobre apresenta uma maior capacidade de corrente ou amperagem do que o fabricado em alumínio considerando-se um condutor com a mesma área de seção transversal, devido à sua maior condutividade elétrica.

Isto pode ser demonstrado pela comparação das capacidades de corrente de cabos construtivamente semelhantes com condutores de cobre e de alumínio, definida pelo método de instalação e pela limitação ao aumento de temperatura devido aos limites térmicos da isolamento. A Tabela 2, abaixo, mostra as capacidades de condução de corrente para cabos de 35 mm², 4 condutores, isolado em XLPE, armado com fios de aço, capa de PVC, normalmente usados em construções com condutores de cobre e alumínio na Europa.

Tipo de Cabo	Método de Instalação	Capacidade de condução de corrente (A)
35 mm ² 4C XLPE/ARMADO/PVC – Condutores de Cobre	Bandeja perfurada, ao ar livre	162 Amperes
35 mm ² 4C XLPE/ARMADO/PVC – Condutores de Alumínio		120 Amperes

Tabela 2 - Capacidade de condução de corrente de cabos construtivamente semelhantes com condutores de cobre e alumínio (2)

Em termos práticos, a utilização de cabos com condutores de cobre permite menor seção transversal, em comparação com as aplicações que utilizam condutores de alumínio - mais corrente elétrica num determinado condutor de mesma área de seção transversal, ou cabos menores utilizados para a mesma amperagem.

Um exame mais aprofundado da Tabela 1 mostra que a condutividade térmica do cobre é, aproximadamente, 60% maior que a do alumínio. Isso acelera a difusão de calor e reduz o aumento da temperatura dos pontos quentes (*hot-spots*) nas terminações e barramentos.

Em suma, a melhor condutividade elétrica e consequente capacidade de corrente, e a maior condutividade térmica fazem do cobre a melhor escolha.

* [As propriedades dos metais referidos neste artigo são de cobre ETP (" *Electrolytic Tough Pitch*". Este é o cobre mais comum, sendo universal para as aplicações elétricas) e alumínio das séries 1xxx (séries denominadas de alumínio puro). Embora as ligas de alumínio da série 8xxx melhorem algumas das propriedades da série 1xxx, estas ainda se encontram dentro da faixa entre alumínio 1xxx e cobre ETP e estas ligas ficam, portanto, automaticamente incluídas em uma comparação genérica entre o alumínio e o cobre.]

[A área mínima da seção transversal de condutores para uso em sistemas de energia de edificações é limitada por Normas Nacionais e Internacionais. Por exemplo, na Europa, o Documento Harmonizado da IEC, HD 60364-5-52, restringe o uso de condutores de alumínio para seções transversais acima de 10 mm² (5). Algumas normas vão além - por exemplo, no Reino Unido, a BS 7671 requer que a área mínima da seção transversal do condutor seja de 1,0 mm² para o cobre e 16 mm² para o alumínio (6). Efetivamente, isto impede de forma eficaz a utilização de condutor de alumínio para muitos serviços de baixa corrente elétrica, tais como a iluminação, devido às dificuldades práticas de instalação dentro das limitações de espaço em eletrodutos e eletrocalhas, bem como nas terminações em tomadas, luminárias etc. Historicamente, deve notar-se que a seção transversal mínima do alumínio foi estabelecida acompanhando a pouca experiência com as instalações e terminações em fios e cabos de alumínio usados em edificações nos anos do pós-guerra.]

2. PROPRIEDADES FÍSICAS

A Tabela 3 destaca algumas características físicas importantes dos dois materiais, que são relevantes para a sua utilização em fios e cabos nas instalações de edificações.

Características	Cobre	Alumínio
Peso para a mesma condutividade (Comparativo)	100	54
Seção transversal para a mesma condutividade (Comparativo)	100	156
Resistência à Tração considerando material de tempera mole (N/mm ²)	200	50 - 60
Teste de Tração a 0,2% considerando material de tempera mole (N/mm ²)	≤ 120	20 - 30
Resistência à Tração considerando material de tempera meio-dura (N/mm ²)	250	85 - 100
Teste de Tração a 0,2% considerando material de tempera meio-dura (N/mm ²)	≤ 180	60 - 65
Resistência à tração para a mesma condutividade (Comparativo)	100	72
Densidade (g/cm ³)	8,91	2,70
Coefficiente de expansão térmica (coeficiente de dilatação linear) - (°C ⁻¹)	17 x 10 ⁻⁶	23 x 10 ⁻⁶
Temperatura para fluência de 0,022%/1000h sob tração diária típica	150 °C	20 °C
Escoamento a frio (<i>cold flow</i>)(Módulo de elasticidade) - (kN/mm ²)	130	70

Tabela 3 - Propriedades Físicas do Cobre e do Alumínio (3)

As implicações práticas destas características para o uso em cabos são investigadas a seguir:

Tomando como exemplo uma carga elétrica de 300 A, trifásica com neutro (TP&N) alimentada por um condutor de cobre ou de alumínio, isolado com XLPE, armado com fios de aço e capa em PVC. As seções transversais necessárias seriam: 4 condutores x 95 mm² XLPE/ARMADOS/PVC em cobre e 4 condutores x 150 mm² XLPE/ARMADOS/PVC em alumínio. As características relativas a cada cabo são apresentadas na Tabela 4 a seguir:

Características	4 condutores de 95 mm ² XLPE/ARMADOS/PVC Condutor de cobre	4 condutores de 150 mm ² XLPE/ARMADOS/PVC Condutor de alumínio
Capacidade de Corrente (Ampacidade)	304 A	305 A
Peso do Cabo (kg/m)	5,51 kg/m	4,5 kg/m
Diâmetro do cabo (mm)	37,7 mm	47,9 mm
Raio de Curvatura (múltiplos do diâmetro - mínimo)	X 8	X 10

Raio Mínimo de Curvatura (mm)	302 mm	479 mm
--------------------------------------	--------	--------

Tabela 4 - Comparação de Propriedades dos Cabos para igual capacidade de corrente (4)

a. PESO E VOLUME

A Tabela 3 mostra que o cobre é aproximadamente 3 vezes mais denso do que o alumínio e aproximadamente 1,5 vezes melhor condutor elétrico. Portanto, um condutor de cobre é aproximadamente duas vezes mais pesado que um condutor de alumínio nu de condutividade equivalente enquanto o condutor de alumínio tem uma vez e meia o volume. Quando, em vez de condutores, são comparados cabos de capacidade de corrente equivalente incluindo seus materiais de isolamento e armação como pode ser visto no exemplo da Tabela 4, o diferencial de peso do cabo de cobre diminui substancialmente, para menos de 20 %, enquanto o cabo de alumínio tem seção transversal e o volume 60 % maior. Assim, a implicação para as cargas relativas impostas sobre a estrutura e o sistema de suporte dos cabos (bandejas, leitos, etc) é muito menor do que as densidades relativas dos dois metais pode sugerir. De fato, como o cabo de alumínio tem uma área de seção transversal maior do que o de cobre para a mesma capacidade de corrente requerida, são necessários sistemas de suportes maiores e, como consequência, há um aumento no peso global do sistema. Em suma, as cargas impostas à estrutura da edificação são muito semelhantes para ambos os tipos de cabos e quaisquer vantagens do alumínio devido à sua densidade mais baixa é neutralizada pelos pesos adicionais do material da isolamento, da armação e do sistema de suporte necessários devido ao seu maior volume.

b. TESTE DE TRAÇÃO, RESISTÊNCIA MECÂNICA E CAPACIDADE DE TREFILAÇÃO

O teste de tração mede a tração necessária para produzir a extensão/deformação permanente de 0,2% em um cabo. Referindo-se à Tabela 3, o cobre suporta tração entre 3 a 6 vezes maior do que a suportada pelo alumínio, resistindo à tração sem perder a sua flexibilidade. É esta propriedade física e flexibilidade inerente ao cobre permitem que cabos de cobre possam ser facilmente puxados em eletrodutos e eletrocalhas com mínimo risco de estiramento (que não pode ocorrer abaixo do teste de tração), alongamento ou até mesmo ruptura.

Por outro lado, enquanto os cabos de alumínio apresentam uma vantagem marginal de peso sobre os cabos de cobre para igual capacidade de corrente, como visto acima, e as forças mecânicas necessárias para puxá-los são geralmente mais baixas, mas não são suficientemente baixas para atenuar as grandes diferenças encontradas nos testes de tração e resistência à tração. Portanto, quando longas extensões de cabos com condutores de alumínio são puxados através de sistemas desuporte, e submetidos a forças de tração elevadas durante o puxamento, estes podem esticar e estrangular (*neck-down*), reduzindo a capacidade de passagem de corrente dos cabos, o que pode resultar em perigoso sobreaquecimento. Em casos extremos, o tracionamento mecânico em cabos condutores de alumínio em rotas longas ou multidirecionais pode até resultar em danos físicos irreparáveis. Geralmente, é necessário um elevado nível de habilidade para garantir que cabos condutores de alumínio não sejam danificados durante a instalação.

c. EXPANSÃO TÉRMICA, FLUÊNCIA E ESCOAMENTO A FRIO

Da Tabela 3, pode-se ver que o coeficiente de expansão térmica do alumínio é cerca de 35 % maior do que a do cobre. Esta característica é de interesse no estudo da expansão e contração de condutores causadas por ciclos térmicos em conexões e terminações elétricas – tais ciclos resultam da variação das cargas elétricas no cabo – geralmente uma função inerente às cargas elétricas das instalações de edificações. No caso do alumínio, a expansão térmica experimentada linearmente ao longo de um cabo durante a operação normal pode introduzir alguma deformação, particularmente no ponto em que as veias isoladas do cabo são separadas em terminações. O problema é agravado quando prensa-cabos estão bem próximos de terminações.

Fluência é a deformação plástica (inelástica) de condutores metálicos que ocorre quando estes são submetidos a forças externas de tração (tensões). A fluência é irreversível, ao contrário de alongamento elástico que reverte assim que a força externa é removida. A fluência depende do nível de tração, de sua duração e da temperatura, e é diferente para cada metal. O efeito da fluência nas terminações de condutores é reduzir a pressão de contato, o que aumenta a resistência elétrica da conexão causando o sobreaquecimento. A Tabela 3 mostra que o alumínio apresenta fluência significativa à temperatura ambiente (20 °C) quando sob tração aplicada, por exemplo, pelo terminal. O cobre exibe fluência semelhante apenas quando exposto a temperaturas de 150 °C, o que é muito acima das temperaturas normais de operação de terminações de fios e cabos utilizados nas instalações elétricas de edificações.

Teste comparativo realizado pelo Powertech Laboratories Inc. (8) determinou que, embora as ligas de alumínio da série 8000 tenham um desempenho melhorado para fluência em comparação com o alumínio, ainda ficam atrás do desempenho do cobre. Além disso, existem grandes variações entre as ligas da série 8000 adquiridas de diferentes fontes e em algumas foram encontradas características piores que as obtidas para o alumínio. Este teste comparativo também estabeleceu que ambos, o alumínio e suas ligas, têm um desempenho significativamente pior do que o cobre em termos de relaxamento de tensão (*stress relaxation*).

Escoamento a frio (*cold flow*) é um termo relacionado que também se refere à deformação permanente de um material quando submetido a uma força. No entanto, o escoamento a frio é o resultado de uma força momentânea e não varia ao longo do tempo. O escoamento a frio é uma propriedade necessária dos metais que permite fazer uma boa conexão entre componentes durante um processo de conexão. A maior dureza do cobre em relação ao alumínio tende a mostrar que as conexões ou terminações prensadas sofrem redução significativa do escoamento a frio com a aplicação de altas pressões de contato. Novamente este efeito pode levar a uma redução na pressão de contato e no aumento da resistência elétrica da conexão.

Todos estes efeitos resultam em conexão elétrica muito mais pobre para os fios e cabos de alumínio com a utilização de conectores mecânicos, que são normalmente utilizados em instalações de edificações, quando comparados aos fios e cabos de cobre.

d. RIGIDEZ MECÂNICA – CONDUTORES SÓLIDOS VS ENCORDADOS

Nas instalações elétricas de edificações (conforme a IEC 60228), são permitidos a utilização de condutores de cobre e alumínio nas classes de encordoamento 1 (sólidos => fios) e 2 (encordados => cabos). A norma estabelece que a seção mínima para condutores de alumínio da classe 1 e classe 2 é de 10 mm² e para condutores de cobre é a partir de 0,5 mm².

Referindo-nos novamente às áreas das seções transversais para a mesma capacidade de corrente, um cabo com condutor de cobre será mais fácil de instalar - a "rigidez mecânica" de um cabo é determinada pela área da seção transversal e, conseqüentemente, pelo diâmetro - o cabo de cobre terá diâmetro menor e será menos rígido. Cabos de alumínio encordado só estão disponíveis para áreas das seções transversais superiores a 10 mm² e têm fios elementares maiores em comparação com os respectivos equivalentes de cobre.

Esta inerente "rigidez" impacta no processo de instalação, em muitos casos. A relativa rigidez também significa que cabos de alumínio podem ficar "definitivamente conformados" durante a instalação se os raios de curvatura mínimos são ultrapassados, resultando em torções no cabo que são difíceis, se não impossíveis de remover, que permanecem como potenciais fraquezas ou pontos quentes se o cabo é subsequentemente endireitado durante a instalação.

e. TAMANHOS DOS SISTEMAS DE SUPORTE E RAIOS MÍNIMOS DE CURVATURA

Como destacado anteriormente, para a mesma capacidade de corrente, a diferença nos pesos dos cabos completos com condutores de cobre e de alumínio é relativamente pequena. No entanto, o impacto do maior diâmetro dos cabos com condutores de alumínio, muitas vezes resulta em que os tipos comuns de sistemas de suporte, tais como bandejas para cabos, necessitam ser maiores do que os requeridos para cabos com condutores de cobre.

A Tabela 4 mostra que o aumento no diâmetro do cabo é de cerca de 27% com o consequente aumento no tamanho do sistema de suporte e do espaço ocupado pelos cabos ao longodas instalações.

A limitação imposta pelos raios internos de curvatura para cabos de cobre e de alumínio são muito semelhantes e para os tipos de cabos comparáveis é provável que sejam de 6-10 vezes os respectivos diâmetros externos, dependendo da construção do cabo, com os cabos de alumínio tendo raios de curvatura geralmente maiores do que os de cobre. Quando considerado do ponto de vista da mesma capacidade de corrente, os cabos com condutores de alumínio terão um diâmetro externo do cabo maior e um raio de curvatura maior e, portanto, necessitam de um espaço fisicamente maior, para fazer a curva. A Tabela 4 mostra que os raios de curvatura aumentam (neste caso) em cerca de 58%.

Com base na capacidade de corrente equivalente e comparando condutores de cobre encordoados com condutores de alumínio sólidos, os raios de curvatura para os tipos de cabos de alumínio serão maiores do que aqueles para os tipos de cabos de cobre, com um consequente aumento da ocupação de espaço e potenciais problemas de redução de espaço útil vertical prejudicando a entrada de painéis elétricos ou outros equipamentos.

O aumento do tamanho e dos raios de curvatura muitas vezes resultam em maiores sistemas de suporte de cabos, que impactam o espaço disponível nas edificações e muitas vezes causam conflitos com outros sistemas instalados, tais como "HVAC" (sistema de ar condicionado com aquecimento e ventilação).

Por outro lado, é possível instalar mais cabos com condutores de cobre em um dado tamanho de sistema de suporte, proporcionando maior flexibilidade para as futuras modificações ou expansões.

- f. EM ALGUMAS INSTALAÇÕES, É NECESSÁRIO UTILIZAR SISTEMAS DE SUPORTE DE CABOS MUITO COMPACTOS DEVIDO ÀS LIMITAÇÕES DE ESPAÇO, EXIGINDO CURVATURAS DE CONDUTORES DE ATÉ 90 GRAUS. EM TAIS CASOS, APENAS CONDUTORES DE COBRE FLEXÍVEIS E MUITO FLEXÍVEIS PODEM SER UTILIZADOS (CLASSES DE ENCORDAMENTO 5 E 6 DA IEC 60228, RESPECTIVAMENTE), SENDO QUE OS CABOS DE ALUMÍNIO NÃO SÃO ADEQUADOS.**

Em resumo, parecem suportados os argumentos dos condutores de cobre serem mais flexíveis, resistentes e mecanicamente robustos em comparação com o alumínio. As desvantagens do peso adicional do cobre em comparação com o alumínio são limitadas quando são considerados o cabo completo e o sistema de suporte, sendo que qualquer desvantagem prevalece sobre o tamanho aumentado do cabo de alumínio e do seu sistema de suporte para cabos de capacidade de condução de corrente equivalente.

3. CONEXÕES E TERMINAÇÕES

a. CONFIABILIDADE DO CONTATO

Uma conexão elétrica confiável deve garantir o fluxo ininterrupto de corrente em todas as condições de operação ao longo do tempo. A qualidade e a estabilidade do contato metal-metal, cuja ciência ainda não foi completamente compreendida devido à sua complexidade, são críticas para uma boa conexão. As falhas de conexão ocorrem quando este contato metal-metal fica degradado e a resistência elétrica de contato aumenta, o que pode ser devido a uma combinação de condições de operação (por exemplo, pressão de contato, tensão, corrente, temperatura, umidade, etc.) e fatores tecnológicos (por exemplo, tipo de materiais em contato, geometria do contato, condições de superfície, etc.) (10).

Na prática, até mesmo a mais macia das superfícies metálicas não é plana, pois contém projeções minúsculas, chamadas de *asperezas*. Na interface de contato entre dois metais, as asperezas da superfície de um metal perfuram a camada de óxido e os contaminantes da superfície do outro metal para estabelecer o contato metal-metal e, portanto, a realização de caminhos condutores. Assim, a área real disponível para conduzir eletricidade é menor do que a área física de contato, aumentando, efetivamente, a resistência elétrica. Nas superfícies metálicas, a presença das finas camadas de óxido, sulfetos e compostos inorgânicos aumentam ainda mais a resistência elétrica de contato. O resultado é que a perda de calor e o aumento da temperatura durante o fluxo de corrente são mais elevados no contato do que nos corpos dos elementos de conexão. Em uma boa conexão, esta diferença de temperatura é pequena, mas em uma conexão ruim, a temperatura mais elevada acelera a deterioração da área de contato, aumentando ainda mais sua resistência elétrica e temperatura, num ciclo vicioso até a falha final do conexão, além de constituir um risco de incêndio na edificação. Este processo é gradual e lento sem deterioração perceptível até uma falha rápida nas fases finais.

b. EXPOSIÇÃO DO CONDUTOR

A dureza relativa do cobre em comparação com o alumínio torna-o mais resistente a arranhões e cortes que podem ocorrer durante o processo de retirada do isolamento do condutor na preparação da uma terminação. O procedimento usual de "marcar a circunferência" (*ringing*) no ponto em que deve ser removida a isolação também introduz um "corte" contínuo no material do condutor.

Onde os condutores de alumínio estão sujeitos a cortes, arranhões ou foram "marcados" (*ringing*), estas imperfeições podem levar à "falha por fadiga" quando sujeitos a movimentos devido a repetidas expansões e contrações ou vibração. O coeficiente de expansão térmica do alumínio significativamente mais elevado em comparação com a do cobre, faz com que a exposição a ciclos térmicos, devido às alterações de cargas elétricas, possa criar movimento suficiente para que pequenas imperfeições no condutor de alumínio deteriorem ocasionando áreas de elevada resistência elétrica, causando pontos quentes, ou mesmo, a ruptura do condutor.

Uma consideração adicional coloca que ao expor o condutor na atmosfera, há formação de contaminantes de superfície. Óxidos, cloretos e sulfetos do metal condutor base são comuns quando o condutor é exposto à atmosfera nas terminações. No entanto, o seu impacto sobre a conexão elétrica é muito diferente para o cobre e o alumínio. A principal diferença é que os óxidos de alumínio são duros, de difícil remoção e isolantes elétricos (a resistividade do Al_2O_3 é de $10^{24} \mu\Omega\cdot\text{cm}$), enquanto que os óxidos de cobre são mais moles e, embora não tão condutores como o cobre, permanecem condutores quando são formados (a resistividade do Cu_2O é de $10^{10} \mu\Omega\cdot\text{cm}$). Como resultado, as forças de contato aplicadas produzem um bom contato metal-metal com ruptura mais fácil da camada de óxido de cobre, e uma maior área condutora total devido à condutividade do óxido de cobre. Em contrapartida, no caso do alumínio, o fluxo de corrente é restrito a uma zona limitada onde o duro óxido de alumínio é rompido, com dificuldade consideravelmente maior, resultando em um contato metal-metal menos confiável do que com o cobre.

Esta é também a razão por que condutores de alumínio exigem preparação da superfície para remover estes óxidos (geralmente por meios mecânicos como a escova de aço) imediatamente antes de qualquer nova tentativa de fazer uma terminação, e também exigem proteção contínua por meio de compostos para contato que bloqueiam o contato com o ar (e também da umidade).

c. CORROSÃO, METAIS DIFERENTES E REAÇÃO GALVÂNICA

Dois fatores estão associados à corrosão – a ação atmosférica e a ação galvânica.

Para a ação atmosférica provocar a corrosão, a umidade e o oxigênio devem estar presentes. É incomum ter umidade significativa presente nas terminações elétricas; no entanto a umidade na forma de condensação pode estar presente em ambientes de elevada umidade. Óxidos que ocorrem naturalmente tanto nos condutores de alumínio como nos de cobre tendem a evitar a corrosão significativa do condutor quando na presença de pequenas quantidades de umidade.

A ação galvânica resulta em corrosão quando dois metais diferentes, na série eletrolítica, estão em contato físico, tal como o alumínio e o cobre,. Neste caso, a umidade atua como eletrólito: o condutor de cobre torna-se o cátodo e recebe uma carga positiva; o condutor de alumínio torna-se o ânodo e recebe uma carga negativa. O fluxo de corrente resultante do ânodo para o cátodo ataca o alumínio, deixando o cobre inalterado.

A conexão de alumínio e cobre, em última análise, falha pela ação galvânica de duas formas: eletricamente, pela redução na área da superfície de contato, e mecanicamente, pela severa corrosão do conector de alumínio.

O cobre utilizado na fiação de edificações não é afetado pela corrosão galvânica quando conectado a outros metais e ligas menos nobres, tipicamente utilizados nos equipamentos e acessórios, assegurando a confiabilidade e a longevidade da fiação instalada nas edificações. Os fios e cabos de cobre utilizados neste tipo de instalação são compatíveis com uma grande variedade de materiais normalmente utilizados nos equipamentos, tais como tomadas, plugues e disjuntores, de modo que a corrosão de seus contatos é menos provável.

Por outro lado, para que a corrosão seja evitada, os condutores de alumínio necessitam de diversas técnicas de conexão dependendo dos tipos de materiais utilizados para os terminais dos equipamentos ou acessórios, e não apenas a utilização de selantes de contatos, terminações bimetálicas ou terminais especiais nos equipamentos.

d. EXPANSÃO TÉRMICA E MATERIAIS DIFERENTES

Como anteriormente destacado, o coeficiente de expansão térmica para o cobre e o alumínio são tais que, quando aquecidos pela corrente de carga, os dois materiais expandem a taxas significativamente diferentes (35% mais elevada para o alumínio). Para as conexões nas terminações de cobre com cobre, cobre com bronze ou cobre com aço, os coeficientes de expansão térmica são relativamente similares e não tendem a afrouxá-las, permanecendo firmes durante toda a vida da instalação.

Por outro lado, com condutores de alumínio em terminações semelhantes, a elevada diferença da expansão térmica é intensificada pelas mudanças na carga elétrica e conseqüentemente, o aquecimento variável pode resultar em terminações afrouxadas ao longo do tempo. À medida que as microscópicas pontes de contato metal-metal se rompem, a resistência elétrica de contato aumenta progressivamente levando ao superaquecimento, à abertura de arcos e ao potencial risco de incêndio.

O repetido movimento relativo entre as superfícies de contato, devido à expansão térmica diferencial e o aquecimento da conexão conforme a alimentação elétrica é ligada e desligada, também leva a danos na superfície de contato devido à fricção (*fretting*), prejudicando ainda mais o contato elétrico.

Outro resultado da maior expansão térmica do alumínio é o avanço termoelástico (*thermoelastic ratcheting*). Em uma conexão aparafusada de Al-Cu, quando é utilizado um parafuso de aço, o aperto excessivo do parafuso pode deformar plasticamente os condutores de alumínio e cobre durante o aquecimento, os quais não podem recuperar as suas dimensões originais durante o resfriamento. Repetidos aquecimentos e resfriamentos podem, portanto, causar o afrouxamento da conexão, o que, por sua vez, irá aumentar a resistência elétrica de contato e a temperatura da conexão.

Da Tabela 3, conforme já foi destacado anteriormente, a fluência (*creep*) é também uma questão importante quando se examinam terminações de cobre e alumínio. Devido ao baixo índice de fluência do cobre nas temperaturas normais dos condutores, as conexões simples, como terminações aparafusadas ou prensadas podem ser feitas com segurança. A fim de combater a fluência (e o escoamento a frio) em condutores de alumínio, são necessários arranjos especiais, que incluem o uso de arruelas de pressão e parafusos/grampas especialmente revestidos. Atenção aos ajustes de torque indicados pelos fabricantes, pois são fundamentais para garantir a longevidade da terminação.

Um método usado para combater os problemas de metais diferentes e da expansão térmica é o uso de terminações bimetálicas cobre/alumínio. Estes terminais bimetálicos possuem uma parte tubular de alumínio que irá receber o condutor de alumínio (geralmente por compressão) e a outra parte de cobre, estanhado ou não, (formato pino ou olhal) exotermicamente soldada à parte tubular de alumínio durante o seu processo de fabricação.. Esta parte de cobre do terminal bimetálico será conectada aos terminais dos equipamentos. Este recurso é eficaz, mas implica em um acréscimo no custo e uma desvantagem de tamanho que muitas vezes requer maior espaço para estas terminações.

e. MÃO DE OBRA

Fica claro que, embora terminações eficientes possam ser feitas em condutores de alumínio, o nível de habilidade necessária também é maior para evitar os problemas relacionados aos metais diferentes, ou seja, corrosão galvânica, ruptura por tração e fluência. A habilidade adicional e o esforço requeridos para terminações confiáveis em condutores de alumínio implicam em um maior custo.

f. RESUMO

Em resumo, a alegação de que o cobre é um melhor material condutor para as terminações de uma ampla gama de equipamentos elétricos utilizados em instalações de edificações parece ser suportada pelos critérios de resistência mecânica, durabilidade, resistência à corrosão e influências térmicas. Por outro lado, embora terminações para condutores de alumínio sejam inteiramente possíveis para uma gama semelhante de equipamentos elétricos, são necessárias terminações especiais, técnicas, e um alto grau de habilidade juntamente com o aumento do tamanho dos equipamentos e do tempo de execução.

4. COMPARAÇÕES ECONÔMICAS RELATIVAS

A diferença de custo entre o cobre e alumínio varia de acordo com o custo flutuante dos metais básicos no mercado mundial de *commodities*. A tendência histórica dos custos das matérias-primas é apresentada na Figura 1 (7).

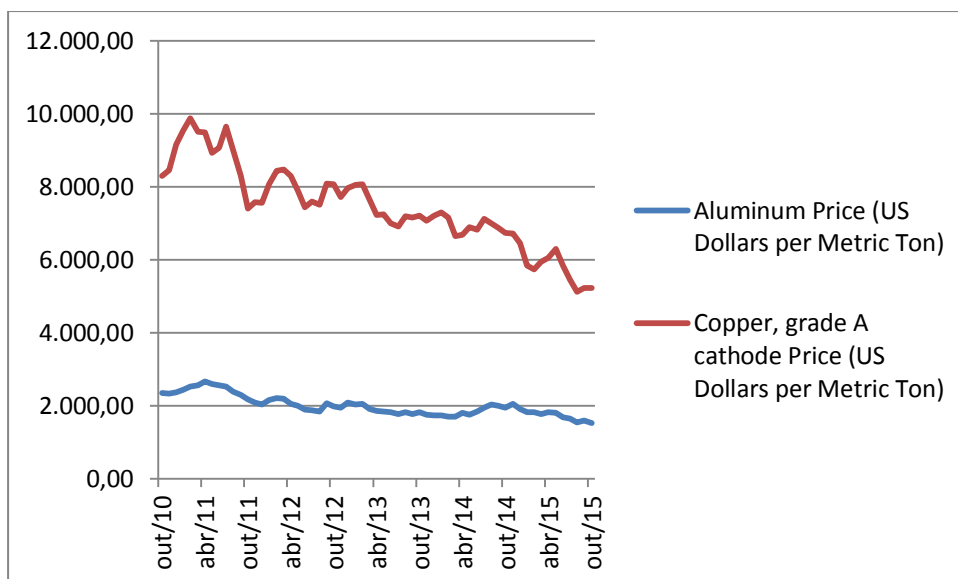


Figura 1 – Série Histórica dos custos do Cobre e Alumínio (7)

O custo do alumínio é muito menor do que o do cobre, atualmente é cerca de trinta por cento inferior.

Quando considerado sob a perspectiva de um cabo elétrico, para uma mesma seção, o cabo com condutor de alumínio é mais barato do que o cabo com condutor de cobre para quase todos os tipos de produtos. Quando comparado com base na mesma ampacidade, no entanto, o aumento na seção do cabo de alumínio (geralmente, por cerca de 60%) começa a produzir uma menor diferença nos custos dos produtos. Quando os custos de terminais especiais, o aumento do tamanho do sistema de suporte e o aumento dos níveis de habilidade necessários para a instalação são levados em consideração, são insignificantes as diferenças no custo global entre os tipos de condutores instalados para atender uma determinada carga. Por outro lado, se um equipamento elétrico for modificado para que seus terminais ou barramentos sejam compatíveis com o alumínio, a vantagem do custo se move rapidamente a favor do cobre e não do alumínio.

O impacto financeiro real, contudo, deve ser revisto em termos do tempo de vida útil do sistema, o que inclui as perdas de energia, as chamadas de manutenção e a possibilidade para a expansão do sistema. Os requisitos de manutenção para os cabos de alumínio são mais elevados devido à fluência e degradação dos cabos durante a vida útil da edificação. O cobre, devido às suas propriedades físicas, não flui ou afrouxa as conexões, não apresenta nenhum problema de incompatibilidade entre diferentes materiais, e pode se efetuar conexões facilmente. O custo da propriedade associado ao de uma instalação com condutor de cobre é, portanto, substancialmente mais baixo durante a vida útil da instalação.

5. CONCLUSÃO

Este artigo fez uma avaliação comparativa de fios e cabos com condutores de cobre e alumínio/ligas de alumínio utilizados em instalações elétricas de edificações. Foram examinados argumentos relativos às propriedades físicas do cobre e do alumínio, bem como comparações entre estes dois tipos de metais para fios e cabos considerando capacidade de corrente, capacidade térmica, peso, seção transversal, resistência mecânica, facilidade e confiabilidade da instalação, confiabilidade das conexões e terminações, aspectos de corrosão e custos.

Com base nestes argumentos, o documento conclui que os condutores de cobre superam os condutores de alumínio e de ligas de alumínio em cada item, para todos os tipos de fios e cabos utilizados em edificações.

REFERÊNCIAS

1	Table 1 – Resistivity, Conductivity and Thermal Conductivity – www.copper.org acessada em janeiro de 2012
2	Table 2 - BS 7671:2008 Incorporating Amendment 1 – Requirements for electrical Installations, IET/BS1 2008 and 2011
3	Table 3 – Physical Properties of Copper and Aluminium, DO Wiley.
4	Table 4 – Eland cables, www.elandcables.co.uk, acessada em janeiro de 2012
5	INTERNATIONAL STANDARD IEC 60364-5-52 Electrical installations of buildings – Part 5-52: Selection and erection of electrical equipment – Wiring systems
6	BS 7671:2008 Incorporating Amendment 1 – Requirements for electrical Installations, IET/BS1 2008 and 2011 – Regulation 524.1 and Table 52.3
7	Historic Spot Prices – http://www.indexmundi.com/ ,
8	CONNECTABILITY TESTING OF COPPER AND ALUMINUM WIRING, PHASE 2: Current Cycling Tests – Mechanical Connectors - POWERTECH LABS INC. Report #: PL-00236-REP1, 27 June 2014. https://www.youtube.com/watch?v=ninqsZihz7g
9	Reliability of power connections, BRAUNOVIC Milenko, Journal of Zhejiang University SCIENCE A, ISSN 1009-3095 (Print); ISSN 1862-1775 (Online), January 2007

- Documento traduzido do original produzido por European Copper Institute.