

ANÁLISE DE FALHA EM CABO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (ACSR)¹

Maurício Barreto Lisboa²
Bruno Reis Cardoso³
Fernanda Figueiredo³
Gláucio Rigueira³
Heloísa Cunha Furtado³
Wendell Porto de Oliveira⁴

Resumo

Em cabos ACSR 26/7, a malha de fios de alumínio, é responsável por aproximadamente 43% da resistência mecânica. Pela análise de falha, realizada num cabo ACSR de uma linha de transmissão de 138 kV, rompido junto a uma emenda, verificou-se que houve uma perda de até 65% da resistência mecânica nos fios de alumínio, levando à sobrecarga dos fios de aço. A perda foi provocada pelo arranjo deficiente entre a luva de alumínio e o cabo ACSR, que permitiu a entrada de umidade no seu interior, ocasionando a oxidação da luva conectora interna de aço. Esta oxidação, provavelmente potencializou a elevação da resistência elétrica pela adesão de Fe_2O_3 à parede da luva de alumínio e a conseqüente elevação da temperatura de operação. A submissão da liga de alumínio AA1350 H19, empregada nos fios do cabo, à temperaturas superiores a 100°C, acarreta a redução da resistência mecânica. Por esta razão, a temperatura de operação de cabos ACSR é limitada a 90°C.

Palavras-chave: Análise de falha; ACSR.

FAILURE ANALYSIS OF ELECTRICAL ENERGY TRANSMISSION CABLE (ACSR)

Abstract

The failure of an ACSR conductor in a 138 kV overhead transmission line was investigated in the present paper. In this cable, about 43% of strength is concerned by aluminium strands. The failure analysis showed loss of 65% strength in aluminium strands, resulting in steel strands overload. This loss was a consequence of an inefficient arrangement between aluminium's glove and ACSR's cable, allowing the entrance of humidity. This humidity caused the oxidation and, maybe, the improvement of the electrical resistance due to Fe_2O_3 adhesion in aluminium's glove wall, and the operation's temperature. When AA1350 H19 aluminium alloy was submitted to high temperatures (more than 100°C), the loss of strength is verified. Therefore the operation temperature of ACSR's cables is limited to 90°C.

Key words: Failure analysis; ACSR.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Pesquisador, MSc. – CEPEL, Departamento de Tecnologias Especiais, mbl@cepel.br

³ Pesquisador, BSc. – CEPEL, Departamento de Tecnologias Especiais

⁴ Engenheiro, MSc. – Furnas Centrais Elétricas S.A.

INTRODUÇÃO

Linhas de transmissão de energia elétrica aéreas possuem pontos fracos em suas junções, que, necessitam de vigilância constante, por parte das equipes de manutenção das empresas de energia elétrica.

Dentre os diversos tipos de cabos empregados em linhas de transmissão de energia elétrica, os do tipo ACSR (*steel reinforced aluminum cable*) são os mais comuns. Eles consistem em um arranjo composto por fios de alumínio reforçados por um núcleo de fios de aço que suportam a maior parte da resistência mecânica do cabo.

Os fios de alumínio são responsáveis por aproximadamente 43% da resistência mecânica total^[1] e estão sujeitos à falhas provenientes de mecanismos de corrosão, fadiga, *fretting*, sobrecarga mecânica, raios e aumento da resistência elétrica de contato nas junções acelerando o processo de fluência do cabo.^[2,3]

O aumento de resistência elétrica conduz à elevação de temperatura do cabo, podendo acarretar a redução da resistência mecânica dos fios de alumínio. Esta redução promove a aceleração da fluência^[3] e a ocorrência do efeito denominado *bird-caging*, que é a expansão dos fios de alumínio para fora do cabo, levando os fios de aço a serem os únicos responsáveis pela sustentação do cabo.^[4,5]

A queda de um cabo ACSR de uma linha de transmissão de 138 kV motivou este estudo. O cabo encontrava-se em operação há dez anos e apresentava a configuração 26/7, referente a 26 fios de alumínio da liga AA 1350 na condição de tratamento térmico H19 e 7 fios de aço carbono AISI 1060.

A falha foi observada junto a uma das extremidades de uma luva de conexão de alumínio. A luva de conexão é prensada hidráulicamente sobre as extremidades do cabo contendo uma graxa inibidora de corrosão.

OBJETIVOS

Este trabalho teve por objetivo a determinação das causas da falha ocorrida em um cabo ACSR, junto a uma luva de conexão de alumínio.

Para atingir o proposto foram utilizadas técnicas de análise pericial englobando ensaios mecânicos: microdureza Vickers e tração, ensaios metalúrgicos: microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-X e análise química: quantitativa e semi-quantitativa por dispersão de energia de raios-X (EDS).

DESENVOLVIMENTO

A ruptura do cabo ocorreu em uma das extremidades da luva de conexão, conforme pode ser observado na Figura 1.

As primeiras observações efetuadas sobre os fios de alumínio e de aço, e o seu posterior seccionamento longitudinal, permitiram a identificação de escoamento mecânico dos fios de alumínio e a ausência de sinais macroscópicos de fadiga ou corrosão localizada, Figura 2.

O corte longitudinal da luva de emenda revelou que não existia qualquer sinal de graxa inibidora de corrosão, na luva ou no cabo. A luva interna de aço estava corroída e a superfície de contato da luva e os fios de alumínio na região de ruptura encontravam-se impregnados com uma substância de coloração laranja. Entre os fios de aço e os fios de alumínio foram observados resíduos de coloração branca, Figura 3.

Observou-se, pelas marcas na superfície alaranjada, da luva de alumínio do cabo falhado, que o posicionamento do cabo no seu interior indicava um arranjo paralelo dos fios de alumínio, denotando erro na montagem. A Figura 3a permite esta identificação, numa comparação com uma seção de uma luva nova, onde se verificou que estas marcas eram helicoidais.

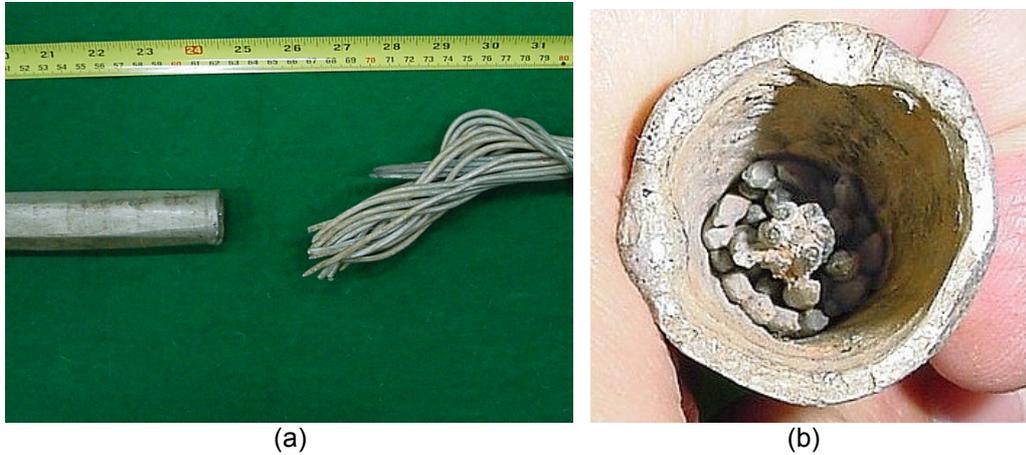


Figura 1 – (a) Vista geral da extremidade rompida; (b) detalhe da região falhada no interior da luva de alumínio.

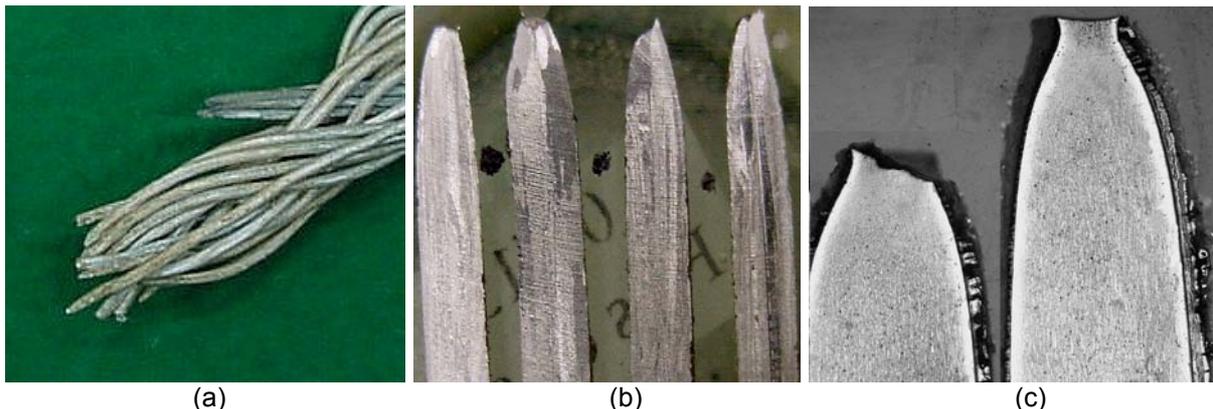


Figura 2 – Detalhes da extremidade dos fios rompidos. (a) vista geral; (b) fios de alumínio; (c) fios de aço



Figura 3 – Seccionamento das luvas de conexão. (a) Detalhe da comparação entre regiões internas da luva de alumínio nova (vestígios de graxa) e da luva de alumínio utilizada no cabo falhado (coloração laranja); (b) luva interna de aço – presença de corrosão e resíduos de coloração branca (seta).

Efetuiu-se uma análise por dispersão de energia de raios X - EDS nos fios de alumínio, sendo detectada, além do alumínio, apenas o elemento silício em teores inferiores a 1 %.

A análise por difração de raios X dos resíduos alaranjados da luva de alumínio revelou a presença de Fe_2O_3 , enquanto os resíduos de coloração branca continham basicamente $Al(OH)_3$.

Pode-se observar, na Tabela 1, os resultados da análise química, processada sobre os fios de aço dos cabos novo e falhado, que permitiu enquadrá-los na liga AISI 1060.

Tabela 1– Análise química quantitativa dos fios de aço

Amostra	C(%)	S(%)	Mn(%)	Si(%)	P(%)
Fio de aço - Novo	0,62	0,02	0,45	0,21	0,02
Fio de aço - Rompido	0,64	0,02	0,89	0,26	0,02
AISI 1060*	0,55-0,65	0,05 máx.	0,60-0,90	0,08-0,6	0,04 máx.

*Fonte www.keytosteel.com

Os ensaios de tração foram conduzidos em seções de fios de alumínio, de 300 mm de comprimento, tendo por objetivo determinar a tensão limite de resistência mecânica (σ_r) dos fios do cabo rompido e do cabo novo.

Os ensaios não obedeceram à normalização específica, sendo ensaiadas: seis amostras, retiradas do cabo falhado, em áreas próximas à fratura, uma do cabo falhado, retirada do lado intacto da emenda, e seis fios de alumínio retirados do cabo novo.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos, assim como o valor de tensão limite de resistência mecânica estabelecido na norma NBR 5118 [ABNT/NBR 5118, “Fios de alumínio nus de seção circular para fins elétricos”].

Tabela 2– Tensões limite de resistência mecânica (σ_r)

Amostra	Limite de Resistência Mecânica (MPa)
Fio de Al /cabo rompido – lado falhado 1	76
Fio de Al /cabo rompido – lado falhado 2	76
Fio de Al /cabo rompido – lado falhado 3	82
Fio de Al /cabo rompido – lado falhado 4	101
Fio de Al /cabo rompido – lado falhado 5	57
Fio de Al /cabo rompido – lado falhado 6	81
Fio de Al/ cabo rompido – lado intacto 1	156
Fio de Al / cabo novo – 1	195
Fio de Al / cabo novo – 2	205
Fio de Al / cabo novo – 3	198
Fio de Al / cabo novo – 4	198
Fio de Al / cabo novo – 5	201
Fio de Al / cabo novo – 6	204
Fio de Al 1350/H19 (NBR 5118)	161 (95%)

Visando à comparação entre os valores de resistência mecânica entre os fios de aço, na região de ruptura do cabo falhado e do cabo novo, determinou-se a dureza do material a partir de amostras preparadas metalograficamente. Estas amostras foram então submetidas ao ensaio de microdureza Vickers empregando-se uma carga de 50g.

Os resultados de dureza dos fios de aço galvanizado do cabo objeto da análise (FR) e dos fios de aço galvanizado do cabo novo (FN) são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Ensaio de Microdureza Vickers – Fios de aço galvanizado

Amostra	FR ₁	FR ₂	FR ₃	FR ₄	FN ₁	FN ₂	FN ₃	FN ₄
\bar{X}	391±18	403±24	413±17	430±46	393±11	396±10	395±18	410±27

Os resultados obtidos pela avaliação metalográfica do cabo rompido (fios de aço e alumínio) apresentaram estrutura típica de material trefilado a frio, composta por grãos alongados e aspecto de encruamento, conforme pode ser verificado na Figura 4. Nesta Figura nota-se que apenas alguns grãos próximos à superfície de ruptura apresentaram crescimento.

A Figura 4 apresenta, ainda, o aspecto microestrutural das amostras de fios de alumínio e de aço galvanizado retirados do cabo novo. Nota-se a extrema semelhança com o observado no cabo rompido, ou seja, grãos alongados com textura de encruamento.

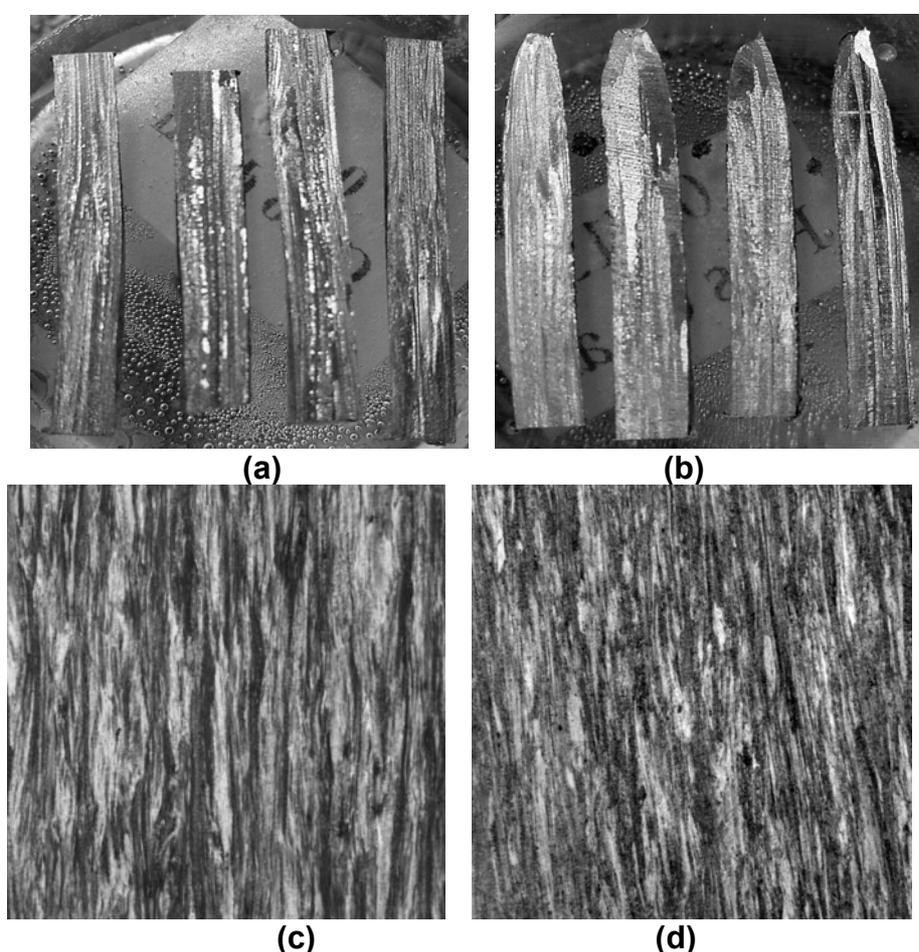


Figura 4 – Micrografias dos fios de alumínio e de aço dos cabos novo e rompido demonstrando elevado grau de encruamento. (a) fio de alumínio - cabo novo, ataque: Keller. (b) fio de alumínio - cabo rompido, ataque: Keller. (c) fio de aço – cabo novo, ampliação: 400x, ataque: Nital 2%. (d) fio de aço – cabo rompido, ampliação: 400x, ataque: Nital 2%.

Pela análise metalográfica das seções longitudinais dos fios de aço galvanizado, próximas à região de ruptura, pôde-se constatar a presença do revestimento de zinco ao longo da seção longitudinal das amostras examinadas. Entretanto, em algumas

regiões a presença de zinco era residual ou mesmo ausente, indicando a progressão do processo de corrosão do aço.

A análise fratógráfica foi conduzida inicialmente com o auxílio de um microscópio estéreo e posteriormente através da observação das superfícies de fratura no microscópio eletrônico de varredura (MEV).

A observação inicial permitiu a identificação da estrição nos fios de alumínio e de aço. Esta redução de área na seção transversal, normalmente se relaciona a um mecanismo dúctil de fratura.

A análise efetuada no MEV corroborou a informação referente á ductilidade, revelando a presença de microcavidades (*dimples*) sobre as superfícies de fratura dos fios de alumínio e de aço, Figura 5. Estas superfícies também foram analisadas por EDS, não sendo detectados sinais de qualquer elemento químico que propiciasse a deterioração da resistência mecânica.

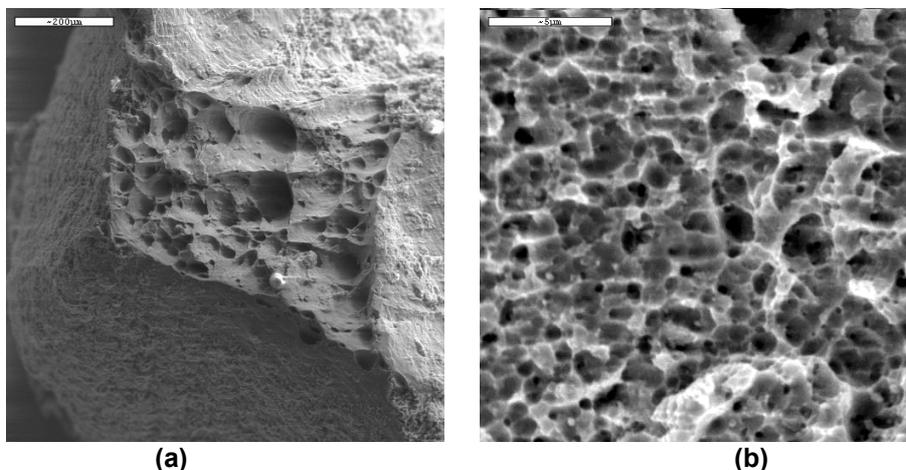


Figura 5 - Imagem de elétrons secundários (MEV - SE) da superfície de fratura dos fios rompidos de (a) alumínio, ampliação: 100x e (b) aço, ampliação: 5000x, presença de dimples (microcavidades) – fratura dúctil. Ampliação: 1000x.

DISCUSSÃO

São relatados na literatura diversos casos de falhas envolvendo juntas empregadas em linhas de transmissão de energia elétrica. Dentre estas, as causas mais comuns observadas referem-se à corrosão.

A corrosão pode ocorrer diretamente sobre os fios de aço e de alumínio, acarretando a redução da seção resistente e posterior ruptura, ou ainda, promover a oxidação dos contatos ocasionando um aumento da resistência elétrica, que poderia levar a redução da resistência mecânica dos fios de alumínio.

Não foram detectados sinais da graxa, inibidora de corrosão, no interior da luva. Esta ausência pode ser atribuída, basicamente, a dois motivos, igualmente críticos para a junta: a) esquecimento durante a montagem; b) vaporização pela operação da junta em altas temperaturas.

Os resultados dos ensaios executados neste estudo revelaram que havia umidade no interior da luva, provocando corrosão do conector interno de aço.

O aspecto da extremidade do cabo fraturado revelou um alongamento incomum característico da ocorrência de *bird-caging* que pode ser provocado por erros na montagem das juntas e também por altas temperaturas nas conexões de cabos ACSR. Nestes, o elevado coeficiente de expansão térmica do Al em comparação com o aço propicia, no caso da elevação da resistência / temperatura, o crescimento dos

fios de alumínio para fora do cabo, gerando um aspecto de gaiola, resultando na transferência de toda a sustentação mecânica do cabo para alma de aço.^[6]

A observação do interior da luva do cabo falhado revelou um erro na operação de conexão. Enquanto na luva nova seccionada, se observou a prensagem sobre um cabo que mantinha a característica helicoidal da conformação original, a luva do cabo falhado revelou uma trama de fios retos, que representava uma alteração no tensionamento da malha de alumínio e um problema para a conformação, com implicações para a resistência de contato.

O filme de Fe_2O_3 identificado sobre a superfície de contato luva / cabo, na região da falha, e sobre os fios de alumínio (resistentes à limpeza por ultra-som) provavelmente potencializou o aumento da resistência elétrica naquela região. A identificação de $Al(OH)_3$ sobre os fios de alumínio e de aço indicou o início do processo de corrosão galvânica que tenderia a corroer rapidamente o alumínio.^[6]

Os ensaios mecânicos executados sobre os fios de aço do cabo rompido não revelaram nenhuma perda de resistência mecânica. Já os ensaios de tração efetuados sobre os fios de alumínio revelaram uma perda acentuada da resistência mecânica nos fios rompidos. Esta perda de resistência mecânica tem relação direta com o aumento da resistência elétrica / temperatura, promovida pelo contato defeituoso entre os fios de alumínio e a superfície interna da luva.

Num cabo ACSR 26/7 os fios de alumínio são responsáveis por 43 % do total da carga de sustentação.^[1] Pelos ensaios executados verificou-se que houve uma perda de até 65 % da resistência mecânica nos fios de alumínio fraturados, o que promoveu uma sobrecarga mecânica sobre os fios de aço, levando à ruptura do cabo.

A temperatura normal de operação destes condutores ACSR situa-se entre 75°C a 90°C,^[7] uma faixa de operação totalmente segura quanto aos efeitos de recozimento da liga de alumínio AA 1350, na condição de tratamento térmico empregado – H19. Entretanto, um aumento considerável da resistência de contato, pode provocar a elevação desta temperatura para valores superiores a 100°C.

Estudos de Di Troia^[8] revelaram que a submissão de um condutor ACSR a ciclos de aquecimento e resfriamento, em temperaturas de 100°C e 175°C acarretou uma considerável perda de resistência mecânica, cumulativa, nos fios de alumínio. Enquanto os cabos submetidos a 250 ciclos de elevação e resfriamento a 100°C experimentaram uma redução de dureza de 33HR_H (dureza Rockwell – escala H) para 19 HR_H, os cabos submetidos a 250 ciclos a 175°C viram a sua dureza reduzir drasticamente de 37 HR_H para 2,8 HR_H.

Artigo de pesquisadores da Transpower New Zeland Ltd. (Cia. de energia elétrica da Nova Zelândia),^[9] relativo às juntas de conexão deficientes reafirmam o efeito nocivo das sobre correntes e/ou do aumento da resistência elétrica, levando à fluência dos fios de alumínio. Este artigo^[9] ressalta que os termovisores são deficientes na análise efetiva das elevações de resistência em juntas de conexão. O resfriamento provocado pelo vento, os efeitos do aquecimento solar sobre os condutores, correntes relativamente baixas etc., podem mascarar a inspeção, a qual somente se torna eficiente nos últimos estágios de vida do conector, onde um grande aumento da resistência permite a detecção da assinatura térmica.

A Transpower avaliou que o único método realmente confiável de determinação das condições de operação da junta seria a medição in loco da sua resistência elétrica, e desenvolveu um aparato técnico e logístico com esta finalidade, para aplicação em toda a rede de transmissão de energia elétrica.

CONCLUSÕES

Os fios de alumínio e de aço do cabo rompido não apresentaram variações de composição química na comparação com os fios do cabo novo.

Os fios de aço não apresentaram perda da resistência mecânica.

Não foram detectados sinais da graxa inibidora de corrosão no interior da luva.

O arranjo luva de conexão / cabos ACSR permitiu a entrada de umidade, identificada pela oxidação da luva interna de aço, e pela adesão de óxido de ferro na superfície interna da luva e nos fios de alumínio.

A ruptura do cabo ocorreu pela perda de resistência mecânica dos fios de alumínio, ocasionada pelo aumento da resistência elétrica, e conseqüente elevação da temperatura de operação. Esta perda de resistência mecânica dos fios de alumínio acarretou posteriormente a ruptura dos fios de aço levando ao colapso total do cabo.

Estudos recentes apontam falhas na avaliação das luvas de conexão por termovisores, indicando a medição da resistência elétrica das conexões como o meio mais confiável de inspeção.

REFERÊNCIAS

- 1 Douglas, D. and Edris, A., "Maximize use of existing route",
- 2 Disponível em: http://tdworld.com/mag/power_maximize_existing_route/index.html
- 3 Tower Manual, U.S. Department of Transportation, COMDTINST M11000.4A, January 2002.
- 4 IEEE Guide for Determining the Effects of High-Temperature Operation on Conductors, Connectors and Accessories, IEEE Power Engineering Society, March 2005.
- 5 Chen, S.L., Black, W. Z., Fancher, M. L., "High Temperature Sag Model for Overhead Conductors", IEEE Transactions on Power Delivery, V. 18, N° 1, January 2003.
- 6 Black, W.Z., Collins, S.S., Hall, J.F., "Theoretical Model for Temperature Gradients Within Bare Overhead Conductors", IEEE Transactions on Power Delivery, V. 3, N° 2, April 1988.
- 7 Rawlins, C. B., "Some Effects of Mill Practice on the Stress Strain Behavior of ACSR, IEEE Transactions on Power Delivery, V. 14, N° 2, April 1999.
- 8 Tamm, C. R., "Application Dynamics of High temperature Conductors In Full Tension Splices & Deadends".
- 9 Disponível em: http://www.hubbellpowersystems.com/powertest/whats_new/ACSSConnectorRes/ADHTC-SuspensionClamps.doc
- 10 Di Troia, G., "Effects of High Temperature Operation on Overhead Transmission Full-Tension Joints and Conductors".
- 11 Disponível em: http://www.ttieurope.com/microsites/fci/literature_main2_1.cfm
- 12 Marshall, W and Jacobs, T., "Live-Line Technique Identifies Defective Joints", Disponível em: http://tdworld.com/mag/power_liveline_technique_identifies/