



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GLT 05  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

### **GRUPO III**

#### **GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT**

#### **TESTE DE CAMPO EM CONDIÇÕES CRÍTICAS PARA CONDUTOR PARA LINHA DE TRANSMISSÃO SUPORTADO POR COPÓSITO SEM ALMA DE AÇO**

**Maria Claudia C.C. Dominguite**

**Luis Cláudio S. Oliveira (\*)**

**Herve Deve**

**3M DO BRASIL LTDA.**

**3M DO BRASIL LTDA**

**3M COMPANY - USA**

### **RESUMO**

O Condutor em Alumínio reforçado por Compósito (ACCR) que pode operar nas temperaturas de 210°C em regime contínuo e a 240°C em regime de emergência com flechas muito reduzidas e seus acessórios foram exaustivamente testados em laboratórios para documentar seu desempenho e comprovar suas superioridades mecânicas e elétricas. Entretanto não podíamos deixar de saber qual o comportamento do ACCR em campo, quando submetido às mais severas condições de frio, calor, exposição solar, oxidação, e máximo carregamento de trabalho. Claramente a dificuldade era encontrar uma linha de transmissão que contemplasse todas estas situações, assim sendo planejamos esta instalação simulando as condições mais severas possíveis. Condições estas que de um modo geral levaríamos anos para tê-las numa instalação convencional.

No condutor os testes de laboratórios compreenderam entre outros: tração, resistência elétrica, fadiga, escorregamento na temperatura de creep, creep a 250°C, coeficiente de expansão térmica, estabilidade química e ambiental, teste de roldanas, corrente de fuga, vibração eólica, galope, corrosão, impacto e descargas atmosféricas.

Os terminais e grampos de suspensão foram desenvolvidos e testados para operar em altas temperaturas. Estes acessórios também foram testados em tração, sustentação de carga numa temperatura de 240°, corrente cíclica, torção, galope vibração eólica, de carga desbalanceada entre outros.

Os testes de campo incluíram condutores com vários diâmetros: (1) reduzido, 477 ACCR (281 mm<sup>2</sup>); (2) médio 795 ACCR (467 mm<sup>2</sup>); (3) grande 1272 ACCR (726 mm<sup>2</sup>); e (4) trapezoidal compacto, 675 ACCR TW (381 mm<sup>2</sup>). Os diâmetros selecionados fornecem uma amostra real dos mais diversos condutores empregados em Linhas de Transmissão em diversas classes de tensão 69kV até 500kV.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Teste de Campo, Condutor sem alma de Aço, Condutor em Compósito, Condutor para Altas Temperaturas, 3M ACCR, CAT-1, Oak Ridge National Laboratory, ORNL, ACCR 795MCM.

### **1.0 - INTRODUÇÃO**

Teste para desempenho térmico foi realizado numa linha de baixa tensão com a corrente controlada e aplicando ciclos térmicos que compreendiam 32 ciclos que variam de 1 a 58 horas, temperatura de 210°C – 240°C, 1200 a 1800A e ainda exposição de 300 horas em alta temperatura em condições variadas de vento calmo, sol forte, chuva e até de neve.

(\*) Rua Nelson Luis Gonçalves, 178 – Veccon – CEP 08275-150 – SUMARÉ, SP  
tel. (19) 3838-7081 e-mail: lsoliveira@mmm.com

Nesta linha pudemos em três meses simular quarenta anos de trabalho do condutor em uma variedade de situações de emergência.

O Sistema CAT-1 foi instalado para monitorar os condutores, os terminais e as condições meteorológicas (temperatura, velocidade e direção do vento) enviando os dados remotamente em intervalos de 1 minuto.

Com um acordo financiado DOE sob o N°. DE-FC02-02CH11111, ORNL - Oak Ridge National Laboratory, conjuntamente com a TVA - Tennessee Valley Authority, Instalamos o condutor ACCR 795MCM no ORNL, para teste de alta temperatura em 14 de Junho de 2005. A linha tem uma extensão de 365 metros de comprimento, e vão básico de 183 metros. ORNL sujeitou a linha a extensivos ciclos térmicos e altas temperaturas usando cargas de 400 VDC e correntes de 800 a 2300A. O condutor sofreu ciclos térmicos acima das condições ambientais (240° C) por aproximadamente 1.000 horas entre 13 Setembro e 30 de Novembro de 2005 e acima de 600 horas de operação continuamente acima de 200°C sob condições de cargas de vento e temperatura ambiente.

## 2- ORIGEM:

O ORNL construiu uma instrumentação completa para testar em baixa voltagem as altas temperaturas de operação do Condutor ACCR para simular numerosos ciclos de emergência onde a temperatura de operação alcançou valores acima de 210°C numa faixa de clima e condições de temperatura ambiente.

Os instrumentos de testes do ORNL incluem o sistema CAT-1 para medir a tração do condutor, temperatura ambiente, temperatura solar e clima. Múltiplos acoplamentos térmicos foram montados em diversos locais sobre o condutor e acessórios.

Este relatório sumariza a instalação do condutor ACCR 795, ciclos térmicos e dados para análise.



Figura 1- ORNL Vista da linha e do condutor ACCR 795

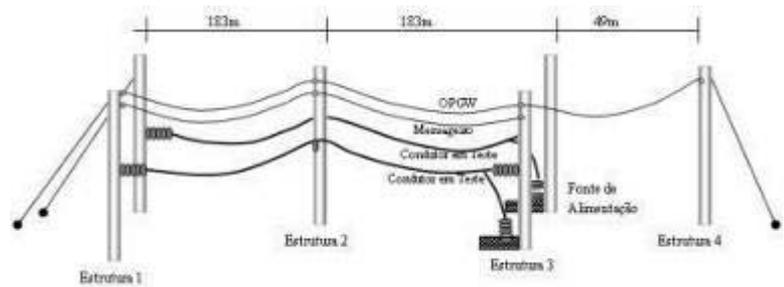


Figura 2 – Esquema da Linha Montada no ORNL

## 3- INSTALAÇÃO E GRAMPEAMENTO DO CONDUTOR:

### 3.1 Visão Geral:

Foi feita uma linha com dois vãos de teste (de ancoragem a ancoragem) construída na parte externa do Oak Reage National Laboratory no Oak Reage, TN, como parte do programa do Departamento de Energia, Figura 1. Um espesso condutor ACCR foi instalado e testado desde então. ACCR 795 foi o último a ser instalado.

### 3-2 Detalhes da Instalação:

O teste de linha (Figura 1) consiste de 4 segmentos 183 metros entre um poste de suspensão em aço e dois postes de ancoragem estaiados. A forma de teste do condutor foi constituída de um tramo com dois vãos conectados a uma fonte DC alimentada por uma estação montada sobre um trailer debaixo dos postes de ancoragem. Acoplamentos térmicos foram instalados ao longo do condutor, nas estruturas de ancoragem, suspensão e emendas para medir a temperatura dos componentes durante e depois dos períodos de operação em altas temperaturas.

O condutor foi para o local da instalação bobinado em carretel de madeira que tem cerca de 2,13m x 91m x 1,10m. A instalação seguiu o guia de instalação de linhas de transmissão de altas temperaturas IEEE 524. Todas as bandolas das torres de ancoragem foram aterradas.

Um cuidado particular foi tomado com a operação de lançamento. Uma combinação de ângulo e tração incorreta poderia causar danos ao condutor provocado pelo excesso de tração da alma. Através da seleção correta das

bandolas e Bull Wheel do freio garantimos que a alma do condutor não sofresse cargas de flexão demasiadas. Estabelecemos como critério para o diâmetro da bandola 71 cm, Bull Wheel de 137 cm.

O procedimento de flechamento do condutor ACCR é similar ao procedimento utilizado para flechar o condutor ACCR, um dinamômetro foi usado para verificar a tração final do condutor.

As fotografias seguintes mostram alguns exemplos da instalação dos acessórios.



Figura 3: Alça preformada da PLP e Bandolas de 70 cm na estrutura.



Figura 4: Exemplo de estrutura de suspensão



Figura 5: Acoplamento Térmico, monitorando a temperatura

### 3.3- Instrumentação CAT-1:

Um sistema Valley o CAT-1 foi instalado sobre uma das estruturas ancoragem para monitorar a tração do condutor e das condições climáticas (a temperatura, velocidade do vento, direção do vento). Duas células de cargas de 10.000 pulsos foram usadas para saber a tração da linha. O sistema CAT-1 foi equipado com anemômetro para medir a velocidade e a direção do vento. A aquisição de dados foram tomadas a cada um minuto em todos os canais.

O CAT-1 tem incorporado um uma fonte solar NEMA, a aquisição de dados e unidade de processamento pode ser vista nas Figura 6, 7 e 8. A temperatura irradiada pela rede, foi medida pelo sensor de radiação, (NRS).



Figura 6: Célula de Carga do CAT 1



Figura 7: Sensor de Radiação do CAT 1



Figura 8: Fonte solar do CAT 1

### 3.4 Medição da Temperatura do Condutor e dos Acessórios:

Um sistema separado de aquisição de dados foi usado para coletar as informações a todo minuto dos acoplamentos térmicos, exemplo na figura 5. Os Acoplamentos térmicos foram instalados em vários locais ao longo dos vãos nos condutores e nos acessórios. Então a temperatura do condutor e da alma foram medidas constantemente.

### 3.5 Controles:

A linha foi operada sob uma corrente constante e ou temperatura do condutor constante com ciclos térmicos que duraram cada um de uma hora a vários dias.

Múltiplos pontos ao longo da extensão do condutor foram monitorados usando os acopladores térmicos instalados. Para acomodar os múltiplos pontos de descida do condutor foram usadas muitas fibras de comunicação. Um acoplamento térmico mede um nó usando um multiplexador fabricado com o (ICPCON I-7018) e um RS-485 par um modem de fibra (B&B FOSTCDR). Até oito acoplamentos térmicos foram monitorados por um único nó. O nó

requeriu uma potência de 120VAC e foi conectado através de dois níveis da rede de fibra óptica: O multiplexador e o modem de fibra Óptica. A potencia fornecida teve uma dual de 400 VDC e 500A ou 600VDC e 3750A. A entrada de voltagem para a fonte de alimentação foi de 4.160V, 3Ø. Um transformador seco da ABB foi usado para rebaixar o nível de tensão (13,8 KV) da rede de distribuição local.

### 3.6 Acessórios:

Dois tipos de acessórios foram instalados; - À compressão: feitos pela Alcoa (agora conhecido como American Fujikura Limited, AFL) e - Os do tipo Pré-formados feitos pela PLP (Preformed Line Products). A seguir mostramos as peças que foram instaladas e suas específicas referenciam:

- . Dois grampos de ancoragem a compressão da ALCOA, Ref. n° B9178-B;
- . Uma emenda completa da ALCOA, Ref. n° B9095-B;
- . Quatro conector terminal de jumper, Ref. n° 9102-B;
- . Duas sapatas de adaptação, Ref. n° ACP-E;
- . Dois Grampos de Ancoragem THERMOLIGN<sup>MR</sup> PLP, Ref. n° TLDE-0114 (incluso o esticador e garfo)
- . Emenda THERMOLIGN<sup>MR</sup> PLP, Ref. n° TLSP-0114
- . Duas concha-olhal para suspensão THERMOLIGN<sup>MR</sup> PLP, Ref. n° TLS- 0108-SE

## 4- EXPOSIÇÃO A CICLOS TÉRMICOS E ALTAS TEMPERATURAS

### 4.1 Detalhes dos Ciclos Térmicos:

O início do ciclo térmico no condutor 795 começou em setembro de 2005, da temperatura ambiente até 200°C, algumas vezes acima de 240°C, sob uma gama de condições climáticas e de condições de carregamento. A superfície do condutor foi medida em toda a sua extensão enquanto que a alma foi medida em dois pontos no meio do vão; ver exemplo de um simples ciclo térmico na figura 9. A temperatura do condutor caiu mais de 40°C durante os dias de chuva. A figura 10 mostra a localização dos acoplamento térmicos usados para medir a temperatura dos condutores, alma e acessórios. Havia dois Acoplamentos térmicos em cada acessório: Um para medir a temperatura interna nos acessórios prensados da AFL e nos acessórios pré-formados da PLP. E o segundo acoplamento térmico fazia a medição na superfície externa de cada um dos acessórios. A tabela 3 mostra um sumário dos ciclos térmicos, partindo das condições ambientais até 240°C.

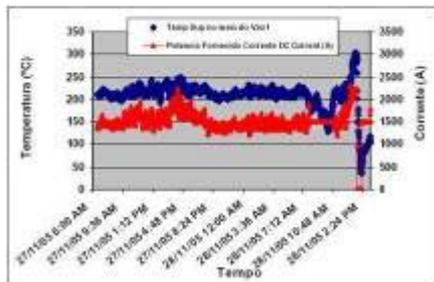


Figura 9: Mostra um simples ciclo a 200°C seguido de um curto ciclo a 300°C. Superfície dos condutores ainda com gotas d'água da chuva em 28/11/2005.

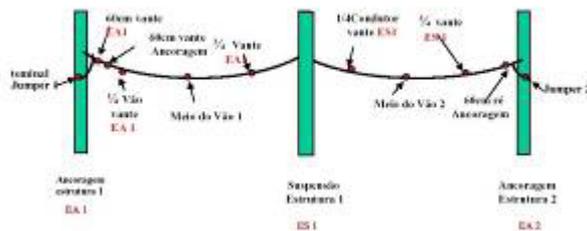


Figura 10 - Esquema dos Acoplamentos Térmicos localizados ao longo do vão da linha em teste, partindo de uma torre de Ancoragem EA1, estrutura de Suspensão ES1 e Ancoragem EA2.

O condutor teve ciclo de temperatura que foi da ambiente até temperaturas acima de 200°C, usando corrente ou temperatura constante. Dessa forma chegou se com curtos intervalos de tempo a 300°C em 28/11/2005.

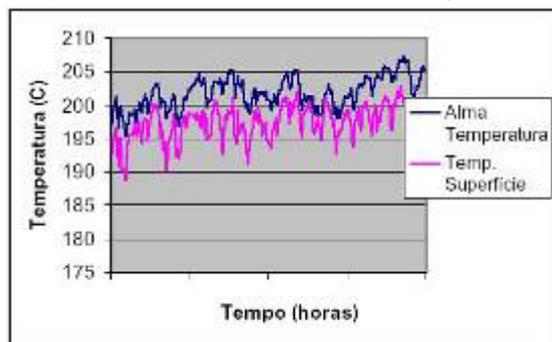


Figura 11: Mostra a temperatura na superfície e na alma do condutor.

Em Novembro de 2005 os dados foram reduzidos para incluir somente velocidade de vento de 0 m/s e a alma acima de 150°C e então plotada a figura 12. Os dados sugestionam haver uma grande temperatura gradiente ocorrendo entre a alma e a superfície do condutor.

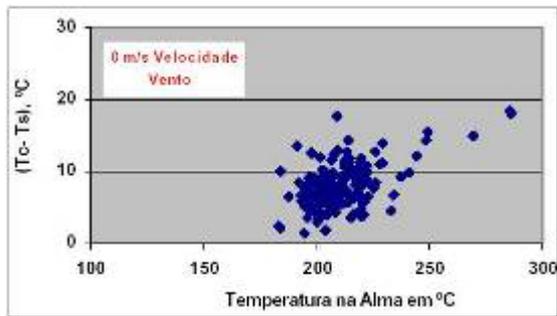


Figura12: Diferença de temperatura entre a alma e a superfície do condutor

#### 4.2 Ciclo de Mais Alta Temperatura:

Foi conduzido por último um ciclo de alta temperatura de 300°C por 40 minutos mostrados na figura 13. Não foi feito um ciclo térmico com uma temperatura superior a 300°C porque a conexão do condutor com alguns acoplamentos térmicos não resistiram.



Figura 13: Ciclo de Alta Temperatura, diferença de temperatura entre a alma e a superfície do cabo foi de 15 a 20°C quando a temperatura aproximou dos 300°C.

#### 5 - MEDIÇÃO E PREVISÃO DA FLECHAS E TRAÇÕES:

O software de computador comumente usado para calcular flechas e trações é o SAG 10 desenvolvido pela AFL. Mas também isto pode ser feito pelo método gráfico usando as propriedades mecânicas dos materiais medidas em laboratório (módulo de elasticidade, alongamento e creep). Assumindo a forma de catenária para flechar um condutor levando em consideração as condições ambientais (Carga de vento e acumulo de neve sobre os condutores). Um segundo método é usar um relatório chamado de STESS, este modelo foi desenvolvido pela Barrett and Associates, este método é muito similar ao SAG 10, permitindo variações nos detalhes quando comparado o creep pelo tempo. Este usa os valores de stress na compressão que vão de 0 a -2,4 Ksi para ajustar os dados.

O sistema de medição de tração CAT-1 por outro lado analisa a como uma função da temperatura do condutor. Os resultados são mostrados nas Figuras 14 a 17. O modelo de STESS mostra uma boa concordância tanto para as altas como para as baixas temperaturas, no domínio do tempo quando usando -2,5 de compressão de stress residual. Na faixa de temperatura ajustada de 60 até 120°C isto não é bom e talvez o processo de variação no stress residual dos vários tentos de alumínio da coroa. Em geral o modelo se adequou melhor para as altas temperaturas, Figuras 16 e 17.

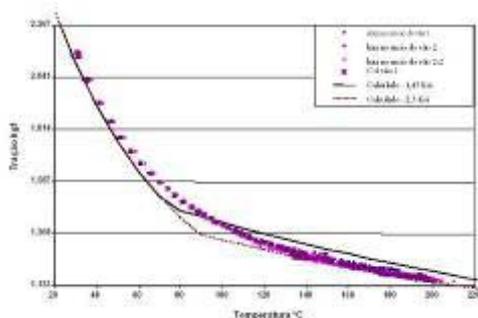


Figura 14: Forma de curva da tensão pela temperatura, 14 Setembro de 2005. O modelo concorda com os dados medidos em alta temperatura.

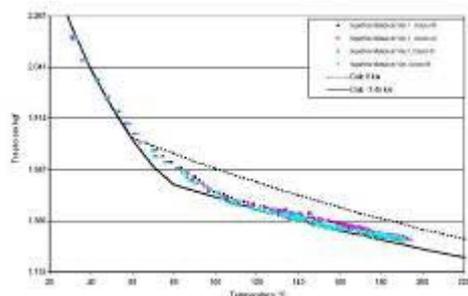


Figura 15: Tração pela temperatura da superfície do condutor, 14 de Setembro de 2005. Dados de Gráfico ajustando muito bem usando um stress compressivo de 1,45 Ksi particularmente acima de 100°C.

Resultados similares foram obtidos analisando nos dados do ORNL em 06 de Novembro de 2005.

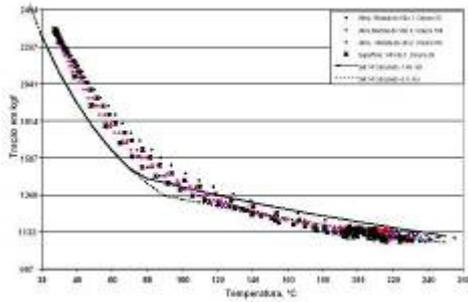


Figura 16: Tração pela Temperatura, Novembro 2005. O modelo concorda com os dados medidos acima de 100°C usando um stress compressivo de 1,45 Ksi

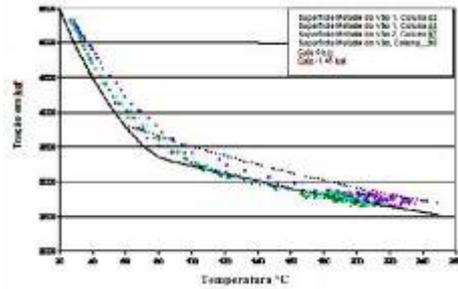


Figura 17: Formas de onda da Tração pela Temperatura 06 Novembro de 2005, o modelo concorda com os valores medidos de temperatura, usando um stress compressivo no alumínio de 2,45 Ksi.

## 6 - RESPOSTA DAS ALTAS TEMPERATURAS NOS ACESSÓRIOS:

Ambos acessórios pré-formados da PLP e os a compressão da AFL (anteriormente conhecida como Alcoa Fujikura) foram usados na instalação da linha para teste. Eles tiveram uma excelente performance e se mantiveram muito mais frios que o condutor durante a exposição a temperaturas acima de 200°C.

### 6.1 Acessórios PLP:

O perfil da temperatura dos acessórios de suspensão, ancoragem e emendas foram medidos. Os acoplamentos térmicos foram montados sobre cada uma das camadas de varetas pré-formadas externas e internas como no esquema ilustrativo das Figuras 18 e 19. As temperaturas nas camadas internas foi mais severa que nas camadas externas por que os acoplamentos térmicos ficaram próximos das coroas externas do condutor e as coroas da alma – ver Figura 21.



Figura 18 – Esquema do sistema de suspensão mostrando o local dos acoplamentos térmicos (AT). Localização da preformada interna e o AT mostrando uma ligação estreita com o condutor

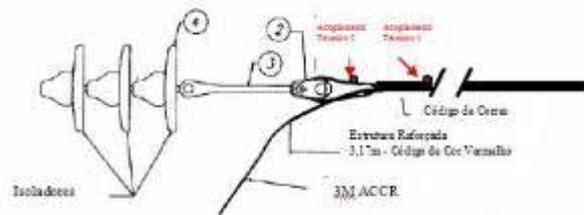


Figura 19: Uma alça preformada e o local da instalação dos acoplamentos térmicos - AT

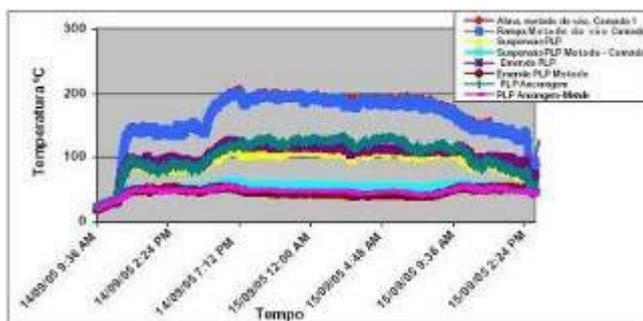


Figura 20: Mostra um exemplo do THERMOLIGN<sup>MR</sup> PLP para suspensão, emenda, alça preformada. Perfis da temperatura durante o teste de ciclo térmico no condutor de 150 a 200°C mostram que os acessórios PLP ficaram abaixo de 120°C quando o condutor estava com mais de 200°C.

## 6.2 Acessórios da Alcoa:

Ambas os acessórios a compressão foram testados, emenda e grampo de ancoragem ficaram abaixo de 105°C durante uma exposição do condutor a uma temperatura acima de 200°C – ver Figura 22. Elas não apresentaram problemas durante os ciclos térmicos. Usando o acoplamento térmico designado TC1 (Quente, pois ficou mais próximo ao condutor) e TC2 que ficou no centro da luva de emenda como é mostrado no esquema da Figura 21.

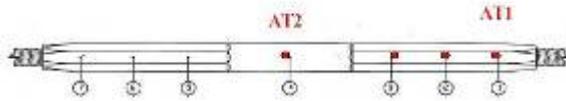


Figura 21: Local dos acoplamentos térmicos no terminal e na luva de emenda da AFL a compressão.

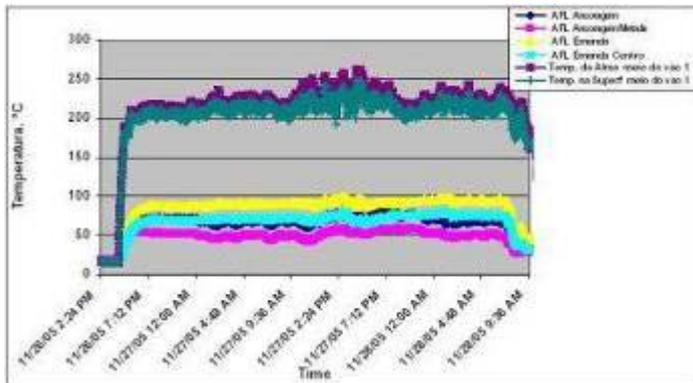
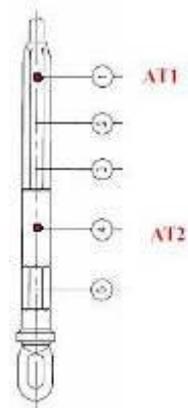


Figura 22 - Emenda e grampo de ancoragem a compressão da Alcoa, temperatura durante um ciclo, todos mais frios que o condutor que estava a mais de 200°C.



Todos os acessórios instalados ficaram mais frios que o condutor que esteve aquecido acima de 200°C. Mais adiante no exame do condutor, dos acessórios e de suas interfaces serão chechadas para obter o resultado final do ciclo térmico.

## 7 - AMPACIDADE E AVALIAÇÃO TÉRMICA DO CONDUTOR:

### 1.1 Modelo de Ampacidade Previsto pela IEEE

A norma IEEE 738-1993 foi usada para prever a temperatura do condutor durante o ciclo térmico. Condições climáticas para uma corrente e vento constante foram usadas como modelo. A Figura 24 mostra um exemplo de estado fixo e dados cíclicos de alta temperatura usados no modelo. A Figura 24 traça a corrente medida versus a corrente prevista (usando ambos os modelos IEEE e CIGRE) como o condutor em temperatura em torno de 200°C; boa concordância. Emissividade,  $\epsilon = 0,347$ , medida pela ORNL em 2003, foi usado no modelo de calculo. ACCR 795. Não é esperado que a emissividade do condutor mude devido à baixa tensão usada na linha (400V). O condutor é avaliado em 1.653A para uma operação contínua a 210°C e 1.778A para regime de emergência a 240°C. Os dados mostram que o condutor suporta temperaturas superiores a 240°C e correntes além de 2.200 A.

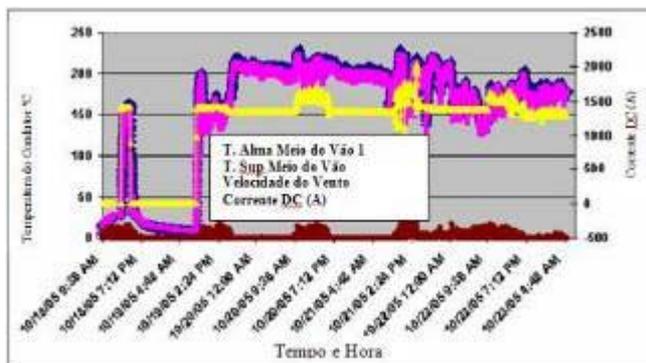


Figura 23 – Mostra um exemplo de ciclos térmicos com a corrente constante, dados usados do modelo previsto em Outubro de 2005.

## 7.2 Modelo de Ampacidade IEEE X CIGRÉ:

Foi usado um modelo em 1997 para computar e comparado com o CIGRÉ e a norma IEEE 736. Esse programa foi feito pela Valley Group Rate Kit Software. Havia pouca diferença entre os dois modelos e concordavam com os dados de literatura. Prevendo valores de corrente que também concordavam com os valores medidos e plotados na figura 24.

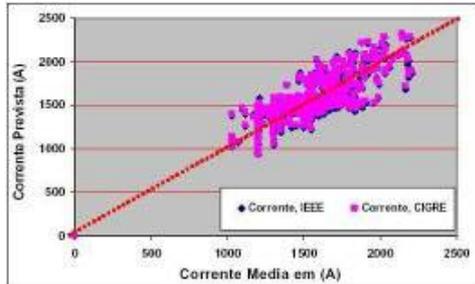


Figura 24: Comparação entre os modelos previstos pela IEEE e CIGRÉ com os valores de corrente medidos tiveram boa concordância



Figura 25: Foto Ilustrativa do 3M ACCR

## 8- CONCLUSÃO:

O condutor ACCR 795 foi instalado e testado com sucesso no ORNL. Este sofreu ciclos térmicos da temperatura ambiente até temperaturas superiores a 200°C por centenas de rigorosas horas, alimentada por uma potência fornecida em DC. Entre a alma e condutor verificou-se uma diferença de temperatura ficou entre 50°C e 200°C dependendo da velocidade do vento e das temperaturas foram superiores a 200°C. Velocidade do vento abaixo de 0 m/s produz uma alta temperatura gradiente da superfície para a alma.

Análise dos dados mostram que a medição da corrente concorda muito bem com os modelos de avaliação térmica previstos na norma. O condutor foi avaliado para operação contínua numa corrente 1.653A e temperatura de 210°C e ainda numa corrente de 1.778 e temperatura de 240°C para regime de emergência. O modelo do CIGRÉ concorda com o modelo da IEEE 736.

A tração do condutor ficou estabilizada durante e depois dos ciclos térmicos. Medições na linha versus a temperatura coincidem bem com os valores computados usando a soma das trações do método STESS.

Tanto os acessórios da PLP como os da AFL ficaram com temperatura abaixo de 120°C enquanto a temperatura do condutor excedia os 200°C. Os condutores e acessórios ficaram expostos a altas temperaturas por mais de 1000 horas e não apresentou nenhum dano visual.

## 9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Working Group B.212 "Conductors for the Upgrading of Overhead Lines" (CIGRE Technical Brochure No. 244, 2004).
- [2] S. Elliott "HECO Puts New Composite Conductors to the Test" (Transmission and Distribution World, June 2003).
- [3] T. O. Seppa "A Practical Approach for Increasing the Thermal Capabilities of Transmission Lines" (IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 8, No. 3, July 1993).
- [4] T. O. Seppa "Use of On-Line Tension Monitoring for Real Time Thermal Ratings, Ice Loads and Other Environmental Effects" (CIGRE 22-102, Paris, France, September 1998).
- [6] J. S. Barrett, S. Dutta, and O. Nigol "A New Computer Model of ACSR Conductors" (IEEE Trans., Vol. PAS-102, No. 3, March 1983, pages 614–21).
- [7] T. Varney "Graphic Method of Sag-Tension Calculation for ACSR" (AIEE, 1927).
- [8] "IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors" (IEEE Standard 738-1993).
- [9] R. Whapham and J. Robinson "Factory Formed Dead Ends on High Temperature Conductors" (to be published in IEEE proceedings, New Orleans, October 2005).
- [10] R. Clark and S. Barrett "WAPA and DOE Field Test Composite 3M Conductor" (Transmission and Distribution World, Nov. 2003.)

**Luis Cláudio Soares de Oliveira** nascido em Morrinhos, GO em 04/03/1969. Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Mogi das Cruzes – MBA em Gestão Empresarial pela Fundação Getúlio Vargas, experiência profissional em Trabalhos em Linha Viva em Linhas de Transmissão, Subestações e Redes de Distribuição há 16 anos. Trabalhando atualmente na 3M do Brasil como Especialista Pleno de Serviços Profissionais.