



RELATÓRIO
REPORT

Feito por - Author
Dr. JCMendes
Aprovado por - Approved by
RAMarcondes
Solicitado por - Requested by
CDomiciano



DE
FROM
BRABB-PTPT/D

DATA
DATE
2005-04-14

R 1ZBR05-0060

REVISÃO
REVISION

DATA REVISÃO
DATE REVISION

PÁGINA
PAGE
1

☒	Análise, Investigação Teórica Analysis, Theoretical Investigation
☐	Teste, Investigação Experimental Test, Experimental Investigation
☐	Relatório Parcial Partial Report
☒	Relatório Final Final Report

Nº de páginas do texto
Nº of pages of the text
13

Nº. de páginas do suplemento
Nº. of the supplement pages
-

Assunto - Title

ITAIPU BINACIONAL – Brasil e Paraguai
Transf Elevador 1Ø - Pos TU15, 60Hz, 256 MVA, 18-525/√3 kV
BBC, No. Série SP 15090, Ano Fabric 1982:
Reparo Completo - Isolação do Núcleo

Referência:

1. Itaipu Binacional
Doc. Contratual CT. 7315/2004
BI MTSI.DF/LAP 007/2005, Boletim de Inspeção
Remoção de Barreiras Isolantes entre Sub-Secções do Núcleo

Resumo

O transformador em referência é parte do conjunto de transformadores elevadores monofásicos da **Usina Hidrelétrica de Itaipu**, localizada no Rio Paraná no município de Foz do Iguaçu no, PR.

Após ocorrência envolvendo a elevação da geração de gases combustíveis dissolvidos no óleo isolante, o transformador foi removido de operação e um conjunto de verificações e análises foi realizado por **Itaipu** e **ABB**. Os resultados destas verificações e análises indicaram a alternativa de reparo completo como a alternativa técnica-econômica mais adequada para a recuperação confiável do transformador.

Em 2003-Junho-19 a **ABB**, atendendo solicitação de **Itaipu**, realizou inspeção visual interna e externa do transformador, incluindo sua Parte Ativa. A inspeção permitiu a observação do estado geral das partes internas e externas.

Este relatório apresenta uma descrição do reparo realizado no núcleo, em particular, aos aspectos relevantes associados à substituição das isolações do núcleo incluindo os fundamentos que suportam a remoção das isolações originais de celulose montadas entre grupos de pacotes do núcleo.

Distribution:
ITAIPU Binacional
PTPT/D, PTPT/R,
PTPT/Q



Direitos Autorais e de Reprodução:

Nenhuma parte deste relatório pode ser reproduzida ou utilizada em qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico ou mecânico, incluindo prototipagem, fotocópias e microfilmagem, sem permissão por escrito da ©ABB Ltda. Lei 9610 de 19Fev1998. A violação do direito do autor (lei 5988/1973) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.



Conteúdo

1. Geral	3
2. Arranjo da Secção Transversal do Núcleo Magnético	4
2. Aspectos Relevantes do Reparo do Núcleo	5
3. Reparo do Núcleo e Remoção de Barreiras Isolantes	5
4. Consequências de Curto-Circuitos Internos ao Núcleo	7
5. Melhorias para Isolação de Núcleos Magnéticos	9
5. Processo de Reparo do Núcleo	10
6. Conclusões	11
7. Referências	12

1. Geral

O transformador em referência é parte do conjunto de transformadores elevadores monofásicos da **Usina Hidrelétrica de Itaipu**.

Após ocorrência envolvendo a elevação da geração de gases combustíveis dissolvidos no óleo isolante, o transformador foi removido de operação e um conjunto de verificações e análises foi realizado por **Itaipú** e **ABB**. Os resultados destas verificações e análises indicaram a alternativa de reparo completo como a alternativa técnica-econômica mais adequada para a recuperação confiável do transformador.



No contexto do reparo completo, foi estabelecido também o requisito de reparo do núcleo considerando que os resultados das análises revelaram a ocorrência de curto-circuito entre o núcleo magnético e a estrutura mecânica correspondente.

A alternativa de reparo do núcleo, incluiu:

- a substituição do núcleo magnético (em razão da impossibilidade técnica de sua desmontagem devido à utilização, no processo de fabricação original do núcleo, de colagem das lâminas de ferro-silício do núcleo através de cola-epóxi); e
- a substituição das isolações necessárias (as isolações originais de celulose deverão ser substituídas por componentes correspondentes, **onde aplicável**, de fibra de vidro) [1].

Este relatório apresenta uma descrição do reparo realizado no núcleo, em particular, aos aspectos associados à substituição das isolações do núcleo incluindo os fundamentos que suportam a remoção das isolações originais de celulose montadas entre grupos de pacotes do núcleo.

2. Arranjo da Secção Transversal do Núcleo Magnético

O transformador elevador foi originalmente projetado e fabricado utilizando o conceito de núcleo tipo CORE (núcleo envolvido). O núcleo magnético tem duas colunas principais, nas quais estão montados, em arranjo concêntrico, os enrolamentos de baixa tensão (BT) e alta tensão (AT) do transformador. Estes enrolamentos estão ligados eletricamente em paralelos.

A secção do núcleo resulta da disposição de pacotes (lâminas de igual largura) de chapas de FeSi, adequadamente montados dentro de um contorno circular. O diâmetro do núcleo é de 1100mm, constituído de 40 pacotes de chapas e FeSi com 20 diferentes larguras. A secção do núcleo, em conformidade com o projeto original do mesmo, é subdividida em onze (11) sub-seções isoladas entre si através de 4 canais de resfriamento do núcleo e 6 barreiras de presspan (celulose).



Naturalmente cada uma das onze (11) sub-seções do núcleo são interligadas a um ponto externo de equalização de potencial (terra) do núcleo. A eventual ocorrência de contato adicional indevido entre sub-seções adjacentes resulta em formação de espira indevida associado a aterramento duplo. Desta forma, a separação do núcleo em sub-seções deve ser minimizada, de forma a reduzir o risco de ocorrências de curto-circuitos indevidos e elevar a confiabilidade global do núcleo do transformador.

A figura 1 mostra uma vista geral detalhada da secção original do núcleo do transformador em referência, incluindo a localização relativa dos canais de resfriamento interno do núcleo e as barreiras isolantes.

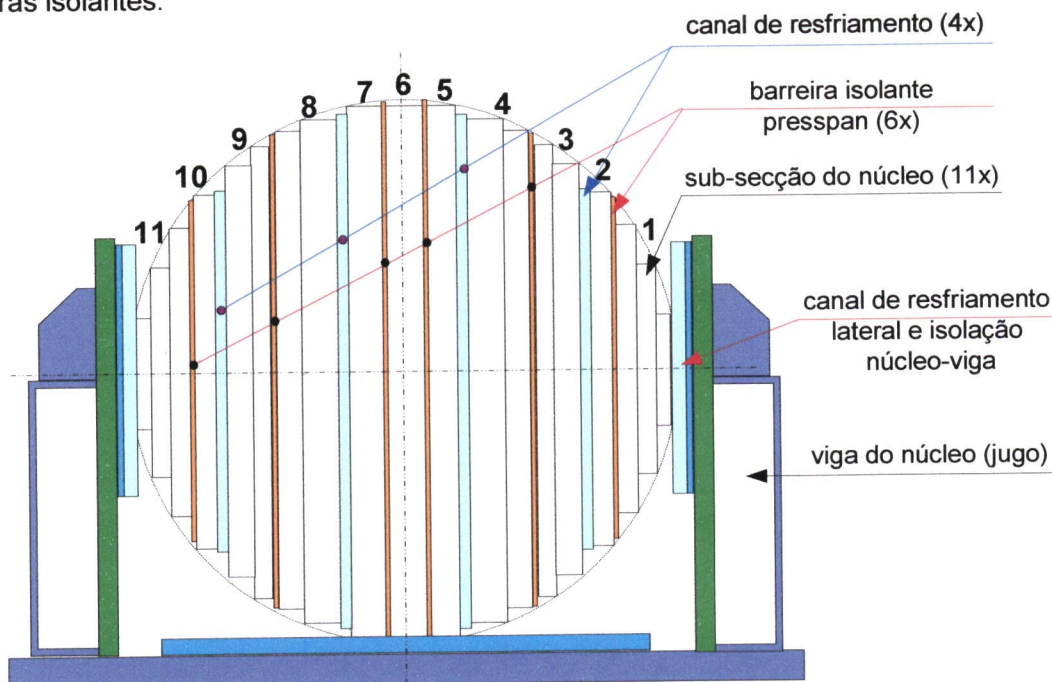


Figura 1 – Vista Geral da Secção Original do Núcleo
Canais de Resfriamento Interno e Barreiras de Separação

2. Aspectos Relevantes do Reparo do Núcleo

O reparo do do transformador em referência inclui a substituição completa do núcleo magnético, isto é, todas as lâminas de FeSi por novas. Entre as vantagens da ação de substituição do núcleo magnético destacam-se:

- utilização de material (FeSi) moderno, cujas propriedades magnéticas e elevada resistência da isolamento própria das lâminas de FeSi resulta em núcleo magnético de desempenho superior (redução de: perdas específicas, perdas totais, perdas localizadas, temperatura localizada, etc);
- minimização da corrente induzida entre as lâminas (interlaminar) do núcleo magnético montado (empilhado) associada à elevação da resistência resultante da isolamento entre lâminas adjacentes;
- minimização da magneto-estricção do núcleo que resulta em características superiores de desempenho do núcleo quanto a vibrações mecânicas e do nível de ruído correspondente; e
- redução da dimensão das rebarbas das arestas das lâminas de FeSi, resultantes dos processos de corte longitudinal e transversal correspondentes. Assim, a resistência interlaminar equivalente da secção do núcleo resulta mais elevada e as correntes induzidas locais (entre pontos de contatos adjacentes de baixa resistência devido a rebarbas) resultam minimizadas com consequente redução das perdas adicionais correspondentes.

3. Reparo do Núcleo e Remoção de Barreiras Isolantes

A secção do núcleo, em conformidade com o projeto original do mesmo, é subdividida em onze (11) sub-secções isoladas entre si através de 4 canais de resfriamento do núcleo e 6 barreiras de presspan (celulose).

O processo de reparo de núcleo de transformadores, utilizado pela **ABB**, inclui:

- a utilização de materiais modernos e de características de desempenho superiores àqueles utilizados à época do projeto e fabricação original do transformador;
- a atualização tecnológica correspondente, através da utilização (onde aplicável) do estado da arte da tecnologia do **Grupo ABB** para núcleo de transformadores.

Neste contexto, a **ABB** procedeu à remoção das 6 barreiras de presspan (celulose) entre sub-secções do núcleo magnético.

	Este procedimento de reparo de transformadores, incluindo a remoção de barreiras isolantes internas a núcleos, têm sido utilizado com sucesso pela ABB há muitos anos. Assim núcleos com grandes diâmetros, de transformadores elevadores e autotransformadores de grande potência, já foram reparados com remoção de barreiras isolantes internas. Além disso, desde 1988 a ABB Asea Brown Boveri não mais utiliza barreiras isolantes dentro de núcleo de seus transformadores novos quer seja no Brasil ou em suas outras 23 fábricas de transformadores de potência. Essa tecnologia do Grupo ABB é aplicada, com sucesso, igualmente em núcleos de diâmetros mesmo superiores à 1400mm.
---	---

Os fundamentos que suportam este procedimento da **ABB** são:

- resistência elevada, da isolamento própria, entre as lâminas de FeSi adjacentes;
- resistência elevada entre arestas, de lâminas de FeSi adjacentes, em consequência da redução da dimensão das rebarbas resultantes dos processos modernos de corte longitudinal e transversal de lâminas de núcleo;
- elevação da confiabilidade global resultante do núcleo, associada à minimização de sub-seções do núcleo e dos aterramentos correspondentes e consequente redução de exposição ao risco de estabelecimento de contatos indevidos entre sub-seções adjacentes do núcleo; e
- extensão da vida útil do núcleo (vida da isolamento correspondente) pela eliminação de material isolante com grande superfície em contato direto com lâminas de FeSi aquecidas.

A figura 2 mostra uma vista geral detalhada da secção atual do núcleo do transformador em referência, após o reparo, incluindo a localização relativa dos canais de resfriamento interno do núcleo.

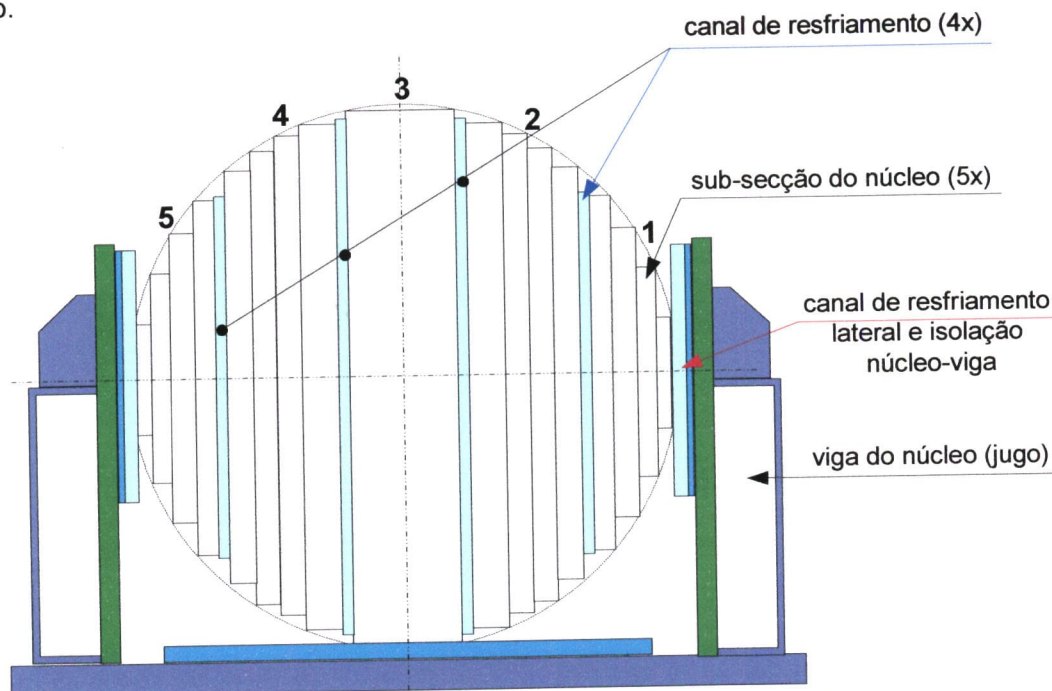


Figura 2 – Vista Geral da Secção do Núcleo Após Reparo com Canais de Resfriamento Interno

4. Consequências de Curto-Circuitos Internos ao Núcleo

A falha de uma componente isolante interno ao núcleo estabelece riscos operacionais ao transformador. As consequências típicas de curto-circuitos indevidos internos ao núcleo, envolvendo sub-seções do núcleo, são:

- formação de espira com secção transversal definida (ponto de aterramento - núcleo - contato indevido - núcleo - ponto de aterramento);

A figura 3 mostra um esquema geral do sistema de equalização de potencial de aterramento das sub-seções do núcleo original.

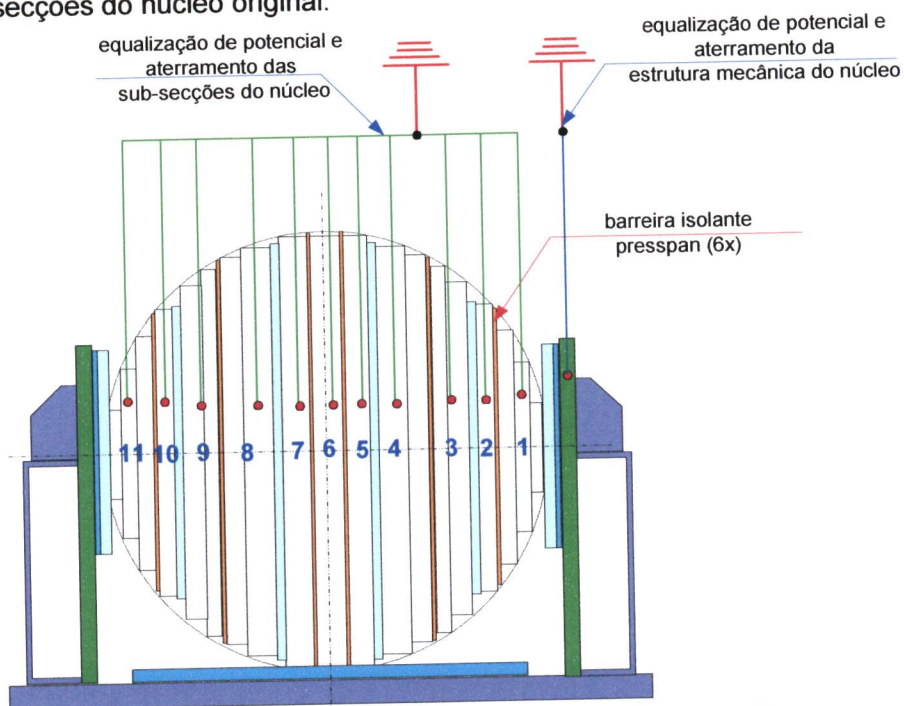


Figura 3 – Núcleo Original: Sistema de Equalização de Potencial e Aterramento

A figura 4 mostra um esquema geral de localização de espira associada a um curto-circuito indevido associado à falha de isolamento interna (barreira isolante) entre sub-seção do núcleo.

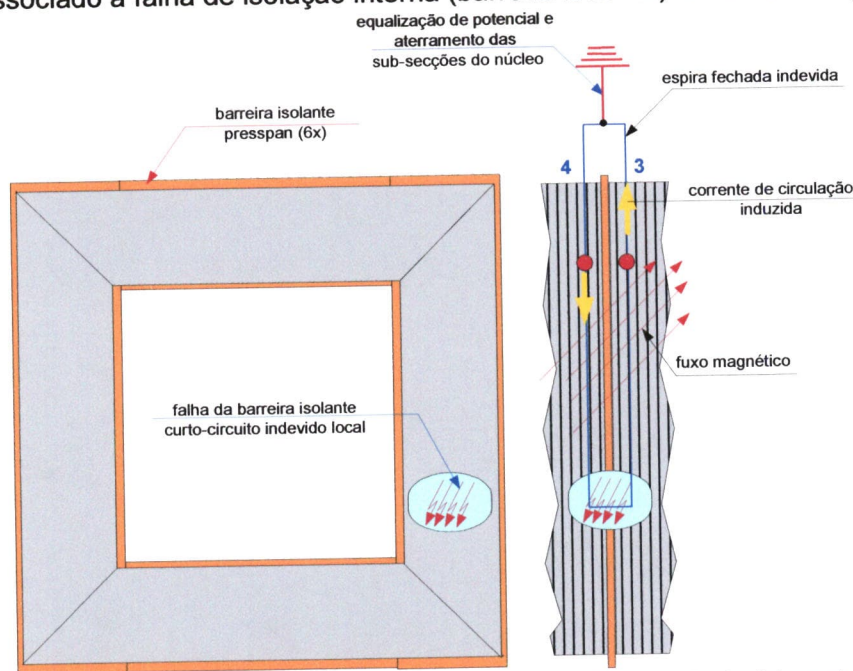


Figura 4 – Falha de Isolação Interna e Curto-Circuito Indevido entre Sub-Secções de Núcleo Magnético

- indução de corrente de circulação pela ação do fluxo magnético principal do núcleo na área da espira formada pelo contato indevido e na
- sobreaquecimento local do núcleo devido a perdas concentradas localmente;
- câncer no núcleo, caracterizado pela expansão do volume de deterioração do material do núcleo (falha cumulativa de lâminas adjacentes do núcleo magnético) sob influência da corrente de circulação induzida;
- geração local de gases combustíveis por sobreaquecimento local e deterioração de óleo adjacente;
- falha de diagnóstico associada a erro de interpretação de resultados de Gases Dissolvidos no Óleo associados a outros modos de falhas internas devido à duplicidade de fontes de geração de gases dissolvidos;
- deterioração local de componentes isolantes internos ao núcleo e envelhecimento acelerado correspondente;
- redução ou perda da prensagem mecânica transversal do núcleo associada à deterioração de isolamento interna. Com a redução de pressão pode ocorrer o deslocamento (na direção vertical) de lâminas do FeSi do núcleo magnético e o estabelecimento de contatos indevidos entre o núcleo magnético e a estrutura mecânica do núcleo (vigas, barras de suspensão, travessas de apoio, tirantes, etc) ou mesmo entre subsecções adjacentes do núcleo. Em consequência espira adicional indevida é formada com possível circulação de corrente induzida e sobreaquecimentos localizados. Adicionalmente, maus contatos indevidos podem ser estabelecidos entre partes da estrutura do núcleo (viga-travessa, etc) estabelecendo condições para a formação de arcos elétricos locais devido a flutuação de potencial elétrico entre componentes metálicos adjacentes;
- elevação das perdas no núcleo associada à elevação de perdas adicionais locais por acréscimo de correntes induzidas locais; e
- elevação do nível de ruído e de vibração do núcleo associado a redução da prensagem transversal do núcleo.

5. Melhorias para Isolação de Núcleos Magnéticos

Os seguintes aspectos tecnológicos podem ser utilizados como um guia geral aplicável para a melhoria de isolamento interna de núcleos magnéticos de transformadores de potência e de reatores de derivação.

Estes aspectos podem ser utilizados igualmente para a revitalização de núcleos antigos bem como na especificação de engenharia de novos núcleos de transformadores e reatores. Os resultados da aplicação destas recomendações são uma elevação da Qualidade correspondente, melhoria do desempenho do núcleo, aplicação apropriada de métodos de diagnósticos, resultados confiáveis de diagnósticos do transformador (ou reator) e extensão da vida útil do núcleo.

- todos os componentes mecânicos do núcleo (vigas, barras de suspensão, bases, suportes laterais, pontes de ligações, etc) devem ser através de processo adequado na cor branca, resultando melhor aspecto de Qualidade e controle da limpeza, detecção da rotas indevidas de circulação de ocrrentes e de marcas de descargas elétricas em maus contatos indevidos entre componenetes metálicos com potencial flutuante;
- remover (quando possível) toda e qualquer isolamento montada originalmente entre sub-seções adjacentes do núcleo magnético. Naturalmente devem ser mantidos apenas os canais de resfriamento interno do núcleo;
- os separadores que formam os canais de resfriamento devem ser montados utilizando apenas material de classe térmica elevada (classe F 155grC ou superior) como aqueles fabricados de **Fibra de Vidro** ou de material cerâmico (**Esteatite**);
- os compoenentes isolantes, montados entre o núcleo magnético e a estrutura mecânica correspondente devem ser fabricados de material de classe térmica elevada (classe F 155grC ou superior) tipo **Fibra de Vidro**. Em alguns casos específicos, devidos a requisitos dimensionais, pode ser necessária a utilização de técnicas de composição adequada de materiais diferentes, onde o material de interface adjacente a lâmina de FeSi do núcleo deve ser em Fibra de Vidro;
- prensagem adequada transversal das colunas e jugos do núcleo;
- separação e isolamento completa entre a estrutura do núcleo e o tanque/tampa do transformador;
- introduzir sistema de equalização de potencial adequado, com ligação individual separada para o núcleo magnético (ou suas subsecções interligadas) e para a estrutura mecânica do núcleo adequadamente equalizada;
- painel de aterramento com, no mínimo, 3 terminais (núcleo, estrutura do núcleo, terra) montado de forma adequada na tampa do tanque para propósito de ensaios de isolamento do núcleo.

5. Processo de Reparo do Núcleo

No reparo do núcleo do transformador em referência foram utilizados os procedimentos tecnológicos atualizados e aplicáveis estabelecidos pelo Grupo ABB para a recuperação completa e confiável de núcleo de transformador de potência. Os seguintes aspectos fundamentais foram observados:

a) Núcleo Magnético

- substituição completa do núcleo magnético sendo utilizado material novo M5, 0.3mm, com perdas específicas menores (comparado ao material original) e resistência de isolamento própria superior (comparado ao material original) de cada lâmina de FeSi. A figura 5 mostra uma vista geral do núcleo montado após o reparo;



Figura 5 - Núcleo Montado: Após Reparo - Vista Geral

b) Barreiras Isolantes

- remoção de todas as seis (6) barreiras isolantes originais (material: presspan, celulose classe térmica A, 105grC) entre sub-seções do núcleo magnético;
- a variação dimensional resultante da redução da espessura correspondente as 6 barreiras originais foi adequadamente compensada através da adição ao núcleo magnético de lâminas de FeSi correspondentes;

c) Canais de Resfriamento Interno

- mantidos os 4 canais originais de resfriamento interno do núcleo, sendo que na montagem dos canais de resfriamento foram utilizados separadores de **Fibra de Vidro** (classe térmica F, 155grC). A figura 6 mostra detalhes da seção transversal do núcleo magnético.



Figura 6 - Núcleo Montado: Após Reparo - Detalhes da Seção Transversal com Destaque para o Canal de Resfriamento

d) Sistema de Isolação da Estrutura do Núcleo

- os componentes isolantes, montados entre a estrutura do núcleo e o núcleo magnético correspondente, foram substituídos por componentes correspondentes fabricados em **Fibra de Vidro** (classe térmica F, 155grC). A figura 7 mostra detalhes da isolação do núcleo utilizando material em fibra de vidro; e

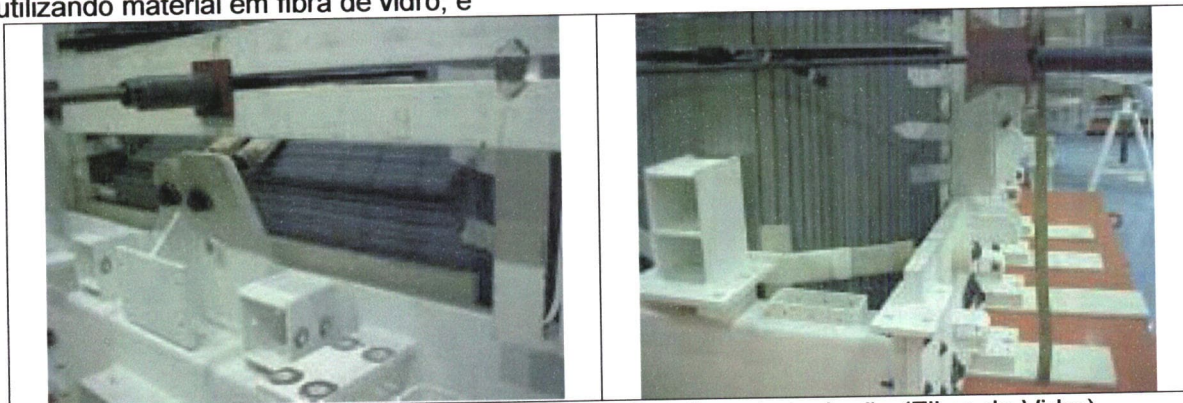


Figura 7 - Núcleo Montado: Após Reparo - Detalhes da Isolação (Fibra de Vidro)

e) Sistema de Equalização de Potencial do Núcleo

- as 5 sub-seções resultantes do núcleo (separadas pelos 4 canais de resfriamento) são interligadas eletricamente através de ligação de equalização de potencial adequada.

6. Conclusões

A **ABB Brasil** Divisão de Transformadores utilizou para o reparo do núcleo do transformador em referência, conceitos de projeto, critérios de seleção e aplicação de materiais, métodos e processos que correspondem ao estado-da-arte da tecnologia do **Grupo ABB** para transformadores de potência em alta tensão. Em resultado o núcleo atual apresenta Qualidade, características de desempenho e confiabilidade operacional garantidos na forma contratual pela **ABB Brasil**.

Desta forma, considerando os fundamentos estabelecidos pela ABB, indicados de forma detalhada neste relatório, a divergência é "**classificada como a não ser corrigida**". Assim, o núcleo completamente reparado pela **ABB** está, em sua forma final, qualificado para a aplicação da sequência dos processos de controle de qualidade e desempenho e posterior montagem dos seus enrolamentos e ligações correspondentes.



7. Referências

1. MENDES, J.C. et alii. ITAIPU BINACIONAL – Brasil e Paraguai, Transf Elev 1Ø - Pos TU15, 60Hz, 256 MVA, 18-525/ $\sqrt{3}$ kV, BBC, No. Série SP 15090, Ano Fabric 1982: Inspeção Geral da Parte Ativa do Transformador - Análises e Recomendações. **Relatório de Engenharia 1ZB03-0077**. ABB Asea Brown Boveri. São Paulo, 2003-Julho-14, 22pág.
2. MENDES, J.C e INHASZ, J. Verificação do Estado de Transformador – Pós Falha. **Preceito Técnico 1ZBR460001-1**. ABB Asea Brown Boveri. São Paulo, Mar 1999, 11pág.
3. IEEE Std 62-1995. IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus – Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators and Reactors. **IEEE Std 62-1995**. IEEE, NYork, USA, Aug/1995.
4. MENDES, J.C e MARCONDES, R. Conseqüências Gerais de Falha em Transformadores de Potência em Alta Tensão. **Artigo Interno**. ABB Asea Brown Boveri. São Paulo, Mar 1993.

C:\A-Brabb\Report\Itaipu\SP15090\Nucleo\ABB-Itaipu-R05-0060-NucleoSP15090-00.doc



As análises, opiniões ou interpretações contidas neste relatório são fundamentadas nas informações e materiais fornecidos pelo **Cliente**. A **ABB** não infere que o conteúdo das amostras analisadas por seu laboratório representa a totalidade do material presente no ambiente do equipamento do qual as amostras foram coletadas. Os resultados dos ensaios referem-se unicamente à amostra ou amostras ensaiadas. Qualquer interpretação ou opinião expressa representa a melhor avaliação da **ABB**. A **ABB** não assume nenhuma responsabilidade e não fornece nenhuma garantia ou representação, expressa ou implícita, relacionada ao estado, produtividade, operação adequada ou lucro-cessante de qualquer equipamento ou outra propriedade para a qual este relatório seja utilizado ou relacionado por qualquer razão.

ABB Ltda Brasil

Divisão de Transformadores
Av Monteiro Lobato, 3285
07190-904 Guarulhos SP
São Paulo
Brasil

Telef: +55 11 6464 8768

Fax: +55 11 6464 8399

Email:

abb.atende@br.abb.com

Web Site: www.abb.com/br

ABB