

## CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS

# ANÁLISE DE FALHAS EM EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS CONFECCIONADOS COM RESINA EPÓXI<sup>1</sup>

**Nome do autor: Fabio A.S. Ferreira**

Faculdade de Tecnologia José Crespo Gonzales – Fatec Sorocaba, Sorocaba – SP

**RESUMO:** A análise de falhas em transformadores para instrumentos que utilizam resina epóxi em sua fabricação requer vários levantamentos, estudos e de múltiplas normas, bem como análises para que se encontre a causa raiz do problema, a qual pode estar relacionada desde a fabricação, tipo de materiais utilizados, especificações de trabalho, uso inadequado ou fora do especificado. Os relatos do usuário e informações técnicas da instalação onde ocorreram as falhas, são fundamentais para esta verificação, porém muitas vezes não são enviadas de maneira completa pelo usuário ao fabricante e podem direcionar a análise para um caminho indesejado, podendo levar a conclusões inadequadas, inviabilizar determinado produto ou até mesmo seu mercado. A persistência levou a um estudo mais aprofundado do caso através da fabricação de peças para testes, aplicando-se uma série de ensaios normalizados, tais como: ensaios elétricos de isolamento com tensão aplicada, medição das descargas parciais, ensaio mecânico de flexão no equipamento, curva de DSC e ensaios térmicos, os quais conseguiram demonstrar que a falha por trincas dos equipamentos fabricados em resina epóxi se deu por falha na especificação e desconhecimento das condições de transporte e armazenamento do cliente. Foi possível concluir que a análise de requisitos constitui uma ação de extrema importância, além de indicar a necessidade de se adicionar aos dados de especificação que os limites de temperatura de operação são os mesmos para transporte e armazenamento, mesmo estando claro nas normas de fabricação dos produtos.

*Palavras chave: Resina epóxi, ensaios elétricos de isolamento, curva DSC, falha por trincas.*

### **Cracks in electrical equipments using indoor epoxy resin**

**ABSTRACT:**An analysis of failures in equipment that uses epoxy resin in its manufacture requires several surveys, studies and tests of different standards to find the root cause of the problem, which may be related to everything from manufacturing, type of materials used, specifications work conditions, inappropriate or non-specified use. Actual field information, where the failures occurred, is fundamental for this selection, but it is often not sent completely by the user to the manufacturer and can direct the analysis in an undesirable direction, which can lead to internal conclusions, making a certain product unfeasible or even the same market unviability. Persistence, generated by the high cost of the initial solution, led to a more in-depth study of the case through the manufacture of parts for testing, applying

---

<sup>1</sup> Artigo apresentado à Faculdade de Tecnologia José Crespo Gonzales, como parte dos requisitos para o Trabalho de Graduação do Curso Superior de Tecnologia em Polímeros. Sorocaba, 10 de junho de 2024.

## CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS

a series of standardized tests, such as: electrical insulation tests with applied voltage, measurement of partial discharges, mechanical bending test on the equipment, DSC curve and thermal tests, which demonstrate that the failure due to cracks of equipment manufactured in epoxy resin was due to failure to predict and lack of knowledge of the customer's transport and storage conditions. It was possible to conclude that the requirements analysis constitutes an extremely important action, in addition to indicating the need to add to the design data that the operating temperature limits are the same for transport and storage, even though it is clear in the manufacturing standards of the products.

*Keywords: Epoxy resin, electrical insulation tests, DSC curve, fails due to cracking.*

### INTRODUÇÃO

Estes tipos de equipamentos são utilizados para a medição e proteção do sistema elétrico na geração, distribuição e transmissão de energia elétrica. Estes, quando aplicados em baixa e média tensão são, quase sempre, fabricados com isolamentos do tipo seco ou, seja, com materiais poliméricos. Neste tipo de construção são utilizados materiais termoplásticos como capas de proteção para equipamentos de baixa tensão e quando se necessita de equipamentos encapsulados, utiliza-se termofixo para baixa e média tensão, sendo os materiais mais usuais a resina epóxi e a resina de poliuretano.

Algumas das vantagens atribuídas ao uso de materiais poliméricos como isolamento em detrimento ao óleo isolante, incluem a possibilidade de se produzir equipamentos com materiais antichama, que não contaminam o lençol freático porque não há vazamento em equipamentos de isolamento sólido, são mais compactos, reduzida quantidade de partes, livre de manutenção e é possível ser confeccionado em diversas formas, pois o polímero pode ser moldado.

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho se deu em função de problemas diagnosticados durante a instalação de transformadores de instrumentos de 24kV (média tensão) para uso interno (ambiente abrigado), utilizando como polímero principal a resina epóxi.

Este trabalho compreende um estudo de caso oriundo de atividades de uma empresa do setor de energia elétrica em redes de 24kV.

## CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS

### 1.1. Justificativa do tema

Esta pesquisa pode auxiliar outros alunos ou pesquisadores que porventura venham a se deparar com problemas de trincas em termofixo submetidos a esforços elétricos, mecânicos e de variações de temperatura.

Um ponto interessante deste trabalho é que demonstra uma utilização de polímeros em uma ótica diferente da conhecida normalmente, mostrando brevemente as interações entre diferentes componentes com o polímero. Considerando-se que alguns destes componentes são ativos, ou seja, durante o uso do equipamento geram calor e trabalho, o que significa que contraem e dilatam com maior intensidade.

Além disto, em comparação com os termoplásticos, verifica-se a maior dificuldade de acesso a informações de processo que envolvam outros componentes, já que a expertise do fabricante está no polímero em si, mas quando se trata de envolver outros componentes e sua combinação com o polímero, processo e aplicação.

### 1.2. Problema de Pesquisa

A respeito do problema norteador desta pesquisa, são elencadas 5 perguntas principais:

- 1) Qual o motivo das trincas em equipamentos de uso interno isolados em resina epóxi?
- 2) Existem problemas na instalação do cliente ou limites de temperatura fora do especificado?
- 3) O uso de resina para uso externo pode ser uma solução para o problema? Se sim, por que não usar?
- 4) O problema ocorre em baixa ou em alta temperatura?
- 5) A análise de DSC pode auxiliar neste estudo?

### 1.3. Hipóteses

Como possíveis hipóteses para o problema de trinca foram eleitos os seguintes pontos:

- a) Falha na matéria prima;
- b) Ocorrência de dilatação entre os metais e a resina de epóxi não compatíveis;

## CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS

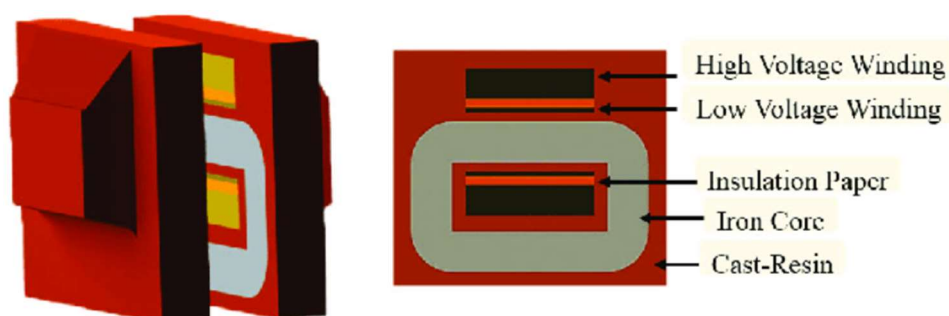
- c) Utilização de material termofixo não adequado para a aplicação da faixa de temperatura especificada;
- d) Utilização de sistema de amortecimento não adequado às faixas de temperatura ou aplicação;
- e) Falta de conhecimento dos parâmetros da curva de DSC para compatibilização entre diferentes materiais;

## 2. Referencial Teórico

### 2.1. Transformador para instrumentos.

O transformador para instrumentos consiste em um componente destinado a transmitir um sinal de informação para instrumentos de medição, medidores e dispositivos de controle ou de proteção, ou aparelhos similares (ABNT NBR6856:2021 item 3.1.38 p.7). Estes equipamentos são constituídos por um circuito eletromagnético formado por enrolamentos de cobre e núcleos de aço, com isolamento elétrico do tipo seco ou polimérico, conforme figura 1 ou isolamento do tipo líquido ou óleo isolante.

**Figura 1 – Transformadores para instrumentos isolado em resina epóxi – Composição**



**Fonte:** Disponível em: [researchgate.net](https://researchgate.net) Acesso em 06 jun. 2024.

Os transformadores com isolamento a seco podem ser fabricados em diversos formatos, materiais e com um número muito reduzido de partes, conforme figura 2.

**Figura 2 – Transformadores para instrumentos isolado em resina epóxi - Tipos**

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS



**Fonte:** Fonte: Adaptado do catálogo de Transformadores de Corrente e Potencial ISOLET 2023  
Como informação complementar e a título de comparação, o uso de equipamentos com isolamento a óleo, onde pode-se utilizar equipamentos a seco, não é uma solução adequada, pois esses possuem maior dimensional se comparados com os do tipo seco, questões de alta inflamabilidade do óleo isolante e ainda o alto risco de contaminação do solo e das águas em caso de vazamento, conforme figura 3.

**Figura 3 – Contaminação por vazamento equipamentos com isolamento a óleo**



**Fonte:** Disponível em: [jadenergia.com.br](http://jadenergia.com.br) Acesso em 22 mai. 2024.

## 2.2. Resina epóxi

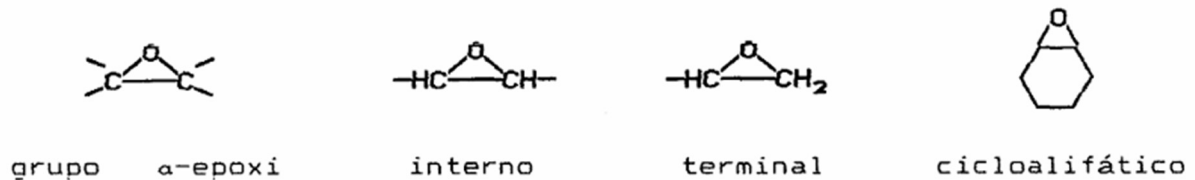
A história da resina epóxi remonta a 1936, quando Pierre Castan, um químico suíço, sintetizou a primeira resina epóxi sólida conhecida como poliglicidiléter. Ele estava interessado em explorar as reações químicas envolvendo epóxidos e poliaminas, o que o levou a desenvolver a primeira resina epóxi sólida.

Durante as décadas de 1940 e 1950, os estudos nessa área se intensificaram, resultando em avanços significativos no desenvolvimento e aperfeiçoamento da resina epóxi.

## CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS

A resina epóxi é definida como uma molécula que contém mais de um grupo  $\alpha$ -epóxi. Estes grupos podem estar situados internamente, terminalmente ou em estruturas cíclicas (H.Lee and K.Neville, 1967), conforme figura 4.

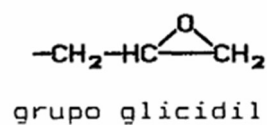
Figura 4 – Grupo epóxi – posição



Fonte: H.Lee and K.Neville (1967)

Este anel de três membros (óxido de etileno), demonstrado na figura 4, que caracteriza as resinas epóxi é também conhecido como oxirano, epóxido ou grupo etóxi. O termo glicidil é usado para referir-se a um grupo epóxi terminal (H.Lee and K.Neville, 1967), ilustrado conforme a figura 5.

Figura 5 – Grupo epóxi – grupo glicidil (óxido de etileno)

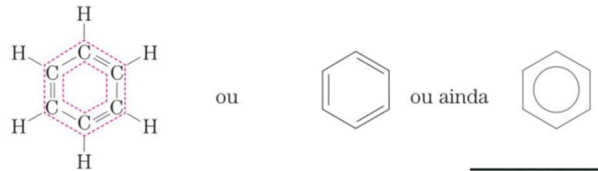


Fonte: H.Lee and K.Neville (1967)

Outro ponto importante é o tipo de cadeia da resina epóxi. Como exemplo, em equipamentos elétricos de média tensão, para uso interno ou abrigado da radiação solar, pode-se utilizar uma resina epóxi de classificação aromática ou que contenha anéis em ciclo simples ou duplas alternadas ou mais conhecido como anel de benzeno (Döring, 2022), conforme a figura 6.

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS

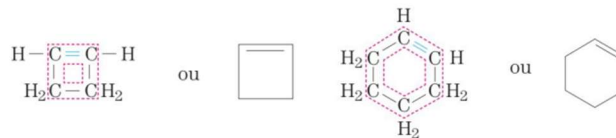
Figura 6 – Estrutura do anel aromático



Fonte: Disponível em: [preufsc.blumenau.ufsc.br](http://preufsc.blumenau.ufsc.br) em 06 de mai. 2024.

Para equipamentos elétricos que ficarão expostos à radiação solar e sob campo elétrico devem ser utilizadas resinas do tipo cicloalifática (HUNSTMAN, 2012, Guide ), pois a mesma resiste ao campo elétrico, agindo em conjunto com a radiação solar, fato que não ocorre com os sistemas aromáticos. Na figura 7 está ilustrada uma cadeia cíclica (Döring, 1967).

Figura 7 – Classificação cicloalifática



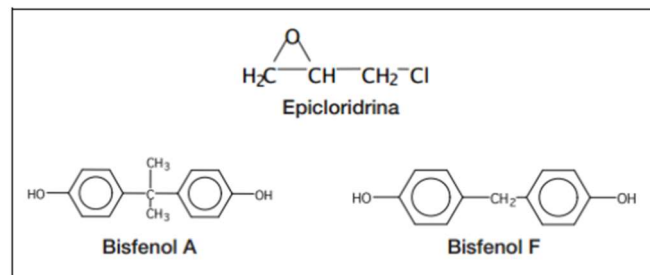
Fonte: Disponível em: [preufsc.blumenau.ufsc.br](http://preufsc.blumenau.ufsc.br) em 06 de mai. 2024.

Os sistemas de resina epóxi ou epoxídicas são misturas produzidas a partir de quantidades variáveis de muitos componentes, sendo os principais a resina epóxi e o agente reticulante, também conhecido como endurecedor. (HUNTSMAN, 2010, P.4).

Outros componentes do sistema são: solventes, diluentes reativos e cargas. As resinas mais comuns são produzidas pela reação da epícloridrina com o bisfenol A ou bisfenol F (Marques e Silva 2010, p. 5). As estruturas das moléculas citadas são mostradas na figura 8. ((HUNSTMAN, 2010, p. 4). 10 Figura 1 - Moléculas de Epícloridrina, Bisfenol A e Bisfenol F).

Figura 8 – Moléculas de epícloridrina, bisfenol A e bisfenol F

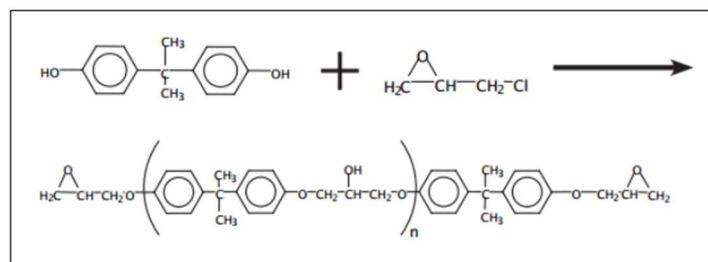
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS



Fonte: HUNTSMAN GUIDE - Silaex

Tipicamente, as moléculas de epícloridrina e bisfenol A reagem de acordo com a figura 9 para formar o epóxi.

Figura 9 – Exemplo de reação – bisfenol A com a epícloridrina



Fonte: HUNTSMAN GUIDE – Calixto, 2008,p.2194

As condições de reação, incluindo a quantidade e proporção dos materiais iniciais, determinarão o valor de “n”. As três classes gerais de resinas epóxi são líquida, sólida e líquida modificada. Outro componente é o agente de cura. O intuito do mesmo ou endurecedor é juntar ou formar uma ligação cruzada com grupos reativos (funcionais) para compor um polímero com reação completa ou curado. Existe uma variedade de agentes de cura que geralmente fornecem características aos produtos finais. No caso das resinas a base de epóxi, as amins são os agentes de cura mais utilizados, sendo que dentro deste grupo estão várias famílias compostas desta molécula, que incluem as amins alifáticas, amins cicloalifáticas e amins aromáticas (Marques e Silva, 2010, p. 9).

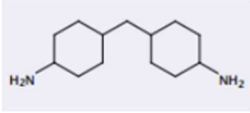
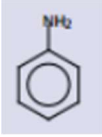
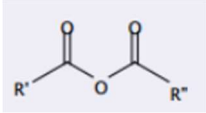
Os anidridos constituem outra classe de agentes de cura bastante utilizados. Algumas estruturas típicas são mostradas na tabela 1 (HUNSTMAN, 2010, p. 6).

Tabela 1 - Estruturas típicas de agentes de cura – exemplos

Tipo	Representação
------	---------------



CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS

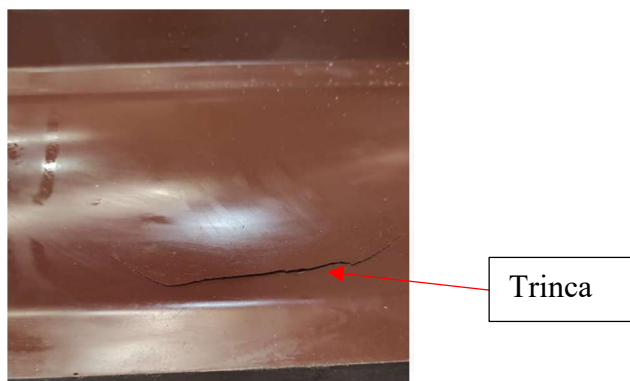
Amina alifática	$\text{NH}_2\text{R}'$
Amina cicloalifática	
Amina aromática	
Anidrido	

Fonte: HUNTSMAN, 2010, p. 6.

### 3. DESENVOLVIMENTO

De forma a sistematizar os estudos foram utilizados os itens definidos nos objetivos específicos como planejamento do mesmo. Outro fato importante a se relatar é que o problema ocorreu em um cliente de fornecimento normal da empresa. Na figura 10 encontra-se a trinca reclamada no corpo do equipamento.

Figura 10 – Trinca no corpo do equipamento



Fonte: Adaptado do registro de campo do fabricante

#### 3.1. Levantamento das faixas de temperatura especificadas x normas

## CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS

Foi especificado pelo cliente que a faixa ambiente de trabalho seria entre  $-5^{\circ}\text{C}$  e  $+40^{\circ}\text{C}$ . Na tabela 2 é possível verificar as especificações de diferentes categorias de temperatura. Nas respectivas normas informam que a faixa de temperatura garantida engloba armazenamento e transporte.

Quando do problema, um dos itens questionados ao cliente foi a respeito das condições da temperatura de instalação dos equipamentos. Voltando o mesmo a confirmar o que havia especificado.

**Tabela 2 – Limites de temperatura conforme normas dos equipamentos**

Norma/ano	Temperatura ambiente	Elev. de temp. e máx. temp.	Ambiente de aplicação
ABNT NBR 6855/2021 - 6856/2021	$-10^{\circ}\text{C}$ até $+40^{\circ}\text{C}$	Elev. $\leq +65^{\circ}\text{C}$ Máx. = $+105^{\circ}\text{C}$	Interno ou Externo
IEC 61869-1/2007	$-5^{\circ}\text{C}$ até $+40^{\circ}\text{C}$ $-25^{\circ}\text{C}$ até $+40^{\circ}\text{C}$ $-40^{\circ}\text{C}$ até $+40^{\circ}\text{C}$	Elev. $\leq +60^{\circ}\text{C}$ Máx. = $+100^{\circ}\text{C}$	O cliente deve especificar
IEEE C57.13/2016	$-5^{\circ}\text{C}$ até $+30^{\circ}\text{C}$	Elev. $\leq +80^{\circ}\text{C}$ Máx. = $+110^{\circ}\text{C}$	Interno
	$-30^{\circ}\text{C}$ até $+30^{\circ}\text{C}$		Externo

**Fonte:** Adaptado de:

Norma brasileira ABNT NBR 6855:2021, p.10 e 19;

Norma internacional IEC 61869-1:2007, página 16 e 24;

Norma americana IEEE C57.13:2016, página 13 e 19.

A definição “uso interno” indica que o equipamento deve ser instalado em local abrigado da radiação solar e de intemperismo (IEC 61869:2007 item 4.2.4 p. 16). Em relação às condições de temperatura de trabalho, estas foram definidas pelo cliente, com operação na faixa de temperatura compreendida entre  $-5^{\circ}\text{C}$  e  $+40^{\circ}\text{C}$ . Como informação adicional, essa mesma norma define que existem três categorias de classe de temperatura de operação, sendo:  $-5^{\circ}\text{C}$  a  $+40^{\circ}\text{C}$ ,  $-25^{\circ}\text{C}$  a  $+40^{\circ}\text{C}$  e  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+40^{\circ}\text{C}$  (IEC 60189-1:2007 tabela 1 p. 16.), incluindo sua nota que diz que as condições de transporte e armazenamento devem ser levadas em contas quando da definição da categoria escolhida.

## CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS

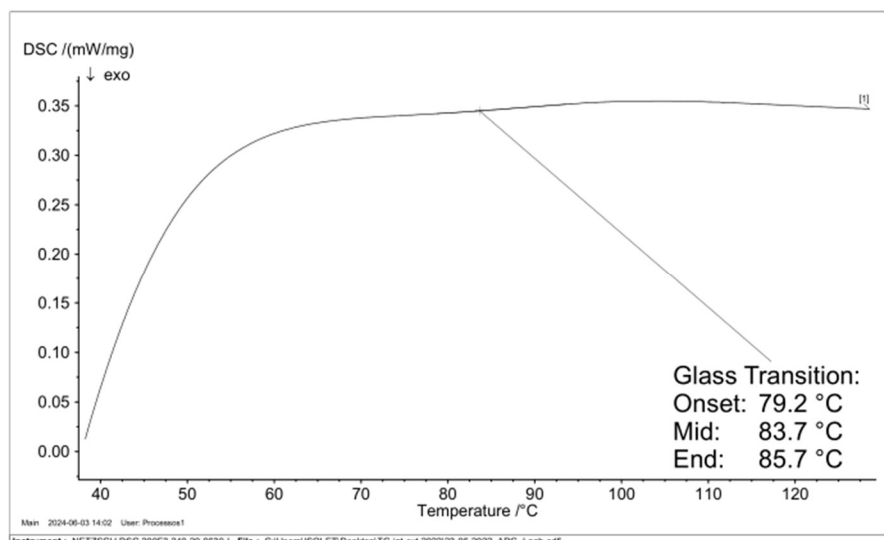
Estas diferentes faixas implicam em equipamentos com diferentes sistemas de resina epóxi ou mesmo diferentes sistemas de interface entre a resina epóxi e os diferentes metais que compõe a parte interna do equipamento ou, em casos mais extremos, a combinação de ambas as soluções.

Uma outra informação importante é que estes equipamentos, quando em trabalho, geram calor internamente e devem respeitar os limites máximos das matérias primas utilizadas, definidas por classes de limite de temperatura máxima que os mesmos podem trabalhar. Neste quesito, a resina epóxi utilizada é classificação F, ou seja pode suportar até 155°C em regime de trabalho, no entanto, dentro do equipamento existem componentes de classe A, por isto, mesmo a resina sendo de classe superior os equipamentos são classificado pelo material de menor classe de temperatura, neste caso, para classe de temperatura A. Esta classe indica que os equipamentos devem limitar a sua elevação de temperatura máxima em até 60°C (IEC 60189-1:2007, p. 24), o que significa em regime de trabalho e com uma temperatura ambiente máxima de 40°C poderão atingir até 100°C e continuar operando normalmente.

### 3.2. Verificação da DSC do lote

Nos registros de Tg, realizado por DSC, parâmetro de controle da matéria prima, constava que o lote em questão apresentava valor dentro dos limites especificados, ou seja possuir uma Tg entre 75°C a 85°C, conforme figura 11.

Figura 11– Curva de Tg ensaio inicial peças enviadas



## CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS

Fonte: ISOLET Indústria e Comércio Ltda

### 3.3. Verificação do projeto

Avaliando o projeto dos equipamentos verificou-se que os mesmos foram projetados para temperatura ambiente entre  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $+40^{\circ}\text{C}$ , com elevação permitida de até  $65^{\circ}\text{C}$ . Para tanto utilizou-se resina para uso interno, do tipo aromática e sistema de amortecimento em PVC. Tais dados foram fornecidos pelo setor de Engenharia da empresa, os quais cumprem com a especificação do cliente.

### 3.4. Verificação dos ensaios realizados nos equipamentos

Foram levantados os relatórios de rotina onde constam os ensaios que devem-se aplicar em 100% das peças fabricadas. Foram realizados os ensaios de tensão aplicada de 3kV no secundário, tensão induzida, tensão aplicada de 50kV, medição das descargas parciais, classe de exatidão e polaridade dos equipamentos. Segundo registros de fábrica, todos aprovados conforme norma IEC 61869-1:2007.

### 3.5. Decisão comercial

Após todas as verificações realizadas ficou definido em acordo com o departamento comercial o envio de novas peças ao cliente. Porém, a engenharia da empresa definiu que, além dos ensaios de rotina previstos em norma, devia-se realizar ensaio térmico nos equipamentos. Assim foi feito e os resultados encontram-se no capítulo relativo a ensaios e resultados deste artigo.

### 3.6. Nova reclamação

Após cerca de 6 meses após o envio houve nova reclamação do cliente com trincas nos equipamentos e com o mesmo sintoma das peças iniciais.

Em virtude desta nova reclamação reuniu-se os times de engenharia e qualidade da empresa para avaliação e tratativas para identificação da causa raiz, uma vez que o problema se repetiu, mesmo com todos os ensaios realizados.

### **3.7. Criação de lote protótipo para ensaios de rotina e especiais**

Como já haviam ações anteriores seguiu-se com os passos de 2.1 até 2.4 e novamente todos os dados indicaram estar corretos. Em virtude disto optou-se pela criação de protótipos de mesma característica, porém implementando-se ensaios com aplicações acima do especificado para análise de tendência para uma melhor exploração do caso.

### **3.8. Definição dos ensaios para estudo e análise**

Nesta etapa discutiu-se com as equipes e alinhou-se as baterias de ensaios em séries elétricas, mecânicas, térmicas e de Tg. Mesmo o cliente informando que não havia energizado as peças optou-se por realizar ensaios elétricos para uma investigação completa. Os procedimentos de ensaios e resultados e encontram-se nos respectivos capítulos.

## **4. Metodologia**

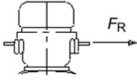
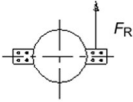
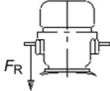
### **4.1. Ensaio mecânico**

Foi utilizado o procedimento de ensaios indicados no item 7.4.5 da norma IEC 61869-1, ensaios mecânicos, conforme figura 12. Esta figura indica como são aplicadas as forças para a avaliação da resposta do equipamento frente aos esforços previstos. Os valores são fornecidos pelo fabricante ou podem ser especificados pelo usuário e servem como referências aos esforços que os equipamentos estão aptos a suportar.

Fara este caso aplicou-se uma  $FR = 1200N$  (20% acima do especificado) nos terminais e avaliou-se o visual das peças em busca de fissuras ou trincas.

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS

Figura 12: Método de ensaio mecânico para transformador de corrente

Avec des bornes à traversée de courant	Horizontale à chaque borne	
		
	Verticale à chaque borne	
La charge d'essai doit être appliquée au centre de la borne.		

sem

Fonte: Norma IEC 61869:2016

## 4.2. Ensaios elétricos

Para os ensaios elétricos utilizou-se os itens onde se encontram os procedimentos especificados na norma IEC 61869-1:2016.

Sendo:

### 7.3.1 Power-frequency voltage withstand tests on primary terminals

Deve ser aplicado 50kV durante 1 minuto.

### 7.3.2 Partial discharge measurement

Aplicando 24kV, mede-se as descargas parciais e devem ser menor que 20pC.

### 7.3.4 Power-frequency voltage withstand tests on secondary terminals

Aplicado 3kV durante 1 minuto.

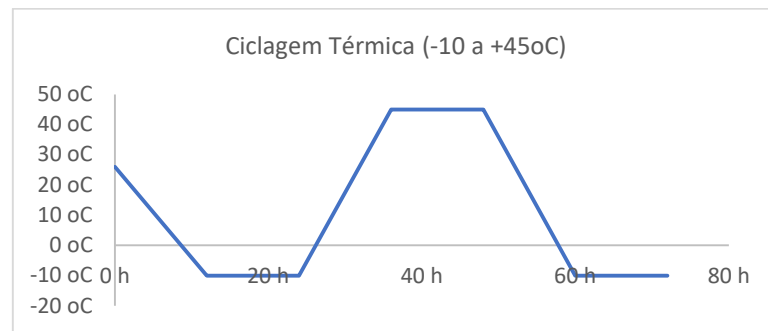
### 7.3.5 Test for accuracy

Ensaios de classe de medição e proteção.

### 4.3. Ensaio térmico – Ciclagem térmica

Para este ensaio foram colocadas as peças em freezer até atingir as temperaturas negativas especificadas, mantinha-se estabilizado por 12 horas e em seguida iniciou-se o ciclo para temperatura em estufas com temperaturas positivas. Ao se atingir a temperatura estipulada mantinha-se por 12 horas. Conforme figura 13.

**Figura 13:** Exemplo da curva de ciclagem térmica



Fonte: Adaptado da norma IEC 60660:1999

### 4.4. Ensaio de DSC

Ensaio realizado com a utilização de equipamento de DSC marca Netzsch usando como base a norma ISO 11357-1:2023.

O método utilizado foi pela comparação do valor médio da Tg das resinas utilizadas sendo: 75°C a 85° C para resina aromática, uso interior.

## 5. Resultados e Discussão

Analisando os resultados. Os itens a seguir demonstram os ensaios realizados e respectivos resultados do lote fabricado para compreensão dos motivos das falhas.

### 5.1. Ensaios mecânicos e elétricos sob temperatura ambiente

## CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS

Neste item reuniu-se os ensaios elétricos e mecânicos realizados em duas peças e avaliou-se os resultados buscando trincas, conforme tabela 3.

**Tabela 3 – Ensaio elétrico e mecânico em temperatura ambiente**

Temperatura de ensaio (ambiente)	TAFI (kV-1 mint)	Resultado	DP		Flexão em P0 (Mínimo 1.000N)	Resultado	Trincas?
			(pC)	Resultado			
+29°C	50	APROVADO	15kV < 5pC	APROVADO	1.220N	APROVADO	NÃO
+28°C	50	APROVADO	15,3kV <7pC	APROVADO	1.210N	APROVADO	NÃO

**Fonte:** Adaptado dos ensaios realizados pelo autor

Após os ensaios mecânicos aplicou-se novamente os ensaios elétricos. A peça se manteve estável e sem apresentar nenhum sinal de trincas. Indicando que seria pouco provável problemas mecânicos ou elétricos.

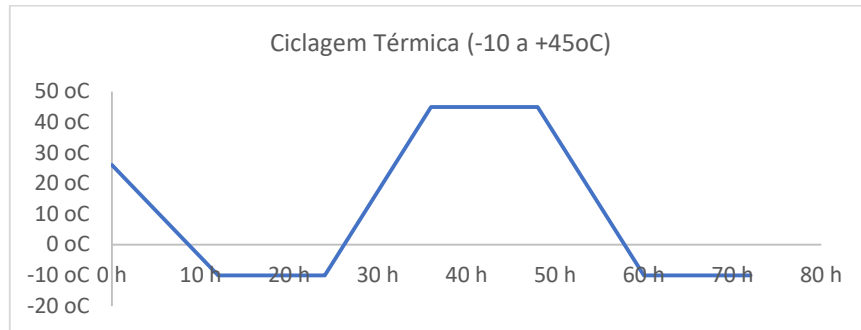
### 5.2. Ensaio de ciclagem térmica – Condições de projeto

Para a validação de projeto aplicou-se o ensaio de ciclagem térmica com choques térmicos nos limites de projeto para temperatura ambiente, ou seja, entre -10°C e +45°C. Não foram identificadas trincas nas peças. É importante salientar que os limites ambientes garantidos são para -5°C a +40°C e não menciona choque térmico, o que é mais crítico ao produto. Conforme figura 14.



CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS

Figura 14 – Ciclagem térmica – condição de projeto

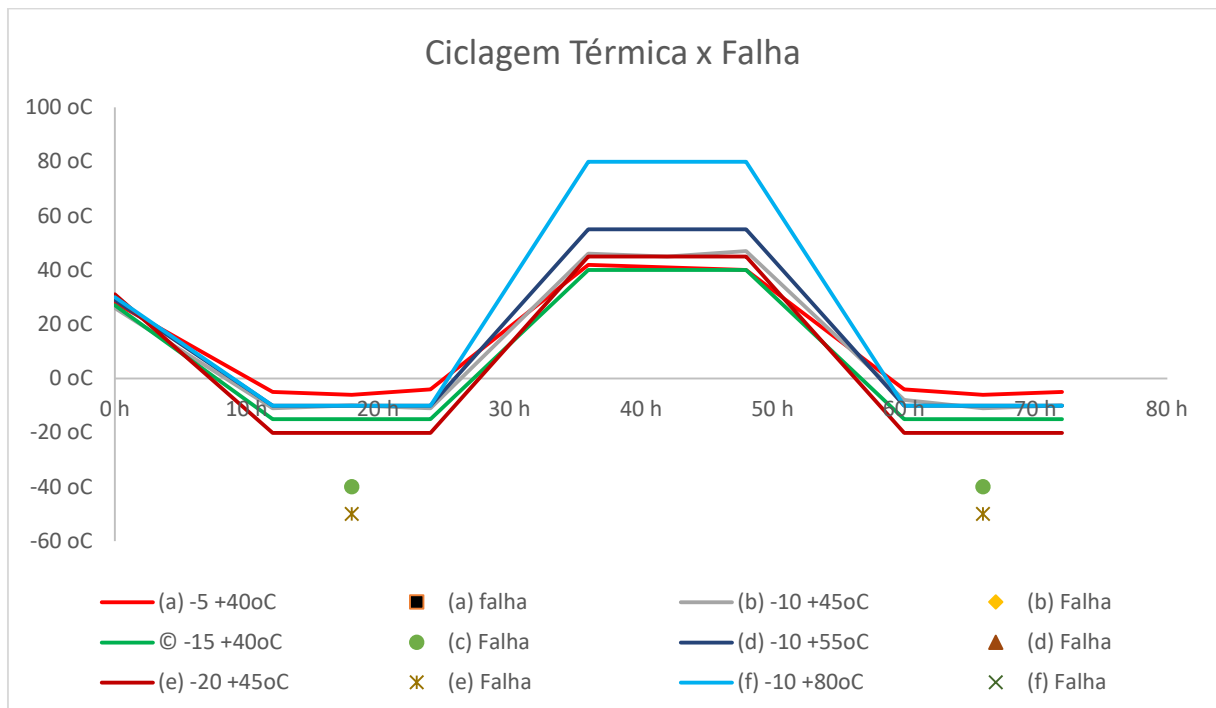


Fonte: Ensaio realizado na ISOLET Indústria e Comércio Ltda

5.3. Ensaios de ciclagem térmica – Condição extrema

Uma vez verificados os limites de projeto, realizou-se os ensaios extrapolando os mesmos. Inicialmente partiu-se da especificação do cliente e foram se alterando os valores para avaliar qual seria a tendência, conforme figura 15.

Figura 15 – Condições de instalação e limites garantidos



Fonte: Adaptado dos ensaios realizados pelo autor

## CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS

Os resultados da ciclagem mostram uma tendência de falhas para temperaturas mais negativas e a partir de -15°C. Fato que não ocorre quando se extrapola para o lado positivo da temperatura, realizado até 80°C. A tabela 4 traz este resumo.

**Tabela 4 – Ensaios extrapolando os limites**

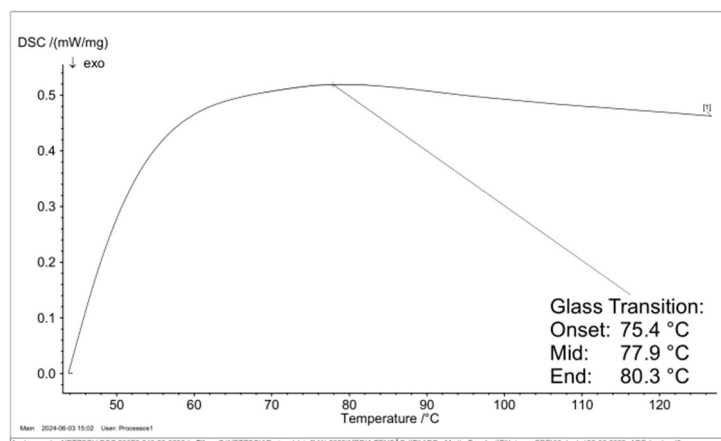
Ensaio	Peça	Temperatura	Trinca?	Temperatura	Trinca?
		por 24h		por 24h	
1º	1 e 2	-5°C	Não	+40°C	Não
2º	1 e 2	-10°C	Não	+45°C	Não
3º	1	-15°C	Sim	+40°C	Manteve
4º	2	-10°C	Não	+55°C	Não
5º	3	-10°C	Não	+80°C	Não
3º	3	-20°C	Sim	+45°C	Não

**Fonte:** Adaptando ensaio aos limites da norma IEC61869-1 / IEC60660

### 5.4. Ensaio de Tg – Lote de teste

Realizados ensaios de DSC/Tg e novamente a resposta foi encontrado uma Tg média de 77,9°C, cumprindo com especificação prevista entre 75°C e 85°C, conforme figura 16. Em relação a este ensaio, apesar de ter cumprido com o especificado pelo fabricante, possui formato diferente que pode estar relacionado a cura ou diferente taxa, porém atualmente não se faz esta análise. Este fato também chamou atenção para estudos futuros de melhor análise neste quesito.

**Figura 16 – Curva de Tg ensaio grupo de teste em fábrica – Resina aromática**



## CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS

**Fonte:** Ensaio realizado na ISOLET Indústria e Comércio Ltda

### **Discussões:**

Com as informações de validação de temperatura e tendência de falha em temperatura negativa realizou-se novo contato com o cliente e abriu-se uma linha de discussões sobre qual a possibilidade de uso do equipamento em temperaturas abaixo de menos 15°C. A devolutiva do mesmo foi que não haveria esta possibilidade, porém identificaram que para se chegar ao local de instalação passavam por regiões com -35°C em transporte e que por ventura poderiam ficar períodos nesta região, antes do local real de instalação, onde era um ambiente controlado.

Ao surgir esta informação alertou-se o cliente sobre os requisitos de norma, os quais incluem transporte e armazenamento. Após esta discussão o mesmo informou que agora entendia porque outros equipamentos eventualmente apresentavam problemas antes e durante a instalação.

### **6. Considerações Finais**

Foi possível verificar que a aplicação de um ensaio não foi suficiente para determinação do caminho da falha e sua respectiva falha e que o planejamento e a combinação de diferentes técnicas pode ser mais eficaz na solução de problemas complexos.

Ao final conseguiu-se responder as perguntas dos problemas listados no item 1.2, conforme a seguir:

- 1) Falta de conhecimento de normas e impacto de questões ambientais de transporte e armazenamento.
- 2) Na instalação não, no transporte sim.
- 3) Alto custo. Inviabilidade de mercado.
- 4) Em baixa temperatura.
- 5) Sim. Mas é preciso aumentar o conhecimento nesta técnica.

### **7. Agradecimentos**

Gostaria de agradecer aos professores pelo tempo e pelo conhecimento passado durante todo o período em que estive na FATEC em especial a minha orientadora Professora Dra Máira Rezende pela paciência e tempo dispendido.

## CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS

### 8. Referências

ABNT NBR 6856:2021 - **Transformador de corrente com isolamento sólida para tensão máxima igual ou inferior a 52 kV** — Especificação e ensaios

ABNT NBR 6855:2021 - **Transformador de potencial com isolamento sólida para tensão máxima igual ou inferior a 52 kV** — Especificação e ensaios

[Balderas, Edigar Alfredo, Hot-Spot Temperature Forecasting of the Instrument Transformer Using an Artificial Neural Network, IEEE Access 8:164392-164406, jan. 2020](#)

Disponível em :

[https://www.researchgate.net/figure/Geometric-detail-of-the-Dry-type-medium-voltage-instrument-transformer-for-indoor\\_fig3\\_346041580](https://www.researchgate.net/figure/Geometric-detail-of-the-Dry-type-medium-voltage-instrument-transformer-for-indoor_fig3_346041580)

Döring, Thiago Henrique - **Química Orgânica: Nomenclatura** – Classificação da cadeia carbônica

Disponível em :

[https://preufsc.blumenau.ufsc.br/files/2018/05/Qu%C3%ADmica-Org%C3%A2nica\\_-\\_Nomenclatura.pdf](https://preufsc.blumenau.ufsc.br/files/2018/05/Qu%C3%ADmica-Org%C3%A2nica_-_Nomenclatura.pdf) 02/05/2024

H.Lee and K.Neville, **Na Introduction to Epoxy Resins**. In Handbook of Epoxy Resins. New: McGraw-Hill (1967) cap. 1,1.

HUNTSMAN - **Advanced Materials Electrical Engineering** - Selector Guide, 2012

IEC 60660-1999 - **Insulators** - Tests on indoor post insulators of organic material for systems with nominal voltages greater than 1 000 V up to but not including 300 kV

IEC 61869-1:2007, **Instrument transformers** – Part 1: General requirements

IEEE Std C57.13:2016 – **Standard requirements for instrument transformers**

ISO 11357-1:2023(en) Plastics — **Differential scanning calorimetry (DSC) Part 1: General principles**

ISOLET – Catálogo – **Transformadores de Corrente e de Potencial para uso interno e uso externo** - 2023

Jad Energia - **Óleo Mineral vs. Óleo Vegetal: Qual é a Melhor Opção para Transformadores?** – Sustentabilidade e responsabilidade ambiental

Disponível em :

<https://jadenergia.com.br/oleo-mineral-vs-oleo-vegetal-qual-e-a-melhor-opcao-para-transformadores/> acesso em 10 mai. 2024

Marques e Silva, Ricardo – **Compósito à base de epóxi e poliuretana para desenvolvimento de moldes odontológicos**, p.9.



## CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM POLÍMEROS

Motta, Gutemberg - **Guia da Resina Epóxi - História da Resina Epóxi: Da Descoberta às Aplicações** – Descoberta inicial : Pierre Castan e o poliglicidiléter, 23 mai. 2023  
Disponível em :  
<https://guiadaresinaepoxi.com.br/historia-da-resina-epoxi/> acesso em 10 mai. 2024