



**GRUPO I
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA (GGH)**

**ANÁLISES FÍSICAS DA ISOLAÇÃO E DO CONDUTOR DE BOBINAS
ESTATÓRICAS DO GERADOR N. 4 DA USINA HENRY BORDEN**

**Itamar Ferreira
UNICAMP**

**Álvaro Martins*
EMAE**

**José Alberto da Silva Matos
EMAE**

**Luiz Gonçalves Maiche
EMAE**

RESUMO

Este trabalho tem por objetivos apresentar e discutir os resultados de uma análise de falha das bobinas estatóricas do gerador n. 4 da Usina Henry Borden. Foram analisadas sete bobinas; cinco retiradas do gerador, uma que havia sido submetida ao ensaio de envelhecimento acelerado (100 °C, 250 h, 23 kV) e uma testemunha. As técnicas utilizadas nas análises das amostras das bobinas estatóricas foram: análise metalográfica, ensaios de dureza e de tração do cobre; análise visual e por microscopia eletrônica de varredura de alguns componentes da isolação; envelhecimento acelerado de amostras retiradas da bobina testemunha em três temperaturas (155, 185 e 215°C), quatro tempos pré-determinados (1, 3, 5 e 8 horas) e ao ar. Os ensaios de envelhecimento acelerado, nas condições analisadas nesse trabalho, mostraram que houve aumento do tamanho de grão do cobre (condutor), mesmo para a menor temperatura (155°C), e degradação do poliéster somente nas temperaturas mais altas (185 e 215°C), sendo que a degradação aumentou sensivelmente com o aumento do tempo de envelhecimento. A partir da análise realizada, foi possível concluir que a causa da falha do gerador foi a degradação do poliéster.

PALAVRAS-CHAVE

Análise de falha, Hidrogeradores, Curto circuito.

1.0 – INTRODUÇÃO

Atualmente, a reforma e repontencialização de hidrogeradores possui uma posição de destaque no cenário nacional tendo em vista a idade da grande maioria das máquinas instaladas no país. Nesse contexto, a isolação de bobinas estatóricas classe F tem sido muito utilizada por apresentar, entre outros aspectos, vida longa, resistência às condições operacionais severas e, especialmente, permitir o aumento da capacidade de geração (1, 2).

Os fabricantes de hidrogeradores são pressionados no sentido de aumentar a capacidade dos seus sistemas de isolação. Adicionalmente, como decorrência da alta competição internacional, por um lado, esses fabricantes têm sido obrigados a diminuir custos e, por outro lado, aumentar a eficiência das máquinas, reduzir as margens de projeto, desenvolver materiais melhores (mais finos) e ajustar os processos de manufatura visando principalmente a diminuição do tempo de fabricação (2). Isso tem levado a avanços significativos de novos materiais e métodos utilizados na fabricação da isolação, aumentando, entretanto, a probabilidade da isolação apresentar falha, antes de atingir a vida esperada.

Inspeções de vários usuários de máquinas rotativas de alta potência indicam que a principal causa de falha de motores e geradores, em uso por alguns anos, é o colapso da isolação das bobinas estatóricas (3, 4).

Este trabalho apresenta e discute os resultados das análises físicas da isolação (classe F) e do cobre de sete bobinas estatóricas do gerador n. 4 da Usina Henry Borden, localizada em Cubatão (SP), que apresentou falha (curto-circuito entre espiras) em algumas

bobinas, com quase quarenta meses em operação, visando a determinação da causa da falha.

2.0 - METODOLOGIA

Foram analisadas amostras de sete bobinas. Essas amostras possuíam aproximadamente 500 mm de comprimento e foram retiradas da região central da parte reta das bobinas. A Tabela 1 relaciona as bobinas analisadas com a condição operacional das mesmas.

TABELA 1 – Bobinas Analisadas.

Bobina	Posição na Ranhura	Condição Operacional
59	fundo	com curto e danificada no acidente
60	topo	com curto mas não danificada no acidente
61	topo	em operação e em bom estado
163	topo	em operação e em bom estado (posicionada a 180° com relação à bobina 59)
186	topo	com curto (não passou no ensaio de 13,6 kV) região de mais alta temperatura (115 °C) no enrolamento;
273		submetida ao ensaio de envelhecimento acelerado (100 °C, 250 h, 23kV); resultados satisfatórios.
276		testemunha

2.1 Análise Metalográfica

A análise metalográfica foi realizada em amostras do condutor das bobinas analisadas e em amostras da bobina 276 (testemunha) tratadas termicamente, com o objetivo de determinação do tamanho médio dos grãos. As amostras para a análise metalográfica foram retiradas da posição central do pacote das bobinas. Após a retirada das amostras foi feita a preparação para a análise metalográfica de acordo com a norma ASTM E 3-95 ("American Society for Testing and Materials / Standard practice for preparation of metallographic specimens", 1995). Após o embutimento, lixamento e polimento as amostras foram atacadas com o seguinte reagente: 8g de $FeCl_3$ + 25 ml de HCl + 100 ml de H_2O destilada. O tamanho médio dos grãos foi determinado pelo método das intersecções com uma

linha teste, utilizando um círculo de 30 mm de diâmetro. Foram realizadas três medições em cada uma das micrografias. A análise metalográfica foi feita por microscopia ótica, utilizando um Microscópio óptico NEOPHOT 32.

2.2 Ensaios de Dureza

Foram realizados ensaios de dureza Vickers diretamente sobre as amostras do cobre utilizadas na análise metalográfica, amostras essas embutidas na direção transversal, paralela à superfície. Os ensaios de dureza Vickers foram realizados em um durômetro HECKERT - WPM, modelo HPO 250 e de acordo com a norma ASTM E 92 - 82 ["Vickers Hardness of Metallic Materials", 1982 (reaprovada em 1992)]. Foram utilizados a carga de 10 kgf e um tempo de 15 segundos em todos os ensaios.

2.3 Ensaios de Tração

Os corpos de prova para os ensaios de tração foram usinados a partir de amostras retiradas da região central da parte reta das bobinas. A confecção dos corpos de prova, a realização dos ensaios e a determinação das propriedades mecânicas (alongamento, limite de escoamento e limite de resistência à tração) foram feitas de acordo com a norma ASTM E 8M - 95 ("American Society for Testing and Materials / Tension testing of metallic materials / 1995"). As dimensões dos corpos de prova foram: seção transversal retangular com 2,1 x 6 mm e comprimento da parte útil de 32 mm. Foram realizados três ensaios, com taxa de deformação da ordem de $16 \times 10^{-4} s^{-1}$, de cada uma das amostras das bobinas. Os ensaios foram realizados em uma máquina MTS (Materials Testing System) modelo 810, de 10 toneladas.

2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

A microscopia eletrônica de varredura de amostras do poliéster tem por objetivos identificar as diferenças de degradação do mesmo, entre as várias bobinas analisadas. As amostras foram metalizadas e analisadas em um microscópio eletrônico de varredura Jeol - JXA 840 A.

2.5 Tratamento Térmico de Envelhecimento

Foram realizados tratamentos térmicos de envelhecimento simplificados em amostras retiradas da bobina 276, ou seja, da bobina testemunha. Foram realizados tratamentos térmicos em três temperaturas diferentes e em alguns tempos, com o objetivo de verificar o grau de degradação da isolação secundária e o aumento do tamanho de grão do cobre. Amostras com aproximadamente 50 mm de comprimento, foram

retiradas da amostra da bobina 276 (testemunha). Foi feita a retirada do isolamento principal e confeccionado amostras contendo três condutores de cobre com os respectivos isolamentos de mica e poliéster. As amostras foram tratadas em um forno elétrico em três temperaturas diferentes: $(155 \pm 2)^\circ\text{C}$, $(185 \pm 2)^\circ\text{C}$ e $(215 \pm 2)^\circ\text{C}$; e quatro tempos: 1, 3, 5 e 8 horas. A menor temperatura de tratamento (155°C) foi fixada tendo em vista que o gerador n. 4 da Usina Henry Borden foi repotencializado para classe de isolamento F. As outras duas temperaturas foram fixadas no sentido de se ter o máximo envelhecimento em tempos curtos. Como os tratamentos térmicos foram realizados ao ar, a análise do poliéster somente foi feita na região central do condutor, no centro da amostra tratada, região essa onde a oxidação do poliéster foi mínima, pois essa não entrou em contato direto com o ar.

3. - RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Metalográfica

A Tabela 2 mostra o tamanho médio dos grãos das amostras analisadas e as Figuras 2 e 3 mostram micrografias, da seção longitudinal do condutor (cobre), das amostras das bobinas 276 (testemunha) e 163, que apresentaram respectivamente o menor e o maior tamanho de grão. Observa-se que a microestrutura característica das amostras é de "cobre recozido".

TABELA 2 - Tamanho Médio dos Grãos do cobre (condutor).

Bobina	Tamanho médio dos grão (μm)	
	Média	Desvio Padrão
59	20,7	0,9
60	24,3	3,4
61	25,5	3,4
163	26,7	4,7
186	26,1	3,4
273	19,5	2,3
276 (testemunha)	13,8	0,8

Observa-se, na Tabela 2, que as bobinas que estiveram em operação no gerador (bobinas 59, 60, 61, 163 e 186) e a bobina submetida ao ensaio de envelhecimento a 100°C , durante 250 horas, bobina 273, apresentaram tamanho médio de grãos maiores do que a bobina testemunha (276). Torna-se importante salientar que a amostra da bobina 59, posicionada no fundo da ranhura, possui menor tamanho médio de grão, quando comparada com as amostras das bobinas 60, 61, 163 e 186, o que indica que essa bobina 59, na posição de retirada da amostra para a análise

metalográfica, esteve em operação com temperatura inferior.

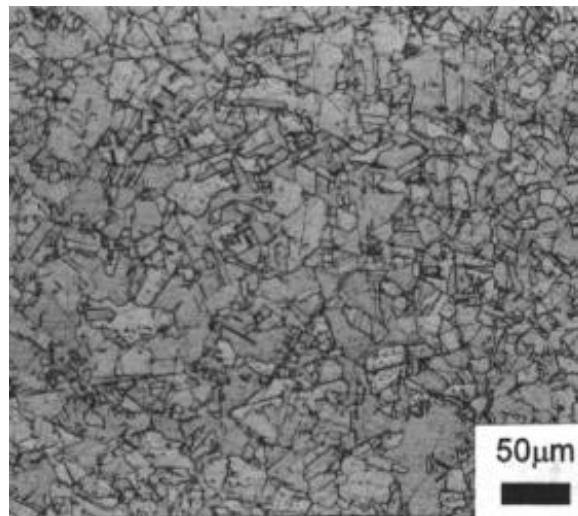


FIGURA 1 – Micrografia do Cobre da Bobina 276.

De acordo com informações do fabricante das bobinas estatísticas, a temperatura de projeto do cobre, em condições nominais de operação, é de $125,5^\circ\text{C}$ na barra superior (ou de topo) e $112,3^\circ\text{C}$ na barra inferior (ou de fundo). Essa diferença de temperatura, de aproximadamente 10°C , está de acordo com os resultados deste relatório. Além disso, esse aumento de temperatura de aproximadamente 10°C , levou a um aumento de aproximadamente 20% no tamanho médio do grão, para o tempo de operação das bobinas.

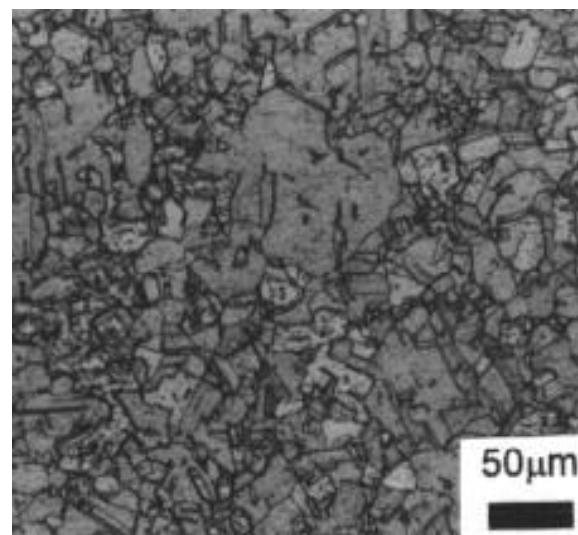


FIGURA 2 – Micrografia do Cobre da Bobina 163.

As amostras de cobre da bobina 273, bobina essa submetida ao ensaio de envelhecimento acelerado, a 100°C por 250 horas, também apresentaram um

tamanho médio dos grãos maior do que a bobina testemunha. Isso indica que o cobre se encontrava inicialmente em uma condição metalúrgica muito sensível, ou seja, suficiente para apresentar aumento do tamanho médio dos grão a 100 °C.

3.2 Ensaios de Dureza

A Tabela 3 mostra os resultados dos ensaios de dureza Vickers. Observa-se, nessa tabela, que a dureza média dos condutores é 55,2HV com pequena variação entre as várias bobinas analisadas.

TABELA 3 - Resultados dos Ensaios de Dureza Vickers dos Condutores (Cobre).

Amostra	Média	Desvio Padrão
59	54,5	0,81
60	55,3	1,39
61	54,6	1,66
273	56,0	3,14
276	55,5	0,55

3.3 Ensaios de Tração

A Tabela 4 mostra os resultados dos ensaios de tração de amostras do condutor (cobre). Observa-se, nessa Tabela, que não há variação significativa dos níveis do limite de resistência à tração (S_t), do limite de escoamento (S_e) e do alongamento entre as amostras das várias bobinas. Além disso, os valores encontrados estão de acordo com a especificação do fabricante; os valores especificados são de alongamento à ruptura mínimo de 32% e limite de resistência à tração de 200 a 250 N/mm² (20,4 a 25,5 kgf/mm²).

Torna-se importante salientar que, de acordo com a norma "SAE J461-Wrought and Cast Copper Alloys", os valores encontrados de resistência mecânica e ductilidade indicam que o condutor (cobre) foi submetido a um recozimento, previamente à fabricação das bobinas, em uma temperatura de pelo menos 230 °C.

3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

As Figuras 3 e 4 mostram fotomicrografias de amostras de poliéster das bobinas 276 e 60. Observa-se que a amostra da bobina 60 está bastante degradada. É interessante salientar que foram analisadas, por microscopia eletrônica de varredura, amostras de todas as bobinas; entretanto, não foi possível apresentar neste trabalho por falta de espaço. Foi possível observar que a amostra da bobina 61 se encontra também degradada. Por outro lado, a amostra da bobina 59 (bobina com

curto e danificada no acidente, mas posicionada no fundo da ranhura 59 do gerador) apresenta sinais de pouca degradação, estando, em algumas regiões, com aparência da amostra da bobina 276 (testemunha). Isso está de acordo com as condições de solitação térmica das bobinas, pois as posicionadas no topo trabalham em uma temperatura aproximadamente 10 °C mais alta do que as posicionadas no fundo. Essa diferença de temperatura, levou a um grau de degradação do poliéster muito maior nas bobinas mais quentes (as de topo), tendo em vista que o tempo de exposição das bobinas é o mesmo.

TABELA 4 - Resultados dos Ensaios de Tração; Média e Desvio Padrão entre Parênteses.

Bobina	Alongamento em 25 mm (%)	Limite de Escoamento (kgf/mm ²)	Limite de Resistência à tração (kgf/mm ²)
59	35,9 (1,2)	9,89 (0,71)	22,5 (0,5)
60	38,8 (0,4)	10,8 (0,2)	23,5 (0,3)
61	38,5 (1,3)	10,6 (1,0)	23,0 (0,3)
163	36,9 (0,8)	11,4 (1,0)	22,9 (0,4)
186	36,7 (0,5)	10,8 (0,5)	23,3 (0,4)
273	42,4 (1,3)	11,7 (1,66)	23,3 (0,4)
276	39,4 (3,3)	10,6 (0,1)	23,1 (0,95)

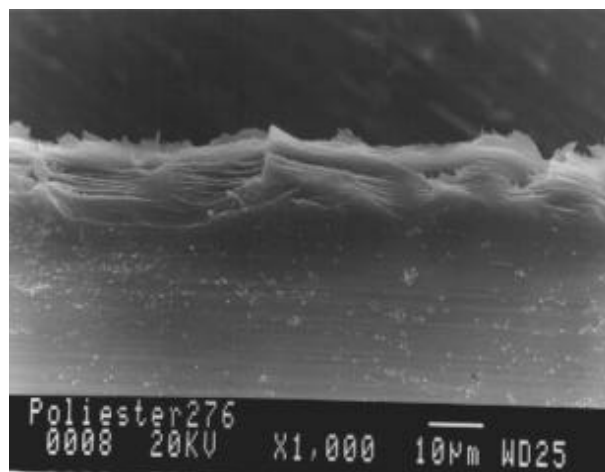


FIGURA 3 – Fotomicrografia Obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura de uma Amostra do Poliéster da Bobina 276.

3.5 Tratamentos Térmicos de Envelhecimento

Os tratamentos térmicos foram realizados visando a obtenção de informações relacionadas à degradação do poliéster e ao aumento do tamanho de grão do cobre (condutor). Com relação à aparência visual dos fragmentos do poliéster retirados da região central das amostras tratadas termicamente, foi possível observar

que a 155 °C houve pouca degradação mesmo para o maior tempo, ou seja 8 horas. A 185 °C houve razoável degradação do poliéster a 1 hora e um pequeno aumento do grau de degradação com o aumento do tempo de tratamento. Já a 215 °C houve uma degradação completa do poliéster sendo difícil retirar amostras do mesmo, pois além de fragmentado o mesmo ficou muito aderido ao condutor e à mica. O grande problema é que a degradação do poliéster depende da temperatura e do tempo; é muito provável que a 155 °C ocorra degradação do poliéster para tempos não muito longos.



FIGURA 4 – Fotomicrografia Obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura de uma Amostra do Poliéster da Bobina 60.

A Tabela 5 mostra o tamanho médio dos grãos do cobre após os tratamentos térmicos. Torna-se importante salientar que, diferentemente do poliéster, o tamanho médio dos grãos do cobre depende muito da temperatura e pouco do tempo, a partir da condição metalúrgica inicial do cobre, ou seja, da bobina testemunha, que se apresentava recristalizada e com grãos equiaxiais pequenos. Após o tratamento térmico houve aumento de alguns grãos, aumento esse maior com o aumento da temperatura.

Como citado anteriormente, um dos objetivos de se realizar o tratamento térmico das amostras da bobina 276 (testemunha) foi verificar a estabilidade da fita de poliéster em solicitações térmicas severas, ou seja, realizar um envelhecimento acelerado. A norma CEI IEC 216, "Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials, Third Edition, 1987", recomenda tempos muito superiores aos utilizados neste relatório. Assim, os resultados dos tratamentos térmicos utilizados neste relatório devem ser encarados como preliminares. Nesse caso específico, a degradação do poliéster

poderia ser indiretamente avaliada pela resistência mecânica do mesmo, obtida em ensaios de tração, em função da temperatura e do tempo, o que foi impraticável neste trabalho, tendo em vista o avançado estado de degradação de algumas amostras.

TABELA 5 - Tamanho Médio dos Grão do Cobre da Bobina 276 após os Tratamentos Térmicos.

Temperatura (°C)	Tempo (h)	Tamanho Médio do Grão (µm)	
		Média	Desvio Padrão
155	1	18,4	1,2
	3	17,5	0,9
	5	18,6	1,1
	8	17,6	1,3
185	1	20,8	2,2
	3	21,7	1,9
	5	23,3	0,6
	8	22,2	1,2
215	1	25,9	2,9
	3	25,7	2,0
	5	25,9	2,9
	8	26,1	1,4
<i>Referência Bob. 276</i>	-	13,8	0,8

Com relação ao aumento do tamanho dos grãos do cobre pode-se verificar, por meio das Tabelas 2 e 5, que as amostras das bobinas 60, 61, 163 e 186, na região central do gerador (região essa onde as amostras foram retiradas para análise), apresentaram tamanho médio de grão da ordem de 25,7 µm, ou seja, aproximadamente 85% maior do que a testemunha. As amostras das bobinas 59 e 273 (bobina submetida ao ensaio de envelhecimento a 100 °C por 250 horas) também apresentaram aumento do tamanho médio dos grãos, mas menos significativo que as outras bobinas.

Como o tamanho médio dos grãos depende muito da temperatura e menos do tempo, o que inclusive pode ser observado na Tabela 5, pode-se concluir que as bobinas estão submetidas, quando em uso, a temperaturas diferentes em função da posição que ocupam no gerador, ou seja, o cobre das bobinas posicionadas no topo trabalha em uma temperatura superior ao cobre das posições do fundo. Os dezoito pontos de tomada de temperatura no enrolamento do gerador não representam a temperatura dos condutores de cobre da bobina localizada no topo nem no fundo da ranhura. Essa temperatura representa um valor intermediário, já que as bobinas do fundo trabalham mais frias do que as do topo. A temperatura do poliéster na bobina de topo pode ser significativamente alta quando comparada com a temperatura que

proporcionaria uma vida para a bobina superior a 30 anos. As bobinas 60, 61, 163 e 186 foram submetidas, quando em uso, a temperaturas bastante altas. Tendo em vista o tempo de duração das bobinas, aproximadamente 3 anos, não é possível estabelecer uma relação direta com os resultados do tratamento térmico. Os tratamentos térmicos mostraram que o tamanho médio dos grãos do cobre é sensivelmente dependente da temperatura.

É pouco provável que o processo de fabricação de algumas bobinas, principalmente a etapa de impregnação do epoxy em "Auto-clave", tenha saído do controle a ponto de causar degradação precoce do poliéster. Isso porque o estado de degradação do poliéster das quatro bobinas analisadas (localizadas no topo das ranhuras) não possui diferenças significativas. Além disso, se ocorreu problema no processo de fabricação de algumas bobinas, muito provavelmente essas com problemas viriam a falhar prematuramente, mostrando diferenças significativas do estado do poliéster com relação às outras bobinas, o que não se verificou neste relatório.

Torna-se importante salientar que é muito provável que o estado de degradação do poliéster das bobinas localizadas no topo da ranhura seja igual no gerador como um todo. Assim, a falha poderia ter ocorrido em qualquer outra bobina, aleatoriamente. Em outras palavras, a vida das bobinas, ou seja, o tempo efetivo de funcionamento, é uma grandeza estatística o que significa que, se fossem trocadas as bobinas diretamente afetadas pelo acidente, supondo que isso fosse possível, e o gerador entrasse em operação com as bobinas "velhas", certamente depois de pouco tempo outra bobina "velha" localizada no topo entraria em curto-circuito.

4.0 - CONCLUSÕES

Houve aumento do tamanho médio dos grãos do cobre (condutor), de 13,8 μm da bobina testemunha, para valores acima de 24 μm para as bobinas posicionadas no topo das ranhuras e de 20,7 μm para a bobina 59 que estava posicionada no fundo.

Os resultados dos ensaios de tração, o limite de resistência à tração, da ordem de 23 kgf/mm^2 , e o alongamento, entre 35,9% e 42,4%, de amostras do condutor (cobre) das várias bobinas analisadas, estão de acordo com a especificação do fabricante.

As amostras do poliéster das bobinas 60 e 61 estão mais degradadas quando comparadas com as amostras das bobinas 59 e 276 (testemunha). O poliéster da bobina 59, posicionada no fundo da ranhura, está

menos degradado quando comparado com o poliéster das outras bobinas que estavam posicionadas no topo.

Foi possível observar que houve forte degradação do poliéster das bobinas analisadas que estiveram em operação, não somente nas proximidades da ranhura 59, próximo ao local de ocorrência do curto-circuito, como também em duas outras bobinas localizadas em outras regiões do gerador. O poliéster utilizado no isolamento secundário das bobinas é muito sensível à temperatura; a 185 °C ele apresenta sinais de degradação mesmo em tempos muito curtos.

A falha do gerador ocorreu devido à degradação do poliéster que levou ao surgimento de vazios internos que provocaram descargas parciais e posteriormente curto-circuito.

5.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) MARTINS, A. et alli. Ensaio para verificação de curto-circuito entre espiras e avaliação de enrolamentos estáticos de geradores. XIV SNPTEE, Outubro de 1997, Belém, Pará.
- (2) STONE, G. C. et. alli. Experience with accelerated aging tests on stator bars and coils. International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, Canada, June 3-6, 1990, p. 356.
- (3) EVANS, D. L. IEEE Working Group Report of Problems with Hydrogenerator Thermostat Winding. IEEE Tran PAS, July 1981, p.3284.
- (4) ALBRECHT, P. F. et. alli. Assessment of Reliability of Motors in Utility Applications, IEEE IAS Conference Record, 1984, p. 364.
- (5) CEI IEC 216 - Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials, Parts 1 and 2. Third Edition, 1987.
- (6) ASTM E 8M - 95 - Tension testing of metallic materials (Metric). Annual Book of ASTM (American Society for Testing and Materials), 1995, p. 77.
- (7) ASTM E 3 - 95 - Standard practice for preparation of metallographic specimens. Annual Book of ASTM (American Society for Testing and Materials), 1995, p. 3.