



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

GGH - 20  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

**GRUPO I  
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRAULICA - GGC**

**DETERMINAÇÃO DA VIDA ÚTIL DE COMPONENTES DE FIXAÇÃO DE BARRAS ESTATÓRICAS**

**Álvaro José Fogaça Elaine de Andrade Fabio Tomczak\* Fernando Piazza Gabriel Pinto de Souza  
Paulo César Inone Joseane Valente Gulmine**

**COPEL GERAÇÃO  
LACTEC**

**LACTEC  
LACTEC**

**LACTEC**

**LACTEC**

**LACTEC**

**RESUMO**

Os materiais compósitos estratificados apresentam diversas aplicações no setor de energia elétrica, na área de distribuição, geração e transmissão de energia. As aplicações mais comuns neste setor são como ferramentas, acessórios e dispositivos. Neste trabalho, foram utilizados para estudo dispositivos de fixação de barras estatóricas, confeccionados em materiais compósitos constituídos por uma resina termofixa em base epóxi reforçado por mantas de tecidos de fibras de vidro com orientações definidas. O uso destes materiais em máquinas geradoras em usinas hidrelétricas é muito comum. Estes dispositivos podem ser utilizados como calço fixo ou em outras aplicações como elementos de pressão mecânica para restringir e amortecer as vibrações das barras estatóricas dos geradores. Porém, a sua vulnerabilidade ao esforço mecânico e à temperatura elevada durante o seu emprego, induzem a processos degradativos que levam a perdas irreversíveis em suas características e propriedades físico-químicas ao longo do tempo, diminuindo desta forma seu desempenho e tempo de vida útil. A pesquisa da suportabilidade térmica e verificação da manutenção das propriedades físico-químicas destes dispositivos se justificam pela importância destes na função de garantir a integridade do sistema isolante de barras estatóricas.

Neste trabalho foram analisadas amostras de componentes de fixação de barras estatóricas das usinas da COPEL: Salto Caxias; Governador Bento Munhoz da Rocha (Foz do Areia) e Governador Ney Braga.

Técnicas complementares, tais como microscopia ótica e espectroscopia infravermelha, foram utilizadas com a finalidade de identificar e caracterizar os materiais empregados na confecção destes compósitos, diagnosticando os tipos de tecidos utilizados como reforço, número de camadas e ângulo de orientação das fibras.

**PALAVRAS-CHAVE**

Estimativa de vida útil, análise termogravimétrica, cunhas de barras estatóricas.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A pesquisa da suportabilidade térmica e conseqüentemente a verificação da manutenção das propriedades mecânicas dos componentes de fixação se justifica pela importância destes na função de garantir a integridade do sistema isolante de barras estatóricas. Estes dispositivos de fibra de vidro reforçados com resina sintética podem ser utilizados como calço fixo ou em outras aplicações como elementos de pressão mecânica para restringir e amortecer as vibrações das barras estatóricas nas ranhuras dos geradores elétricos.

Para satisfazer as exigências, os sistemas isolantes devem apresentar a combinação exigida de características mecânicas, químicas e elétricas e mantê-las a um nível correspondente também durante o tempo de operação fixado para o equipamento.

\*Centro Politécnico da UFPR, s/nº - CEP 81531-990 Caixa Postal 19067 - Curitiba - PR - BRASIL  
Tel.: (041) 361-6263 - Fax: (041) 266-3582 - e-mail: tomczak@lactec.org.br

Para avaliar o tempo de vida útil dos componentes de fixação de barras estatóricas foram utilizados os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM E 1877, a partir dos dados experimentais obtidos pela aplicação da norma ASTM E 1641.

A fundamentação teórica para aplicação destas normas envolveu a descrição de uma curva de tempo de vida e a descrição teórica das curvas de TGA, onde os parâmetros que regem estas reações de degradação correlacionam as concentrações dos reagentes (o material em estado de novo) e a temperatura a que este material está submetido (temperatura de operação), conforme mostrado na FIGURA 1.1.

$$v = k [R]^n$$

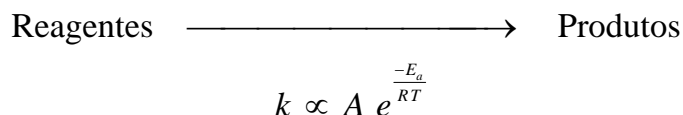


FIGURA 1.1: Reação representativa da degradação.

O conceito de velocidade de reação  $V$ , descreve o consumo dos reagentes como sendo proporcional à sua concentração elevada a ordem de reação  $n$ , onde  $k$  é a constante de proporcionalidade definida pela relação de Arrhenius que estabelece a sua dependência com a temperatura. Assim as reações de degradação são interpretadas na referência e citadas nas normas ASTM, que descrevem as curvas de Tempo de Vida e TGA, tornando possível estabelecer um critério entre a redução de massa, a uma determinada temperatura ou quando submetido a uma taxa de aquecimento, com a perda das características de isolamento do sistema.

As normas ASTM E1641 e 1877 avaliam a resistência do material levando-se em conta os efeitos ativados termicamente, embora a suportabilidade de um isolamento possa ser afetada por outros fatores, tais como, stress mecânico e elétrico, vibração, atmosfera agressiva, umidade, sujeira ou radiação.

Para validar os resultados obtidos, através do método termogravimétrico, foram feitas comparações com outras técnicas tais como espectroscopia de infravermelho e tração e ruptura, que proporcionaram acompanhar o comportamento mecânico dos calços de barra estatórica e também caracterizar quimicamente, a composição destes, no seu estado original e após envelhecimento em estufa a 100 °C e 150 °C por um período de 4 meses.

## 2.0 - PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1.1 Amostras

Para a realização dos ensaios foram utilizadas amostras de dispositivos de fixação de barras estatóricas das Usinas de Salto Caxias, Governador Bento Munhoz da Rocha (Foz do Areia), Governador Ney Braga (Segredo).

### 2.1.2 Análise Termogravimétrica

As curvas de TGA foram obtidas através um módulo termogravimétrico TG 209 NETZSCH acoplado a um analisador térmico NETZSCH TASC 414/3, utilizando-se taxas de aquecimento de 2, 4, 6, e 8 °C/min, sob atmosfera dinâmica de oxigênio e de nitrogênio, com vazão de gás da ordem de 15 mL/min em pressão atmosférica.

As amostras utilizadas para este ensaio foram os seguintes:

- Dispositivos de Fixação de Barras Estatóricas da Usina de Foz do Areia original;
- Dispositivos de Fixação de Barras Estatóricas da usina de Foz do Areia envelhecido em campo 50000 h ;
- Dispositivos de Fixação de Barras Estatóricas da usina de Segredo desaprovado a 90 °C;
- Dispositivos de Fixação de Barras Estatóricas da usina de Foz do Areia (GMB) original e envelhecido;
- Dispositivos de Fixação de Barras Estatóricas da usina de Salto Caxias (mola) original;

As massas de amostra utilizadas para o ensaio foram da ordem de 12 mg com precisão de 1 µg, pesadas em cadinhos de alta alumina tampado e previamente zerado. A faixa de temperatura trabalhada foi de 20 até 900 °C.

### 2.1.3 Ensaio mecânico de tração e ruptura

Os ensaios de tração e ruptura de polímeros foram realizados através do equipamento INSTRON modelo 4467. A amostra utilizada foi o Dispositivos de Fixação de Barras Estatóricas (mola) de barra estatórica da usina de Salto Caxias sem uso e envelhecidas em estufa. Devido as características deste material, as amostras para ensaio foram retiradas diretamente do Dispositivos de Fixação de Barras Estatóricas, sem a recomendação de normas técnicas, procurando evitar ao máximo a introdução de defeitos durante a confecção dos mesmos.

Cada corpo-de-prova foi cortado nas dimensões de 200 mm de comprimento por 26,0 mm de largura na espessura de aproximadamente 1,0 mm (espessura original de cada Dispositivos de Fixação de Barras Estatóricas).

Em seguida, 20 corpos-de-prova foram envelhecidos em estufa a 100 e 150 °C por 1500 h (~ 2 meses) e 3000 h (~4 meses), com retirada de dois lotes de 10 amostras para o ensaio.

Testes preliminares mostraram boa reprodutibilidade das curvas de tensão- deformação para velocidades do travessão entre 2 e 50 mm/min com célula de carga de 3000 kg e distância entre garras de 100 mm. A partir

destes testes, estipulou-se estas mesmas condições para o ensaio e duas velocidades, 8 e 20 mm/min, nas quais todas as amostras foram trabalhadas.

### 3.0 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os principais resultados das técnicas aplicadas e desenvolvidos neste projeto serão apresentados neste item com a finalidade de mostrar as curvas características dos materiais em estudo, exemplificando uma correlação entre a evolução temporal das propriedades físicas e químicas em decorrência dos processos de degradação.

#### 3.1.1 Análise Termogravimétrica e Expectativa de Vida

As curvas características de perda de massa com o aumento da temperatura dos materiais utilizados nos dispositivos de fixação de barras estatóricas, apresentaram dois processos de degradação onde a perda de massa polimérica estava em torno de 40%, e o restante em tecido de fibra de vidro. O tratamento matemático aplicado às curvas, com a finalidade de quantificar o primeiro processo e normalizar a perda de massa para cada amostra, ensaiada em todas as taxas de aquecimento, como indicado pela norma ASTM E 1641-99, consistiu na deconvolução da curva derivada de TGA de cada processo, eliminando assim a diferença na variação de composição em consequência da amostragem, como mostra a FIGURA 3.1.

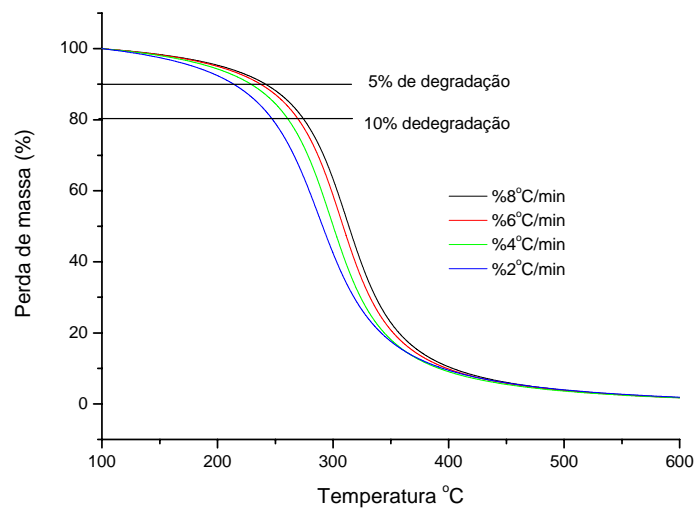


FIGURA 3.1: Curvas de termogravimetria normalizadas do primeiro processo de degradação a 100 %, para amostras de dispositivos de fixação de barras estatóricas não envelhecidas da usina de Foz do Areia. Os parâmetros cinéticos de Arrhenius foram determinados para um dado percentual de conversão do processo nas curvas normalizadas, conforme mostrado na FIGURA 3.2 para 5% de degradação.

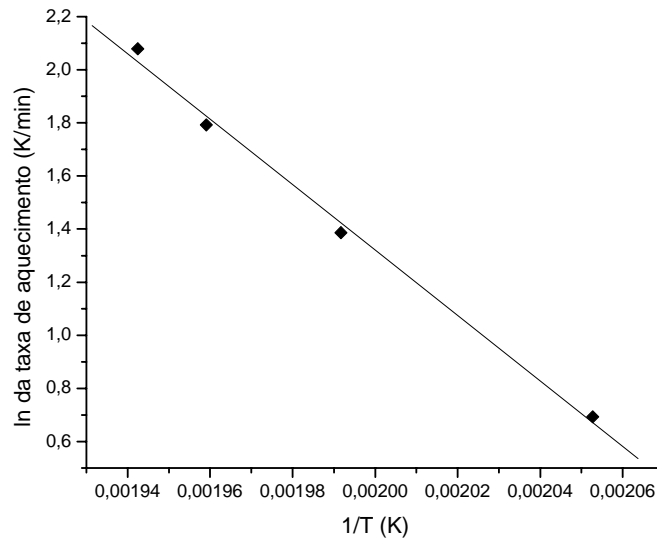


FIGURA 3.2: Ajuste de Arrhenius para o dispositivo sem uso a 5% de degradação da usina de Foz do Areia. Através destes parâmetros as curvas de expectativa de vida para os Dispositivos de Fixação de barras estatóricas sem uso da Usina de Salto Caxias, mostradas na FIGURA 3.3, puderam ser determinadas.

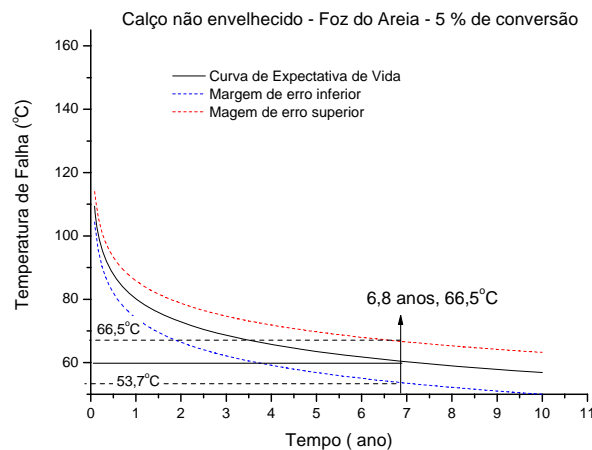


FIGURA 3.3: Expectativa de vida útil a 5% de conversão em peso das amostras de dispositivos de fixação de barras estatóricas da Usina de Foz do Areia.

O método calcula a energia de ativação necessária para que o material atinja um determinado percentual de degradação, ou seja, quanto maior o grau de conversão maior a energia necessária para alimentar esta reação, logo, um percentual de degradação mais elevado necessita maior temperatura para que este mesmo índice de degradação ocorra no mesmo período de tempo, assim na FIGURA 3.3, nota-se que para um critério de falha de 5% de degradação, a temperatura para que o material atinja o índice de falha (RTI correspondente a 60000 h, ou seja, 6,8 anos), como indicado pela norma ASTM E 1877-00, é menor para critérios com graus de degradação superiores, como pode ser observado para o índice de perda a 10%.

A curva de expectativa de vida determinada, permitiu avaliar quanto tempo o material, submetido à uma determinada temperatura, experimentará uma taxa de degradação em perda de massa, estabelecendo desta forma um critério de vida útil de acordo com uma propriedade físico-química determinante para a aplicação.

Uma correlação entre perda de massa com uma outra propriedade físico-química pode ser estabelecida experimentalmente.

### 3.1.2 Ensaio Mecânico de Tração e Ruptura

As solicitações impostas aos dispositivos de fixação de barras estatóricas, demandam uma estabilidade em suas características mecânicas, tornando esta propriedade indispensável no estudo de envelhecimento dos materiais utilizados.

A aplicação da técnica de ensaios mecânicos de tração e ruptura foi adaptada para as condições de amostragem do material e verificada a sua resposta quanto às características de envelhecimento. Desta forma, foram

comparadas as repostas em tensão e deformação para materiais em condições originais e após envelhecimento térmico em diferentes velocidades de aplicação com o objetivo de identificar parâmetros que melhor caracterizem a evolução das características mecânicas com o envelhecimento. Os principais resultados obtidos nas curvas tensão-deformação e os parâmetros de ensaio e envelhecimento estão tabelados a seguir:

TABELA 3.1: Média dos ensaios de tração e ruptura nos Dispositivos de Fixação de Barras Estatóricas (mola) - Usina de Salto Caxias.

Tempo (horas) e temperatura (°C) de envelhecimento	Velocidade (mm/min)	Tensão máxima (MPa)	Deformação na tensão máxima (%)
Novo	8	479,574	4,487
	20	466,884	4,460
1.500 horas (100°C)	8	634,320	5,809
	20	685,805	6,275
3.000 horas (100°C)	8	533,771	5,261
	20	581,986	5,772
1.500 horas (150°C)	8	638,957	6,130
	20	712,365	6,510
3.000 horas (150°C)	8	626,731	5,856
	20	623,004	5,709

Os resultados obtidos indicam que o material apresenta um aumento inicial das propriedades com o tempo de envelhecimento, seguido por uma queda acentuada das propriedades. Este comportamento indica a ocorrência de uma pós cura em relação às temperaturas de envelhecimento do material. Com relação à velocidade de ensaio, identifica-se que, em diferentes velocidades, pode-se observar mais claramente a variação do comportamento do material.

Em relação à forma inicial da curva de tensão-deformação, no intervalo de 0 a 2%, nota-se que este ensaio deve ser analisado com maior atenção, pois este intervalo parece sofrer maior influência do componente polimérico do compósito do que do tecido de fibra. A orientação da trama do tecido com relação ao esforço mecânico permite uma deformação inicial diferenciada destacando a interação entre fibra e a resina. Esta observação pode ser utilizada como uma ferramenta de investigação da interação entre os componentes desta classe de materiais.

#### 4.0 - CONCLUSÕES

Os procedimentos estabelecidos pelas normas ASTM em estudo, podem ser utilizados na especificação, caracterização e classificação de dispositivos (compósitos) similares aos em estudo. As técnicas aplicadas são capazes de identificar e estabelecer critérios de controle de qualidade e aceitação do material.

Esta técnica se mostra uma ferramenta adicional na verificação da suportabilidade às diversas solicitações impostas a estes dispositivos.

Esta técnica também pode ser utilizada na pré-qualificação de materiais e fornecedores, de forma a reduzir custos e envelhecimento, propiciando a extensão da vida útil dos equipamentos, menores tempos de intervenção e aumento da confiabilidade do sistema.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASTM 1641-99. "Standard Test Method for Decomposition Kinetics by Thermogravimetry".
- [2] ASTM 1877-00. "Standard Practice for Calculating Thermal Endurance of Materials from Thermogravimetric Decomposition Data".
- [3] KISSINGER, H.E. "Reaction Kinetics in Differential Thermal Analysis". Analytical Chemistry, vol. 29, nº 11, november 1957, 1702-1706.
- [4] IEC 85. "Thermal Evaluation and Classification of Electrical Insulation", 1984.
- [5] NIELSEN, L; LANDEL, R.F "Mechanical properties of polymers and composites". Marcel Dekker Inc., New York,1994.
- [6] CALISTER, Wilian D. "Materials science and engineering – An introduction". John Wiley & Sons, Inc. 1994.
- [7] KATAKEYAMA,T.; QUINN, F.X. "Thermal Analysis: Fundamentals and Applications to Polymers Science". Chichester:John Wiley & Sons, 1994.

- [8] CAVALHEIRO, E.T.G.; IONASHIRO, M.; Et.Al. "A Influência de Fatores Experimentais nos Resultados de Análises Termogravimétricas". *Química Nova*, 18 (1995), 305-308.
- [9] ASTM 1641-99. "Standard Test Method for Decomposition Kinetics by Thermogravimetry".
- [10] GUILHERME, A.H.L. "Estudo das Reações Durante a Incineração de Resíduos Químicos – Aspectos Cinético e Termodinâmico". Dissertação de mestrado – UFPR, 2000.
- [11] BROWN, M.E. "Introduction to Thermal Analysis: Techniques and Applications". London: Chapman & Hill, 1988.
- [12] CAVALHEIRO, E.T.G.; IONASHIRO, M.; Et.Al. "A Influência de Fatores Experimentais nos Resultados de Análises Termogravimétricas". *Química nova*, 18 (1995), 305-308.
- [13] BLAZEJOWSKI, J. "Remarks on the Description of Reaction Kinetics under Non-Isothermal Conditions". *Thermochimica Acta*, 76 (1984), 359-372.
- [14] TANG, T. B.; CHAUDHRI, M. M. "Analysis of Dynamic Kinetic Data from Solid-State Reactions". *Journal of Thermal Analysis*, 18 (1980), 247-261.
- [15] BROWN, M.E. "Introduction to Thermal Analysis: Techniques and Applications". London: Chapman & Hill, 1988.
- [16] AGNELLI, J.A.M. "Apostila sobre Degradação, Estabilização e Envelhecimento de Polímeros". DEMA/UFSCAR, 1998.
- [17] BROWN, M.E.; PHILLPOTTS, C. A. R. "Non-Isothermal Kinetics". *Journal Chemical Education*, 55 (1978), 556-560.
- [18] TOOP, D., J. "Theory of life testing and use of thermogravimetric analysis to predict the thermal life of wire enamels". *IEEE transactions on Electrical Insulation* vol. EI-6 n° 1, march 1971, 02-14.
- [19] KRIZANOVSKY, L. MENTLIK, V. "The use of thermal analysis to predict the thermal life of organic electrical insulating materials". *Journal of Thermal Analysis*, vol 13 (1978) 571-580.
- [20] FLYNN, J.H. "The Isoconversional Method for Determination of Energy of Activation at Constant Heating Rates". *Journal of Thermal Analysis*, vol 27 (1983) 95-102.