



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Tecnologia de Conexão de Cabos de Alumínio em Barramentos de Ligas de Cobre

	E. R. de Moraes	
	AMPLA	
	emoraes@ampla.com	

J. A. La Salvia	T. E. Gehrman	L. O. M. Borelli
Tyco Electronics	Tyco Electronics	Tyco Electronics
jsalvia@tycoelectronics.com	tegehrman@tycoelectronics.com	lborelli@tycoelectronics.com

Palavras-chave

Alumínio

Cobre

Barramentos

Cabos

Conexões

Resumo

Esse trabalho objetiva mostrar as vantagens e desvantagens das diversas opções de condutores e suas conexões bi-metálicas disponíveis no mercado, enfatizando seus usos específicos na interligação de circuitos construídos com cabos de alumínio e barramentos de cobre e suas ligas. Com a crescente utilização de cabos concêntricos para aplicações anti-furto aliada à tendência de substituição do material condutor desses de cobre por alumínio, faz-se necessário um estudo apurado das conexões resultantes, analisando-se as soluções disponíveis e propondo novas alternativas mais adequadas à realidade brasileira e de outros países em desenvolvimento, principalmente com relação a custos, aplicação em campo e garantia da qualidade para evitar a interrupção do serviço de distribuição de energia elétrica.

1. Introdução

Refletindo a boa relação custo benefício, cada vez mais as Concessionárias de Energia Elétrica têm buscado novas aplicações para os cabos de alumínio, em substituição aos cabos de cobre. Veremos então comparativos entre esses dois materiais clássicos, utilizados como condutores de energia elétrica, nos concentraremos nas tecnologias de conexão elétrica existentes e proporemos uma nova solução, voltada para atender aos problemas decorrentes da utilização de cabos de alumínio em barramentos de cobre, ou ainda em cabos multifilares mesmo os de cobre, de difícil manuseio em campo.

As conclusões deste trabalho são respaldadas, tanto por testes de laboratório, quanto por resultados de rotas-pilotos de campo.

2. Desenvolvimento

I. *Comparações entre alumínio, cobre, cabos e conexões elétricas desses condutores*

Inicialmente, na Tabela 1, apresenta-se uma comparação básica entre os cabos de alumínio e os de cobre. Algumas características específicas definem a melhor escolha em cada caso, mas comumente o alumínio é bastante utilizado em linhas aéreas de transmissão e distribuição, enquanto o cobre o é em instalações subterrâneas, industriais e residenciais, além de nos locais que sofrem alta agressividade ambiental (ex.: regiões costeiras ou de poluição elevada), por sua excelente resistência à corrosão.

Por possuir menor condutividade elétrica para se conduzir uma mesma corrente em temperaturas similares, é necessário um cabo de maior bitola de alumínio para substituir um cabo existente de cobre (Ex.: de maneira simplificada, o equivalente a um cabo de 10 mm² de cobre é um cabo de 16 mm² de alumínio). Em contrapartida, como a densidade do alumínio é cerca de três vezes menor do que a do cobre, para se conduzir essa mesma corrente elétrica, necessita-se de um cabo de alumínio de cerca de metade do peso de um cabo de cobre.

Essas características explicam as escolhas técnicas clássicas: quando se requer menor peso, como é o caso de linhas de transmissão ou distribuição aéreas, o cabo de alumínio é o preferido, enquanto nos casos em que se possui menos espaço disponível, o cabo de cobre é o preferido. Em resumo, o alumínio possui como principais vantagens seu melhor custo/peso e, assim é também menos atraente ao furto, enquanto que o cobre é melhor condutor elétrico, é mais resistente à corrosão e, portanto, é a melhor – e em alguns casos, a única – opção para aplicação em determinados locais.

Tabela 1

Característica	Alumínio	Cobre
Utilização mais comum	Linhas de transmissão e distribuição de energia aéreas	Instalações subterrâneas, residenciais e industriais (de fato a NBR5410 restringe o uso de alumínio em baixa tensão para algumas instalações específicas – vide nota abaixo)
Condutividade Elétrica (Ex: para uma mesma corrente)	~ 60% IACS Ex: Cabo 16 mm ²	~ 100% IACS Ex: Cabo equivalente 10 mm ²
Densidade Relação peso/corrente	2,7 g/cm ³ metade do peso para uma mesma corrente	8,9 g/cm ³
Escolha técnica clássica	menor peso é melhor (linhas aéreas)	mais compacto é melhor (eletrodutos / bandejas)
Vantagens	melhor custo benefício menos atraente ao furto	melhor condutor elétrico melhor opção para zonas altamente agressivas mais resistente à corrosão

Conforme nota da própria ABNT NBR 5410: “As restrições impostas ao uso de condutores de alumínio refletem o estado atual da técnica de conexões no Brasil. Soluções técnicas de conexões que atendam às ABNT NBR 9313, ABNT NBR 9326 e ABNT NBR 951, e que alterem aquelas restrições, devem ser consideradas em norma complementar e futuramente incorporadas a esta Norma”.

Pela atual excelente razão custo benefício, a Indústria e as Concessionárias de Energia têm se esforçado por encontrar soluções para a utilização dos cabos de alumínio cada vez mais em novas aplicações e/ou em substituição aos condutores de cobre¹. A Tabela 2 mostra a razão de preços entre o cobre e o alumínio e suas ligas, conforme dados históricos da Bolsa de Metais de Londres. Claramente se percebe a tendência de reajuste de preço para o cobre, com índices mais significativos. Por outro lado, analisando-se apenas os valores em si, é notável a grande valorização de ambas as *commodities* neste período. O Gráfico 1 ilustra os preços em US\$ / tonelada do alumínio (esquerda) e do cobre (direita), no período de janeiro/2000 a dezembro/2006.

Tabela 2

Material	janeiro/2004	janeiro/2005	janeiro/2006	janeiro/2007
Cobre / Alumínio	1,5	1,7	2,0	1,9
Cobre / Alumínio Liga	1,6	1,9	2,3	2,5

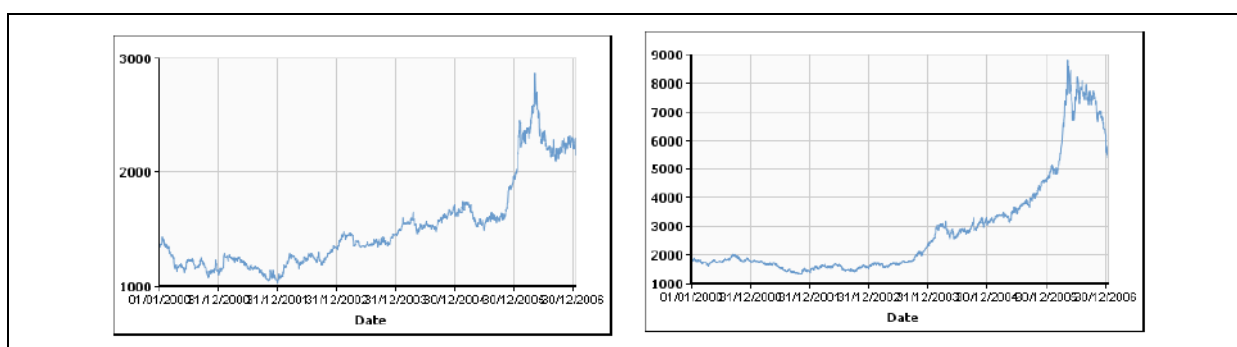


Gráfico 1

Um dos casos estudados aqui é a substituição de cabos concêntricos ou anti-furto manufacturados tradicionalmente em cobre, por similares em alumínio. A Figura 1 mostra a formação típica de um destes cabos, neste caso para aplicação monofásica, com um condutor central que é conectada a uma fase e uma malha externa, que é conectada ao neutro, além das respectivas camadas isolantes. Com formações similares também existem no mercado cabos concêntricos com duas ou até três fases.

Nos testes em campo foram utilizados cabos concêntricos com condutor interno de filamentos de alumínio 1350 e malha externa na liga de alumínio 5005. Observou-se uma maior dificuldade para o manuseio do cabo em alumínio, em comparação ao cobre, devido a seu maior raio mínimo de curvatura, além de maior facilidade de quebra dos filamentos mais finos.

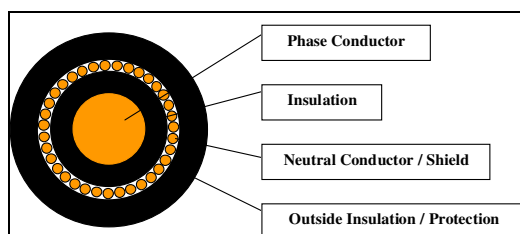


Figura 1

Normalmente o condutor utilizado na fase é de formação sólida ou classe 2, enquanto que o condutor neutro é constituído de fios classe 5 ou 6. Esses cabos são utilizados em sistemas de distribuição de energia elétrica, em conjunto com diversos outros componentes tecnológicos como conectores cunha, conectores de perfuração, caixas de distribuição com borneiras de efeito mola, cabos isolados pré-reunidos e mantas termo-contráteis, para diminuir as perdas técnicas e não-técnicas².

Com relação às características de conexão elétrica dos cabos de alumínio e cobre, a Tabela 3 ilustra um interessante comparativo, onde os problemas típicos de conexão de cabos de alumínio são apresentados, além de destacar a facilidade de conexão dos cabos de cobre.



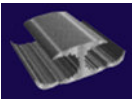
Tabela 3

Característica	Alumínio	Cobre
Conexões Elétricas	<p>Quando exposta ao oxigênio, a superfície do alumínio é imediatamente recoberta por uma camada invisível de óxido, de difícil remoção e altamente isolante. Assim, em condições normais, se encostarmos um condutor de alumínio em outro, é como se estivéssemos colocando em contato dois isolantes elétricos, ou seja, não haveria contato elétrico entre eles. Nas conexões em alumínio, um bom contato somente será conseguido se rompermos essa camada de óxido. Essa função é obtida através da utilização de conectores apropriados que, com o exercício de pressão suficiente, rompem a camada de óxido.</p> <p>Além disso, quase sempre são empregues compostos que inibem a formação de uma nova camada de óxido, uma vez removida a camada anterior.</p>	<p>Muito simples de realizar.</p> <p>Não apresenta grandes requisitos especiais.</p> <p>Em determinadas aplicações de baixa corrente e responsabilidade, até mesmo a “charrua” pode ser suficiente.</p> <p>Obviamente, em aplicações técnicas, de alto volume, existem diversas tecnologias disponíveis.</p>

II. *Comparações entre as tecnologias de conexão existentes*


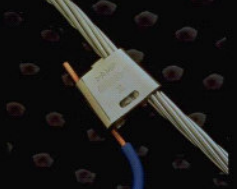
Dentre as diversas tecnologias de conexão existentes, as Tabelas 4, 5 e 6 apresentam as vantagens e desvantagens de cada uma.

Tabela 4

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
<p>Torção (Charrua)</p> 	Barato (só mão de obra)	<p>Contato ruim e intermitente</p> <p>Resistência mecânica fraca</p> <p>Inadequada para alumínio</p>
<p>Solda (conexão exotérmica)</p> 	Contato excelente se executado adequadamente (Ex.: placas de circuito impresso em processo industrial)	<p>Instalação e inspeção difícil, cara e complicada para aplicações em campo (se resume a aterramento)</p> <p>Dificuldade adicional para alumínio</p>
<p>Conectores a parafuso</p> 	Grande faixa de cabos e não necessita ferramenta especial	<p>Necessita controle de torque</p> <p>Mais suscetível a corrosão</p> <p>Não possui adaptação elástica</p> <p>Pode afrouxar ou ser aplicado com torque excessivo / risco quebra</p>
<p>Conectores a Compressão</p> 	<p>Bom contato elétrico para diversas aplicações (Ex.: terminais para usos automotivos, eletrodomésticos, etc.)</p> <p>Custo relativamente baixo</p>	<p>Necessita ferramentas especiais</p> <p>Elevado estresse mecânico</p> <p>Deformação permanente dos condutores</p>

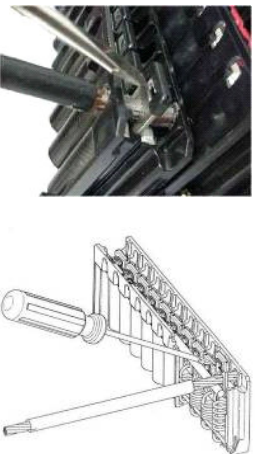
Notadamente existe uma linha de evolução tecnológica e cronológica dentre essas tabelas, iniciando-se pelas conexões mais primitivas e simples, como a “charrua” e a própria solda, passando pelas conexões parafusadas e compressão tradicionais. A Tabela 5 mostra os conectores tipo cunha, que possuem características especiais em seu projeto, como a conformidade elástica e abrasão dos cabos na instalação para retirada de óxidos – esse segundo tópico é fundamental quando há necessidade de conexão de cabos de alumínio.

Tabela 5

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
<p>Conector Cunha em liga de Alumínio</p> 	<p>Distribuição mecânica uniforme “Ação de mola” (conformidade elástica) que compensa os mecanismos térmicos de degradação do contato Interfaces elétricas formadas pela abrasão dos cabos na instalação retira os óxidos Permite inspeção visual de instalação correta</p>	<p>Necessita ferramenta especial Mais adequada para cabos de alumínio Conexões bi metálicas em locais com agressividade média</p>
<p>Conector cunha em liga de Cobre</p> 		<p>Mais adequada para cabos de cobre ou para Conexões bi metálicas em locais com agressividade média (cabo de cobre SEMPRE na derivação, abaixo do cabo alumínio)</p>

A Tabela 6 mostra as borneiras de distribuição de efeito mola, também bastante utilizadas nos sistemas atuais de distribuição de energia, os quais, apesar de possuírem barramentos de cobre estanhado, quando utilizadas com cabos de alumínio necessitam dos cuidados especiais para sua preparação, a fim de ser removida a camada de óxido por abrasão e utilização de composto inibidor.

Tabela 6

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
<p>Borneiras de Distribuição de Energia com Efeito Mola</p> 	<p>Vantagens similares aos conectores cunha, devido a conformidade elástica Não necessita de ferramentas especiais Proporciona uma instalação compacta e confiável</p>	<p>Utilizada normalmente dentro de caixas de distribuição de energia, afim de fornecer proteção externa mecânica e ambiental Conexões bi metálicas dependem adicionalmente da configuração e preparação dos cabos utilizados</p>

III. Conexões Bi-Metálicas

Devido às características construtivas das linhas de distribuição de energia e de seus equipamentos, sejam concentradores e distribuidores de conexão ou mesmo medidores de energia elétrica e suas respectivas instalações residenciais, conexões bi-metálicas freqüentemente estão presentes.

. Preocupações com as conexões bi-metálicas

- O contato entre o cobre e o alumínio, na maioria das situações, provoca um processo de corrosão no alumínio;
- Conectores desenvolvidos para cabos de cobre não têm boa performance quando usados em alumínio e vice-versa;
- Os principais problemas a serem solucionados são:
 - a. Garantir um bom contato elétrico no cabo de alumínio, levando-se em conta que sua superfície se oxida facilmente, gerando uma camada isolante;
 - b. Minimizar a entrada de agentes oxidantes, que iniciam o processo de corrosão e
 - c. Evitar o contato direto com cabos ou barramentos de cobre, para que não se inicie a corrosão galvânica.

. Um exemplo clássico de problema seria o uso de uma luva de emenda à compressão:

- Se fosse feita em cobre, serviria apenas para cabos de cobre;
- Se fosse feita em cobre estanhado, serviria para cabos de cobre e para cabos de alumínio em determinadas condições com pouca agressividade ambiental e nas quais o oxigênio pudesse ser removido, desde que guardadas as relações de dureza entre os materiais envolvidos.
- Se fosse dado algum acabamento superficial diferente, por exemplo, de diversas camadas, poderia ser melhorada a resistência à corrosão, entretanto a estabilidade da conexão não poderia ainda assim ser garantida em regiões com agressividade ambiental média ou severa;
- Similarmente o mesmo aconteceria se fosse feita de alumínio.

Na tentativa de se conectar cabos de alumínio com terminais comuns de cobre estanhado, encontrados facilmente no mercado, foram feitos testes de ciclos térmicos, buscando verificar a estabilidade da conexão elétrica obtida, quando conectados com barramentos também de cobre estanhado.

O Gráfico 2 abaixo ilustra o resultado de um desses testes, onde as temperaturas das conexões ficaram acima dos limites permitidos (temperatura da conexão superior à temperatura do próprio cabo), indicando que o processo de oxidação do alumínio não pôde ser evitado, comprovando a teoria acima, ou seja, demonstrando que os terminais simples disponíveis no mercado feitos em cobre estanhado ou alumínio não devem ser utilizados em cabos de alumínio, a menos que se tenha muita precaução com a limitação de acesso ao oxigênio na conexão, a fim de evitar o processo de oxidação.

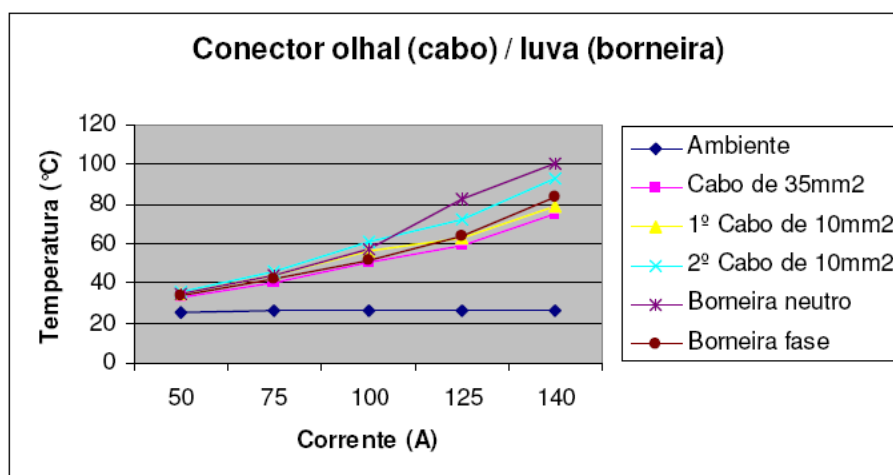


Gráfico 2

- **Como então conectar um cabo de alumínio a um barramento de cobre?**

Existem no mercado algumas soluções disponíveis, as quais são apresentadas abaixo:

- Tecnologia de solda por fricção entre alumínio e cobre, que possibilita a manufatura de um conector tipo pino bi-metálico ou terminal parafusado bi-metálico;

A Figura 2 mostra alguns exemplos de terminais com esta tecnologia³.



Figura 2

O processo de compressão é feito por endentação profunda o que garante o perfeito contato elétrico do cabo de alumínio com o corpo de alumínio do conector. O contato da parte de cobre pode ser feito normalmente no barramento de cobre.

O processo de solda por fricção elimina os problemas de corrosão por contato entre alumínio e cobre;

Esses conectores são usados frequentemente na Europa para terminações em média tensão e para a ligação de barramentos de equipamentos em cobre, através de cabos de alumínio. Para aplicações externas, ainda é necessário limitar a entrada de oxidantes (umidade, contaminantes, oxigênio, etc.). As desvantagens são: a necessidade de uso de ferramentas de crimpagem pesadas, normalmente hidráulicas, além do custo elevado para nossa realidade, que consiste, muitas vezes, de consumidores de baixa renda.

b. Tecnologia COPALUM⁴

Seu *design* é baseado em um tubo de cobre estanhado com um inserto de latão também estanhado que possui micro-furos. Uma compressão, normalmente em formato de barra, garante que os condutores de alumínio, ao serem forçados por esses micro-furos a se extrudarem, tenham todo o óxido superficial removido e o número de contatos reais aumentado consideravelmente. A Figura 3 ilustra alguns terminais com essa tecnologia bem como um corte longitudinal em um terminal mostrando o detalhe dos fios de alumínio que foram extrudados por entre os furos do inserto metálico.

A conexão resultante é selada, evitando-se a reformação de óxido, sem a necessidade de graxas ou selantes adicionais e garantido a estabilidade da conexão elétrica.

Como o corpo externo é de cobre, ele permite conexões com barramentos de cobre e suas ligas.

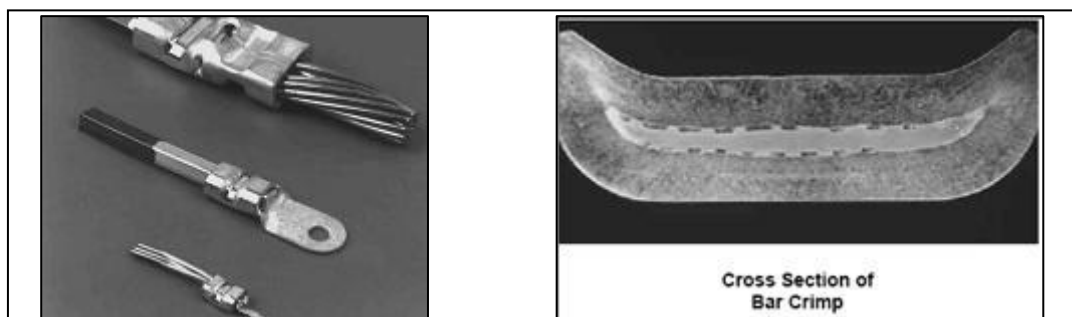


Figura 3

Baseado nessa tecnologia, foi desenvolvido um terminal específico para a aplicação de cabos de 10 a 16 mm² de alumínio, principalmente do tipo coaxiais / anti-furto, a fim de serem solucionados todos os problemas mencionados e de diminuir também a quebra dos fios da malha de neutro, que ocorre facilmente no manuseio deste tipo de cabo. Esta solução portanto, é aplicável tanto para cabos de alumínio quanto para cabos de cobre.

A Figura 4 mostra diversas imagens do terminal antes e após a aplicação com ferramenta de compressão manual, bem como o detalhe dos testes de ciclo térmico que foram realizados em conexões bi-metálicas.

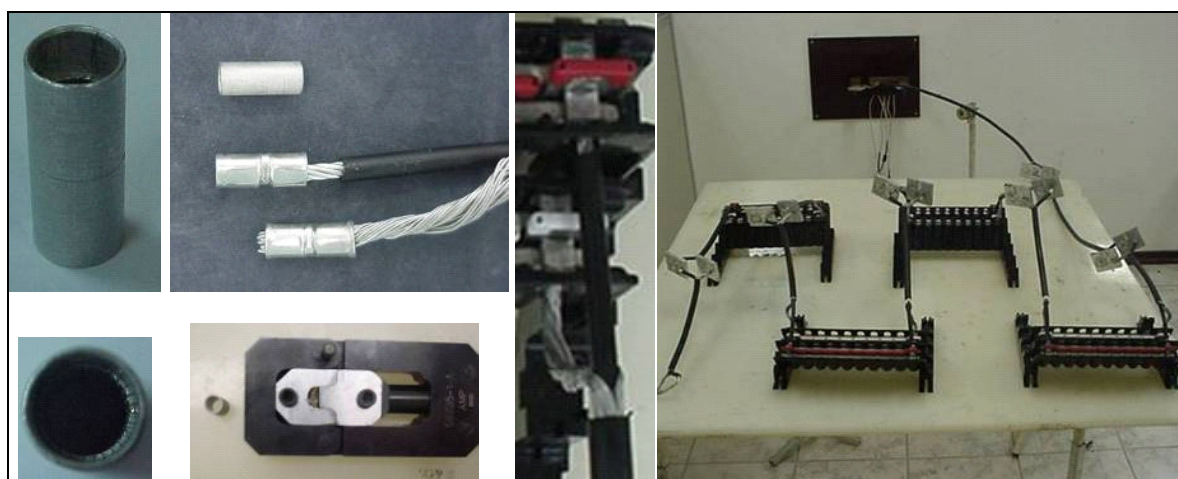


Figura 4

Os requisitos de aprovação conforme norma ANSI C 119.4 (500 ciclos térmicos) foram atendidos, comprovando-se a estabilidade da conexão elétrica ao longo do tempo e as temperaturas se mantiveram dentro dos limites estabelecidos⁵. O Gráfico 3 mostra as leituras das resistências elétricas das oito conexões, dentro do limite de variação permitido.

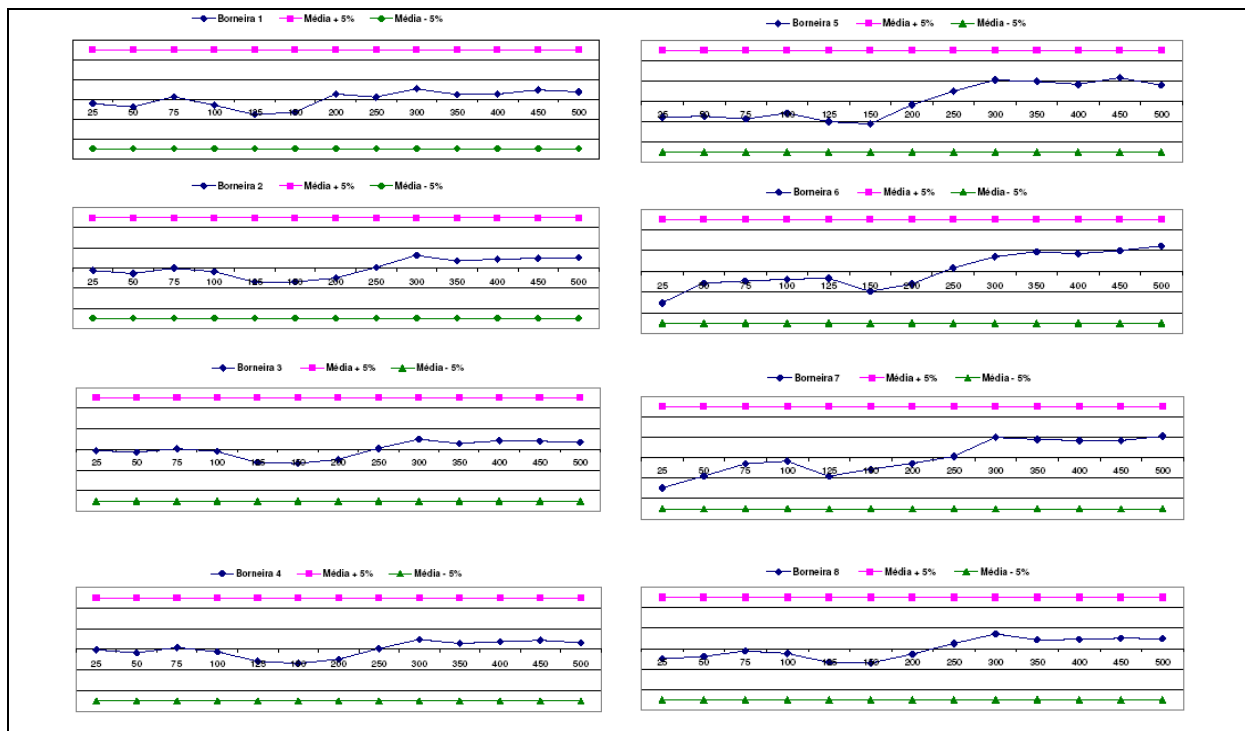


Gráfico 3

Após o término desse ensaio de ciclo térmico, as amostras ainda foram submetidas a um ensaio de *salt spray*⁶, com duração de 15 dias, conforme norma NBR 5370, no qual se avaliou a variação da resistência elétrica das conexões, através da queda de tensão mensurável, antes e depois desse ensaio de corrosão acelerada. A Figura 5 mostra algumas imagens das amostras ensaiadas, as quais foram consideradas aprovadas, uma vez que a variação da queda de tensão após o ensaio se manteve dentro do máximo estipulado de 10%.

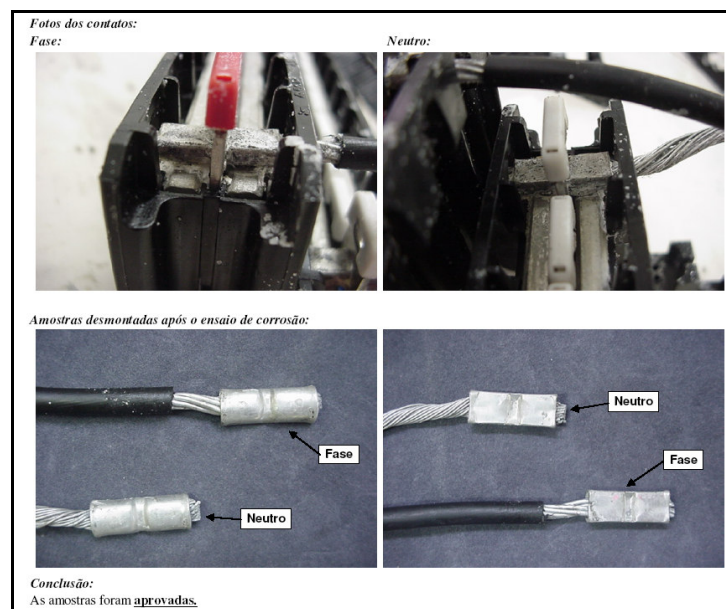


Figura 5

Testes de campo realizados com protótipos deste terminal também apresentaram resultados satisfatórios, quanto ao manuseio da ferramenta de aplicação, preparação dos cabos e instalação nos seus respectivos bornes no barramento de distribuição de energia, bem como do lado do medidor de energia do cliente da concessionária.

Visando ainda a maior disponibilidade e facilidade de aplicação do produto em campo, foram realizados testes adicionais com uma ferramenta de aplicação alternativa, também de endentação profunda, conforme imagens da Figura 6.

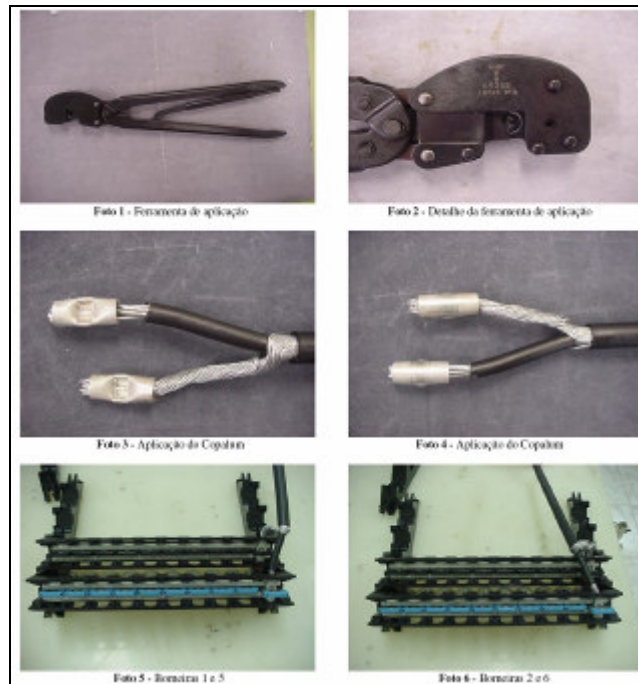


Figura 6

Novamente, os requisitos de aprovação, conforme norma ANSI C 119.4 (500 ciclos térmicos), foram atendidos, comprovando-se a estabilidade da conexão elétrica ao longo do tempo e as temperaturas se mantiveram dentro dos limites estabelecidos⁷. O Gráfico 4 mostra as leituras das resistências elétricas das oito conexões, dentro do limite de variação permitido.

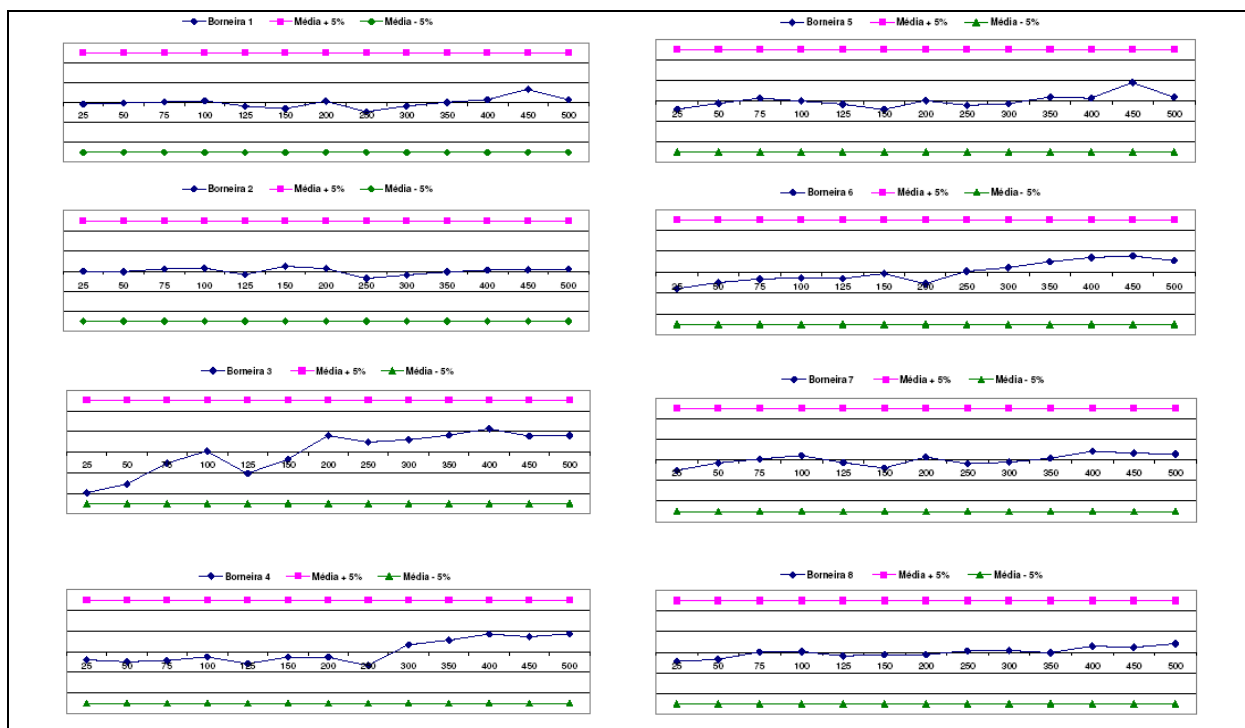


Gráfico 4

3. Conclusões

Seguindo a tendência mundial de aumento da utilização de cabos de alumínio em aplicações hoje ainda feitas apenas com cabos de cobre, fez-se necessário avaliarmos as implicações deste fenômeno quanto às conexões bi-metálicas destes novos cabos com barramentos tradicionais de equipamentos, distribuidores de energia e medidores de energia, tradicionalmente feitos em ligas de cobre.

Dentre as diversas tecnologias de conexão elétrica disponíveis, notou-se que havia uma lacuna entre as necessidades locais, principalmente no aspecto custo-benefício, levando-se em conta os padrões de qualidade e confiabilidade aceitáveis e esse trabalho demonstrou que já existe hoje disponibilidade de uma tecnologia de eficácia comprovada em outros países, mas que ainda não havia sido difundida no Brasil.

Além do mais, baseado nessa tecnologia, foi desenvolvido um terminal específico, que através de testes de laboratório e provas de campo, mostrou-se capaz de fazer frente aos árduos requisitos técnicos necessários para uma aplicação desse tipo.

4. Referências bibliográficas e/ou bibliografia

1. SYSTEP Ingeniería y Diseños / ENDESA Internacional, Manual de Prácticas de Distribución, Abril 2007
2. LA SALVIA, José A., Technological Components for an Anti-theft System Overhead Network, IEEE/PES T&D Conference, 2005/2006, Dallas USA
3. Bimetallic Pin XLX Type. Catálogo Tyco Electronics Simel SAS, Ref Sim 055-03/2002, França
4. COPALUM Terminal and Splices, Catálogo Tyco Electronics 82020 – Revised 11/02. EUA
5. ROJAS, D. Biazetto, Relatório de Testes 071339, Tyco Electronics Brasil, Agosto/2007
6. ROJAS, D. Biazetto, Relatório de Testes 071342, Tyco Electronics Brasil, Setembro/2007
7. ROJAS, D. Biazetto, Relatório de Testes 071946, Tyco Electronics Brasil, Janeiro/2008
8. LA SALVIA, José A. & FUZETTI, V, Copper to Aluminun Bimetallic Termination, USPTO Patent Application, Attorney Document No. E-EN-00071 (09720-0194), USA, June/2007