

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS/MG**

**ENGENHARIA MECÂNICA**

**FERNANDO FERREIRA BAGETTI**

**IMPACTO DAS FALHAS NO ESMALTE ISOLANTE NA INTEGRIDADE DOS FIOS  
DE COBRE CLASSE 200 °C: uma análise das causas e efeitos**

**Varginha/MG**

**2025**

**FERNANDO FERREIRA BAGETTI**

**IMPACTO DAS FALHAS NO ESMALTE ISOLANTE NA INTEGRIDADE DOS FIOS  
DE COBRE CLASSE 200 °C: uma análise das causas e efeitos**

Trabalho de Conclusão de Curso II,  
apresentado ao curso de Engenharia Mecânica  
do Centro Universitário do Sul de Minas –  
Unis/MG como pré-requisito para obtenção do  
grau de bacharel, sob orientação da Prof.ª  
Doutor Luiz Carlos Vieira Guedes.

**Varginha/MG**

**2025**

**FERNANDO FERREIRA BAGETTI**

**IMPACTO DAS FALHAS NO ESMALTE ISOLANTE NA INTEGRIDADE DOS FIOS  
DE COBRE CLASSE 200 °C: uma análise das causas e efeitos**

Trabalho de Conclusão de Curso II  
apresentado ao curso de Engenharia Mecânica  
do Centro Universitário do Sul de Minas –  
Unis/MG, como pré-requisito para obtenção  
do grau de bacharel pela Banca Examinadora  
composta pelos membros:

Aprovado em     /     /

---

Prof.<sup>a</sup> Doutor Luiz Carlos Vieira Guedes

---

Membro da Banca Examinadora 1

---

Membro da Banca Examinadora 2

OBS.:

## RESUMO

Os fios de cobre esmaltados são componentes fundamentais em motores, transformadores e equipamentos elétricos, sendo o esmalte responsável por garantir isolamento elétrico e proteção mecânica ao condutor. Entretanto, falhas no esmalte isolante podem comprometer a confiabilidade do sistema, ocasionando perdas de desempenho, curtos-circuitos e falhas prematuras. Este trabalho tem como objetivo analisar os principais mecanismos de falhas no esmalte isolante aplicado em fios de cobre da Classe 200 °C, identificando suas causas e consequências sobre a integridade estrutural e funcional do condutor. A pesquisa contempla a revisão de normas e literatura técnica, bem como a análise experimental por meio de ensaios industriais de inspeção visual, aderência, flexibilidade, continuidade, propriedades dimensionais, mecânicas, elétricas e térmicas. Os resultados permitem compreender a relação entre falhas recorrentes e parâmetros de fabricação, fornecendo subsídios para melhorias no processo produtivo e para a prevenção de não conformidades em condutores Classe 200 °C.

**Palavras-chave:** Fio esmaltado, Esmalte isolante, Falhas, Ensaios, Classe 200 °C.

### ***ABSTRACT***

Enameled copper wires are fundamental components in motors, transformers, and electrical equipment. The enamel provides electrical insulation and mechanical protection for the conductor. However, failures in the insulating enamel can compromise system reliability, leading to performance losses, short circuits, and premature failures. This study aims to analyze the main failure mechanisms in the insulating enamel applied to Class 200°C copper wires, identifying their causes and consequences for the structural and functional integrity of the conductor. The research includes a review of standards and technical literature, as well as an experimental analysis through industrial tests of visual inspection, adhesion, flexibility, continuity, and dimensional, mechanical, electrical, and thermal properties. The results allow us to understand the relationship between recurring occurrences and manufacturing interruptions, providing insights for improvements in the production process and the prevention of nonconformities in Class 200°C conductors.

**Keywords:** Enameled wire, Insulating enamel, Failures, Tests, Class 200°C

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Imagem de fios esmaltados.

Figura 2 – Teste de alongamento.

Figura 3 – Teste de ângulo de recuo.

Figura 4 – Teste de aderência e flexibilidade.

Figura 5 – Teste de tensão disruptiva.

Figura 6 – Teste de continuidade.

Figura 7 – Teste de choque térmico.

## **LISTA DE TABELAS**

TABELA 01 - COMPARAÇÃO DAS CLASSES TÉRMICAS X TEMPERATURA X ESMALTE

TABELA 02 - PARÂMETROS DA MÁQUINA DURANTE A PRODUÇÃO DO FIO

TABELA 03 - RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS COMPARADOS COM A NORMA NEMA

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

*ANSI: American National Standards Institute (Instituto Nacional Americano de Padrões).*

*ASTM: American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana de Testes e Materiais).*

*DP: Descargas Parciais.*

*DSC: Calorimetria Exploratória Diferencial.*

*EDS: Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X.*

*FTIR: Espectroscopia por Infravermelho com Transformada de Fourier.*

*IEC: International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)..*

*MO: Microscopia Ótica.*

*NEMA: National Electrical Manufacturers Association (Associação Nacional de Fabricantes Elétricos).*

*PAI: Poliamida-imida.*

*PDIV: Tensão de Início de Descarga Parcial.*

*PEI: Poliéster-imida.*

*PI: Poliimida.*

*RCM: Microscopia Confocal de Reflectância.*

*SEM: Scanning Electron Microscopy (Microscopia Eletrônica de Varredura).*

*TGA: Análise Termogravimétrica.*

*UHF: Ultra High Frequency (Frequência Ultra Alta).*

*DPs: Descargas Localizadas Que Erodem O Material Isolante*

*SEM – Scanning Electron Microscopy (Microscopia Eletrônica de Varredura)*

*TGA – Thermogravimetric Analysis (Análise Termogravimétrica)*



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 Fios de Cobre Esmaltados: Características e Aplicações:.....	15
2.2 Esmalte Isolante: Composição e Propriedades.....	17
2.2.1 Resinas Termofixas.....	18
2.2.3 Solventes e Viscosidade de Aplicação.....	19
2.2.4 Catalisadores e Processo de Cura.....	19
2.3 Mecanismos de Falha no Esmalte Isolante.....	20
2.3.1 Fadiga Mecânica e Microfissuras.....	21
2.3.2 Baixa Aderência e Delaminação.....	21
2.3.3 Degradação Térmica e Cura Insuficiente.....	22
2.3.4 Falhas Elétricas e Descargas Parciais.....	22
2.4 Métodos de Detecção e Análise de Falhas em Esmaltes Isolantes.....	23
2.4.1 Inspeção Visual.....	24
2.4.2 Aderência e Flexibilidade.....	24
2.4.3 Continuidade / Pin Hole.....	24
2.4.4 Dimensões e Ovalização.....	25
2.4.5 Propriedades Mecânicas.....	25
2.4.6 Propriedades Elétricas.....	25
2.4.7 Ensaios Térmicos.....	25
2.4.8 Tangente Delta.....	26
2.5 Estratégias para Mitigação e Prevenção de Falhas no Esmalte Isolante.....	26
2.5.1 Controle de Processo e Parâmetros Operacionais.....	26
2.5.2 Inspeção Visual e Ensaios de Rotina.....	27
2.5.3 Manutenção Preventiva e Condição dos Equipamentos.....	27
2.5.4 Armazenamento e Manipulação do Esmalte.....	28
2.5.5 Capacitação Técnica e Melhoria Contínua.....	28
3. METODOLOGIA.....	29
3.1 Objeto de estudo.....	29
3.2 Avaliação das Condições Operacionais do Processo de Esmaltação.....	30
3.3 Ensaios Experimentais e Análise dos Resultados.....	32
3.3.1 Ensaios dimensionais (diâmetro de condutor, externo e acréscimo).....	33
3.3.2 Ensaios Mecânicos (Alongamento e Ângulo de Recuo).....	35
3.3.2.1 Ensaio de Alongamento à Ruptura.....	35
3.3.2.2 Ensaio de Ângulo de Recuo.....	36
3.3.3 Ensaio de Aderência e Flexibilidade.....	37
3.3.4 Ensaio de Resistência à Abrasão.....	38
3.3.5 Ensaio de Tensão Disruptiva (Rigidez Dielétrica).....	39

3.3.6 Ensaio de Continuidade (Pinhole Test).....	41
3.3.7 Ensaio de Choque Térmico.....	42
3.3.8 Ensaio de Resistência Elétrica do Condutor.....	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
5 CONCLUSÕES.....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

## 1 INTRODUÇÃO

Os fios de cobre esmaltados desempenham papel essencial em equipamentos elétricos e eletrônicos, como motores, transformadores e solenoides. O revestimento de esmalte isolante aplicado sobre o condutor garante o isolamento elétrico entre espiras adjacentes, possibilitando a construção de bobinagens compactas e eficientes. Além disso, o esmalte oferece proteção mecânica e química ao cobre, sendo determinante para a confiabilidade e a vida útil dos dispositivos em que é empregado.

Entretanto, o processo de fabricação e a utilização dos fios podem ocasionar falhas no esmalte isolante. Defeitos como microfissuras, porosidade, baixa aderência e descontinuidades comprometem a capacidade de isolamento, podendo gerar perdas de eficiência, sobreaquecimento, curtos-circuitos e falhas prematuras em sistemas elétricos. Esses problemas resultam em não conformidades, aumento de custos com retrabalho e refugo de materiais, além de prejudicar a produtividade e a qualidade do produto final.

Nesse cenário, torna-se necessário investigar de forma detalhada as causas dessas falhas e os fatores que afetam a integridade do esmalte isolante, em especial na Classe 200 °C, que exige maior estabilidade térmica e elétrica devido às condições severas de operação. A compreensão da relação entre a formulação do esmalte, os parâmetros de aplicação e cura e as características dos defeitos observados é essencial para estabelecer estratégias de mitigação e prevenção.

Com base nisso, este trabalho busca responder à seguinte questão: de que forma as falhas na formulação e aplicação do esmalte isolante afetam a integridade e a durabilidade dos fios de cobre Classe 200 °C, e quais parâmetros críticos podem ser otimizados para mitigar esses problemas?

O objetivo geral consiste em investigar como as falhas na formulação e aplicação do esmalte afetam a integridade das estruturas dos fios Classe 200 °C, identificando os fatores que contribuem para a ocorrência dessas falhas e propondo possíveis melhorias no processo.

Como objetivos específicos, destacam-se: identificar os principais fatores das falhas dos esmaltes na produção dos fios; relacionar os padrões de falhas com dados de desempenho

elétrico e mecânico dos fios de cobre com base em laudos e relatórios técnicos; e comparar os resultados obtidos com normas técnicas aplicáveis ao processo.

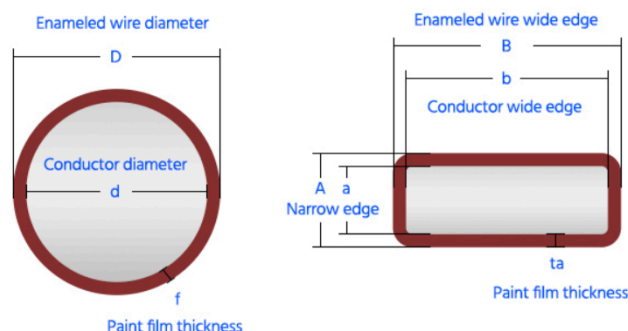
A relevância deste estudo está no fato de que a qualidade do esmalte isolante é determinante para o desempenho e confiabilidade dos condutores elétricos. Mesmo em processos produtivos bem estruturados, falhas recorrentes podem comprometer a funcionalidade do fio, ocasionando perdas produtivas e aumento de não conformidades. Assim, a análise proposta neste trabalho busca oferecer subsídios para a otimização dos parâmetros de fabricação e aplicação do esmalte em fios Classe 200 °C, contribuindo para a melhoria da qualidade do produto final e para a confiabilidade do processo industrial.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Fios de Cobre Esmaltados: Características e Aplicações:**

Os fios de cobre esmaltados, também chamados de magnet wire, são condutores de cobre revestidos por uma fina camada de verniz isolante que permite o enrolamento compacto de espiras em motores, transformadores e bobinas de precisão, sem risco de curto-circuito interno (Paulsson et al., 2021), segundo a NEMA (AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE; NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION, 2018), são insumos críticos para converter energia elétrica em campos magnéticos em motores e transformadores. A alta condutividade elétrica do cobre, combinada à capacidade do esmalte em suportar elevados gradientes de tensão, assegura eficiência energética e confiabilidade em ambientes industriais (Hoekstra, 1938).

FIGURA 1- IMAGEM DE FIOS ESMALTADOS.



FONTE: <https://www.aluminum-magnet-wire.com/pt/blog/coating-thickness-measurement>

Do ponto de vista mecânico, o revestimento de verniz previne danos por abrasão, flexão e atrito durante a montagem e operação dos enrolamentos, mantendo a integridade do isolamento mesmo após ciclos repetidos de vibração e esforços (Chandra & Murthy, 2019). Em relação ao desempenho térmico, as classes de isolamento B, F e H definem as temperaturas de operação contínua, garantindo que o verniz mantenha suas propriedades isolantes em condições de alta temperatura e variações térmicas frequentes (ASTM D1676, 2017).

As principais aplicações dos fios de cobre esmaltados incluem motores elétricos, onde a densidade de espiras influenciam diretamente o torque e a eficiência volumétrica; transformadores de distribuição e potência, nos quais o isolamento fino reduz perdas por correntes parasitas; e componentes de eletrônica de potência e telecomunicações, que exigem baixa perda dielétrica em altas frequências (IEC 60851-5, 2008). Setores como o automotivo e o aeroespacial também utilizam esses fios em sistemas críticos de ignição, atuadores e geradores, onde a resistência a vibrações e temperaturas extremas é essencial (Remington Industries, 2023).

Neste trabalho, o foco é direcionado exclusivamente para a Classe 200 °C, também conhecida como Classe H. Essa classe se caracteriza por utilizar sistemas isolantes de elevada estabilidade térmica, geralmente à base de poliéster-imida ou poliamida-imida, capazes de suportar temperaturas de operação contínua de até 200 °C.

A escolha da Classe 200 °C se justifica pela sua ampla aplicação em motores elétricos, transformadores e equipamentos que operam em condições severas de aquecimento, onde é

necessária alta confiabilidade do isolamento. Além disso, a Classe 200 °C representa um dos segmentos mais utilizados na indústria atual, equilibrando desempenho térmico e custo de fabricação.

## **2.2 Esmalte Isolante: Composição e Propriedades**

O esmalte isolante constitui o elemento essencial do sistema dielétrico dos fios de cobre esmaltados, responsável por garantir o isolamento elétrico entre as espiras e proteger o condutor contra agentes mecânicos, térmicos e químicos. Trata-se de um revestimento polimérico termofixo, aplicado em múltiplas camadas finas sobre o cobre nu, que forma um filme contínuo, homogêneo e aderente após o processo de cura térmica. Durante essa etapa, ocorre a reticulação das cadeias poliméricas, resultando em um filme sólido com propriedades dielétricas e mecânicas estáveis (PAULSSON et al., 2021).

Segundo a NEMA MW 1000 (2018) e a IEC 60317 (2019), o esmalte deve atender a requisitos mínimos de aderência, flexibilidade, resistência à abrasão e rigidez dielétrica, garantindo desempenho seguro sob tensões elétricas elevadas e temperaturas de operação contínua acima de 180 °C. Assim, a formulação e o processo de aplicação devem assegurar equilíbrio entre resistência térmica e mecânica, sem comprometer a integridade do isolamento.

O desempenho final do esmalte não depende apenas da formulação química, mas principalmente da estrutura física obtida após a cura. A formação de uma rede polimérica bem reticulada é fundamental para a coesão entre camadas e a adesão ao cobre. Quando a cura é incompleta, a rede se torna amorfa, reduzindo a resistência mecânica e aumentando a suscetibilidade à delaminação e fissuração (AWAJA et al., 2016).

Nos fios da Classe 200 °C, utilizados neste estudo, os sistemas de esmalte são baseados em poliéster-imida (PEI) e poliamida-imida (PAI). Essa combinação confere ao fio excelente resistência térmica, estabilidade química e alto desempenho dielétrico (MA et al., 2024). O PEI, utilizado como camada base, apresenta boa processabilidade e aderência inicial, enquanto o PAI, aplicado como sobrecamada, melhora a resistência térmica e química do sistema. Conforme ELANTAS (2023), essa estrutura dupla permite operação contínua até 200

°C sem perda significativa de propriedades elétricas, atendendo às normas IEC 60085 e NEMA MW 1000.

A seguir, são descritos os principais componentes da formulação do esmalte, destacando suas funções e influência nas propriedades finais do isolamento.

### **2.2.1 Resinas Termofixas**

As resinas termofixas representam o componente estrutural do esmalte, determinando sua resistência térmica, mecânica e elétrica. Durante a cura térmica, essas resinas sofrem reações de polimerização e condensação, formando uma rede tridimensional estável e irreversível. As resinas poliéster-imida (PEI) e poliamida-imida (PAI) são amplamente utilizadas em fios da Classe 200 °C, pois oferecem alta estabilidade térmica e excelente rigidez dielétrica (PAULSSON et al., 2021).

De acordo com Gornicka e Gorecki (2010), a presença de grupos amídicos e imídicos na estrutura polimérica favorece a interação química com a superfície do cobre, melhorando a adesão e reduzindo o risco de delaminação. Já Ma et al. (2024) observam que a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) das resinas PEI e PAI varia entre 180 °C e 240 °C, o que as torna adequadas para aplicações em motores e transformadores de alta densidade térmica.

### **2.2.3 Solventes e Viscosidade de Aplicação**

Os solventes determinam a viscosidade do esmalte líquido e influenciam diretamente a uniformidade de aplicação. Solventes como tolueno, xileno e metiletilcetona são comumente utilizados para ajustar a reologia da mistura (HÖPNER, 2021). Durante a cura, a evaporação controlada desses solventes é essencial: taxas muito rápidas causam porosidade e bolhas, enquanto evaporação insuficiente retém solventes, reduzindo a aderência e a rigidez dielétrica (VAKULENKO, 2021).

De acordo com a NEMA MW 1000 (2018), a viscosidade deve permanecer entre 30 e 60.000 mPa·s, garantindo espessura homogênea e ausência de pinholes. O controle desse parâmetro é uma das variáveis mais críticas para o desempenho do isolamento.

## 2.2.4 Catalisadores e Processo de Cura

A cura térmica é a etapa que define as propriedades finais do esmalte, e depende da eficiência dos catalisadores utilizados. Sais metálicos, como estanho, zinco e titânio, ou aminas terciárias, são responsáveis por acelerar as reações de reticulação (ALTANA, 2012).

A faixa ideal de cura para esmaltes PEI/PAI situa-se entre 430 °C e 470 °C, com tempo de residência médio de 30 a 40 segundos (ELANTAS, 2023). Desvios superiores a  $\pm 5$  °C ou  $\pm 5$  s podem gerar uma “sub cura” (rede incompleta) ou “supercura” (degradação oxidativa), comprometendo aderência e resistência mecânica (STONE; CULBERT; BOULTER, 2014).

A correta calibração do perfil térmico do forno e o monitoramento contínuo da velocidade de linha são fatores determinantes para o sucesso da cura e a longevidade do isolamento.

TABELA 01 - COMPARAÇÃO DAS CLASSES TÉRMICAS X TEMPERATURA X ESMALTE

Classe Térmica (NEMA/IEC)	Temperatura Máxima de Operação Contínua (°C)	Materiais de Esmalte Típicos Associados
A / 105	105	Polivinil acetal (Formvar), Poliuretano, Papel, Poliimida (Nylon)
B / 130	130	Poliéster, Poliuretano (alguns tipos)
F / 155	155	Poliéster modificado, Poliuretano (alta temperatura), Fibra de vidro, Poliéster-vidro
H / 180	180	Poliéster-imida, Poliamida-imida (sobrecamada), Poliuretano (alta temperatura), Poliéster (soldável)
200	200	Poliéster (não soldável), Poliamida-imida
R (M) / 220	220	Poliamida-imida, Poliéster-amida-imida
C / 240 (ou >220)	240+	Poli-imida (ML), Poli-imida modificada

FONTE: INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60085: Electrical insulation



A interação entre os componentes do esmalte e os parâmetros de processo de cura determina diretamente o comportamento do isolamento em serviço. Variações na viscosidade, na proporção de aditivos ou na temperatura de cura podem gerar defeitos como microfissuras, delaminação ou porosidade, que reduzem a rigidez dielétrica e a vida útil do fio. A seção seguinte aborda, de forma detalhada, os mecanismos de falha que resultam desses desvios, correlacionando-os aos ensaios normativos aplicáveis ao diagnóstico de desempenho dos esmaltes isolantes.

## **2.3 Mecanismos de Falha no Esmalte Isolante**

A confiabilidade dos fios esmaltados depende da integridade contínua do revestimento polimérico que isola o condutor. Quando esse filme sofre degradação — seja por esforço mecânico, térmico ou elétrico —, surgem falhas que comprometem o desempenho do fio e podem levar à ruptura dielétrica total do sistema. De acordo com Awaja et al. (2016) e Paulsson et al. (2021), os mecanismos de falha em esmaltes isolantes derivam principalmente da interação entre tensões mecânicas repetitivas, exposição térmica prolongada e envelhecimento químico da resina.

Esses mecanismos podem ser classificados em quatro categorias principais: fadiga mecânica e microfissuras, baixa aderência e delaminação, degradação térmica e cura insuficiente, e falhas elétricas associadas a descargas parciais. Na seção seguinte, cada fenômeno é discutido de forma detalhada, relacionando seu comportamento com as propriedades do esmalte e com os ensaios de avaliação previstos nas normas ANSI/NEMA MW 1000 (2018) e IEC 60851 (2019).

### **2.3.1 Fadiga Mecânica e Microfissuras**

Os fios esmaltados são submetidos a constantes solicitações de flexão, tração e vibração tanto durante o processo de bobinamento quanto durante a operação do equipamento elétrico. Sob esforços repetitivos, a camada de esmalte pode sofrer fadiga mecânica, resultando na formação de microfissuras superficiais (DEMIRI, 2014). Essas trincas

funcionam como pontos concentradores de tensão elétrica, facilitando o surgimento de descargas parciais e o ingresso de umidade e contaminantes químicos.

De acordo com Newman Jr., Phillips e Everett Jr. (1993), a presença de microfissuras reduz a resistência dielétrica local e acelera o envelhecimento térmico da resina, levando à erosão progressiva do filme. Tais falhas são facilmente detectáveis em ensaios de flexibilidade em mandril e choque térmico, nos quais o esmalte é submetido a deformações cíclicas ou variações bruscas de temperatura, simulando as condições reais de operação.

### **2.3.2 Baixa Aderência e Delaminação**

A aderência entre o esmalte e o cobre é um dos fatores mais críticos para a durabilidade do isolamento. Uma interface mal formada — devido à subcura, contaminação superficial do condutor ou degradação da resina — pode resultar em delaminação das camadas sob esforço mecânico (ESSEX GROUP INC., 2020).

Estudos realizados por Gornicka e Gorecki (2010) demonstram que a difusão de íons de cobre na matriz polimérica e a formação de óxidos na interface são fatores determinantes para a perda de adesão. Essa falha se manifesta nos ensaios de torção e aderência com fita, previstos na NEMA MW 1000 (Seção 7.3), que avaliam a resistência do esmalte ao destacamento após deformação controlada.

A perda de aderência compromete também a resistência à abrasão, uma vez que a coesão entre camadas depende da ancoragem inicial ao condutor. Segundo De Mele et al. (2023), esse tipo de falha tende a se agravar com o tempo, especialmente quando há exposição cíclica a variações térmicas, levando à propagação da delaminação ao longo do fio.

### **2.3.3 Degradação Térmica e Cura Insuficiente**

O envelhecimento térmico é um dos principais fatores limitantes para a vida útil dos fios da Classe 200 °C. Durante o processo de cura, desvios de temperatura ou tempo podem gerar subcura, caracterizada pela formação de uma rede polimérica incompleta, ou supercura, em que ocorre degradação oxidativa da resina (MA et al., 2024).

Segundo Aymonino et al. (2022), a taxa de degradação térmica segue uma relação exponencial com a temperatura, conforme o modelo de Arrhenius, sendo intensificada pela oxidação da superfície do cobre. Essa degradação altera a composição química do esmalte, reduzindo a resistência mecânica e a rigidez dielétrica do filme.

Ensaio de choque térmico, rigidez dielétrica e resistência à abrasão são particularmente sensíveis a essa condição, pois evidenciam trincas, bolhas e perda de coesão superficial. Conforme Stone, Culbert e Boulter (2014), a estabilidade do isolamento depende diretamente do controle do perfil térmico de cura e da uniformidade da aplicação em todas as passagens.

### **2.3.4 Falhas Elétricas e Descargas Parciais**

As falhas elétricas ocorrem quando o campo elétrico excede a rigidez dielétrica do esmalte, provocando ionização localizada e erosão do material. Essas descargas parciais (DPs) degradam progressivamente o isolamento, abrindo microcanais condutores que levam à ruptura dielétrica completa (IEEE DEIS, 2024).

A incorporação de nanopartículas e modificadores de superfície tem sido estudada para aumentar a resistência às DPs (KATO et al., 2003; LEE et al., 2008), porém, na prática industrial, o controle mais eficaz é a homogeneidade do filme e a ausência de defeitos de aplicação.

De acordo com Boggs et al. (2020), o monitoramento de DPs é essencial em fios de alta tensão e motores compactos, onde o gradiente elétrico é elevado. A presença de trincas, bolhas ou regiões subcuradas atua como gatilho para o início dessas descargas, reforçando a importância do controle de processo durante a esmaltação.

Os mecanismos de falha descritos mecânicos, térmicos e elétricos estão intimamente ligados às propriedades do esmalte e ao modo como ele é aplicado e curado. A observação de sintomas como fissuração, delaminação, desgaste precoce ou perda de rigidez dielétrica permite inferir a origem das falhas mesmo sem acesso direto à formulação do verniz. Assim, a análise de desempenho em ensaios padronizados constitui uma ferramenta robusta para o diagnóstico industrial de não conformidades em fios esmaltados de Classe 200 °C.

## **2.4 Métodos de Detecção e Análise de Falhas em Esmaltes Isolantes**

A confiabilidade dos fios de cobre esmaltados depende diretamente da integridade do revestimento isolante. O esmalte atua como barreira elétrica e mecânica entre as espiras, e falhas em sua aplicação podem comprometer o desempenho do fio e reduzir a vida útil do equipamento em que é empregado. Para identificar essas falhas, diferentes métodos de detecção e ensaios laboratoriais são utilizados, avaliando propriedades visuais, mecânicas, elétricas e térmicas do condutor (NEMA, 2021).

Os métodos de análise aplicados permitem verificar desde defeitos superficiais como trincas e irregularidades visíveis, até propriedades elétricas mais complexas, como perdas dielétricas. Dessa forma, é possível relacionar os resultados obtidos em ensaios com as causas mais prováveis das falhas observadas, fornecendo subsídios para a melhoria do processo de fabricação e para a prevenção de não conformidades (ELANTAS, 2023).

Na Classe 200 °C, utilizada neste estudo, os requisitos de desempenho são ainda mais rigorosos, exigindo que o esmalte mantenha aderência, resistência térmica e estabilidade dielétrica em condições de elevada temperatura de operação. Assim, os ensaios descritos a seguir constituem ferramentas fundamentais para a análise da qualidade do esmalte e para a detecção precoce de falhas que possam comprometer a confiabilidade do fio (BAEWIRE, 2024).

### **2.4.1 Inspeção Visual**

A inspeção visual é o primeiro ensaio realizado em fios esmaltados e tem como finalidade identificar defeitos superficiais, como trincas, bolhas, descascamentos ou irregularidades que comprometam a camada isolante. Esses defeitos podem atuar como pontos de falha elétrica ou mecânica, reduzindo a confiabilidade do condutor (ELANTAS, 2023).

### **2.4.2 Aderência e Flexibilidade**

O ensaio de aderência e flexibilidade avalia a capacidade do esmalte de permanecer aderido ao condutor mesmo sob esforços mecânicos, como dobra ou torção. Esse teste é fundamental para garantir que, durante a bobinagem e operação, o isolamento não se desprenda, o que poderia ocasionar falhas elétricas. A norma NEMA especifica este ensaio como requisito de desempenho para fios Classe 200 °C (NEMA, 2021).

#### **2.4.3 Continuidade / Pin Hole**

O ensaio de pinhole verifica a presença de descontinuidades microscópicas no esmalte, que podem expor o condutor e comprometer o isolamento elétrico. A presença de falhas aumenta a probabilidade de descargas elétricas localizadas e falhas dielétricas em operação (ITEN, 2022).

#### **2.4.4 Dimensões e Ovalização**

Os diâmetros do condutor e do fio esmaltado são parâmetros essenciais para garantir compatibilidade com bobinas e equipamentos. A ovalização avalia a uniformidade geométrica da seção transversal, sendo indicativo da qualidade do processo de aplicação do esmalte. Valores fora da tolerância dificultam o enrolamento e podem comprometer a integridade do isolamento (CONDU PASQUA, 2021).

#### **2.4.5 Propriedades Mecânicas**

O alongamento à ruptura mede a ductilidade do condutor, indicando a capacidade do fio de suportar esforços mecânicos antes de romper. Já o ângulo de recuo avalia a elasticidade do fio após deformação, sendo um parâmetro importante em aplicações sujeitas a vibração. Esses ensaios asseguram que o fio mantenha suas propriedades em condições de uso industrial (MWS WIRE, 2024).

#### **2.4.6 Propriedades Elétricas**

A resistência elétrica determina as perdas por efeito Joule durante a passagem de corrente. Valores fora da faixa podem causar aquecimento excessivo e perda de eficiência. Já a rigidez dielétrica avalia a capacidade do esmalte de resistir a tensões elétricas elevadas sem falhas. Ambos os ensaios são fundamentais para fios Classe 200 °C, garantindo operação segura e durável (BAEWIRE, 2024).

#### **2.4.7 Ensaios Térmicos**

O choque térmico simula ciclos bruscos de temperatura para avaliar a resistência do esmalte a trincas e desprendimento. A termoplasticidade brusca mede o ponto em que o esmalte perde estabilidade mecânica sob calor elevado, parâmetro essencial para fios de classe térmica superior (NEMA, 2021).

#### **2.4.8 Tangente Delta**

O ensaio de tangente delta avalia as perdas dielétricas do isolamento quando submetido a campo elétrico alternado. Um aumento no valor de  $\tan \delta$  é indicativo de envelhecimento do material ou de defeitos na aplicação do esmalte. Esse parâmetro é usado para prever a vida útil do fio e diagnosticar falhas precoces (BAUR, 2023).

### **2.5 Estratégias para Mitigação e Prevenção de Falhas no Esmalte Isolante**

A mitigação e a prevenção de falhas em fios de cobre esmaltados dependem de uma abordagem integrada que envolva controle rigoroso de processo, aplicação de normas técnicas e monitoramento sistemático das propriedades do esmalte. Conforme ressaltam Stone, Culbert e Boulter (2014), a confiabilidade do isolamento elétrico não está apenas associada à formulação do verniz, mas também à estabilidade dos parâmetros operacionais e à consistência do processo de aplicação e cura.

De acordo com NEMA MW 1000 (2018) e IEC 60851 (2019), o desempenho do fio esmaltado deve ser assegurado por meio de ensaios periódicos de aderência, flexibilidade,

abrasão, choque térmico, rigidez dielétrica e continuidade, executados com base em planos de amostragem que permitam a detecção precoce de desvios. Essa prática garante a rastreabilidade dos resultados e possibilita a adoção imediata de ações corretivas.

A seguir, são apresentadas as principais estratégias de mitigação e prevenção aplicáveis em ambientes industriais de produção de fios esmaltados.

### **2.5.1 Controle de Processo e Parâmetros Operacionais**

O controle de processo é a primeira linha de defesa contra falhas no esmalte. Envolve o monitoramento contínuo da viscosidade do verniz, da temperatura das zonas de cura e da velocidade da linha de produção. Pequenas variações nesses parâmetros podem resultar em espessuras irregulares, cura insuficiente e perda de aderência entre camadas.

Segundo Elantas (2023), a estabilidade da viscosidade entre 30 e 60 000 mPa·s é essencial para garantir deposição uniforme. A calibração periódica dos sensores de temperatura e o ajuste fino do perfil térmico de forno asseguram que o tempo de residência do fio seja suficiente para promover a reticulação completa da resina, evitando subcura.

Além disso, o acompanhamento estatístico das variáveis por meio de cartas de controle de processo (CEP) é recomendado, conforme práticas de Six Sigma e ISO 9001, permitindo identificar tendências antes que ocorram falhas visíveis (CRESWELL; CLARK, 2013).

### **2.5.2 Inspeção Visual e Ensaio de Rotina**

A realização de inspeções visuais e ensaios de rotina em linha é indispensável para avaliar a continuidade do filme e a uniformidade da camada. Esses rápidos, como pinholes, aderência e flexibilidade, fornecem indicadores imediatos da qualidade do esmalte.

Conforme IEC 60851-5 (2019), essas verificações devem ser realizadas por lote de produção, registrando-se os resultados em relatórios de autocontrole. A correlação entre ensaios mecânicos e elétricos é uma ferramenta eficaz para identificar padrões de falha

recorrentes, como perda de aderência combinada à baixa rigidez dielétrica, o que normalmente indica problemas de cura ou envelhecimento do esmalte (AWAJA et al., 2016).

A aplicação de rotinas de verificação cruzada entre operadores de processo e laboratório de qualidade reduz erros de medição e melhora a rastreabilidade das causas de não conformidade. Essa integração operacional é destacada por Fabiani et al. (2010) como essencial para o controle da variabilidade em processos de esmaltação industrial.

### **2.5.3 Manutenção Preventiva e Condição dos Equipamentos**

A condição dos equipamentos de aplicação de esmalte, em especial das feiras, anéis de aplicação e fornos de cura, influencia diretamente na uniformidade do revestimento. Feiras desgastadas ou desalinhadas podem provocar espessura irregular e formação de bolhas, comprometendo a resistência mecânica do filme.

De acordo com a NASA (2001), a manutenção preditiva e a inspeção periódica de superfícies de aplicação são medidas eficazes para evitar falhas recorrentes. A limpeza adequada do sistema de alimentação de esmalte e a substituição programada de componentes reduzem a contaminação e mantêm a estabilidade da deposição.

A verificação de homogeneidade térmica nas zonas de forno, por meio de termopares distribuídos, é igualmente relevante, garantindo que a temperatura de cura se mantenha dentro da faixa especificada (430–470 °C).

### **2.5.4 Armazenamento e Manipulação do Esmalte**

O desempenho do esmalte também depende de condições adequadas de armazenamento. A exposição a umidade, temperatura elevada ou luz ultravioleta pode provocar pré-reação ou separação de fases na resina, alterando a viscosidade e reduzindo a vida útil do produto.

Segundo Elantas (2023), os esmaltes devem ser mantidos entre 15 °C e 25 °C, protegidos de fontes de calor e luz direta, e utilizados dentro do prazo de validade indicado



pelo fabricante. A homogeneização antes da aplicação é obrigatória para garantir a distribuição uniforme dos componentes ativos.

A rastreabilidade dos lotes utilizados deve ser documentada, permitindo identificar eventuais desvios entre fornecimentos. Essa prática é essencial para correlacionar anomalias de desempenho com possíveis alterações no material.

### **2.5.5 Capacitação Técnica e Melhoria Contínua**

A capacitação da equipe técnica desempenha papel decisivo na prevenção de falhas. Operadores e técnicos de qualidade devem ser treinados para identificar sintomas precoces de não conformidade, como variação de brilho, espessura ou textura superficial do fio.

Conforme ISO 9001:2015, a competência e conscientização dos colaboradores estão diretamente ligadas à eficácia do sistema de gestão da qualidade. Além disso, a análise de falhas deve ser tratada sob a óptica da melhoria contínua (PDCA), promovendo a retroalimentação dos resultados dos ensaios ao setor de engenharia de processo para ajustes em tempo real.

O uso de ferramentas como FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) e diagrama de Ishikawa é recomendado para identificar causas raiz e priorizar ações corretivas (STONE; CULBERT; BOULTER, 2014). Essa abordagem permite reduzir a reincidência de falhas e fortalecer o controle da qualidade do esmalte aplicado.

A prevenção de falhas em fios esmaltados da Classe 200 °C exige uma combinação de controle rigoroso de processo, inspeção sistemática, manutenção preventiva e capacitação técnica. Mesmo quando o acesso à área de formulação é limitado, o controle das variáveis operacionais e a análise de desempenho por ensaios normativos são suficientes para garantir a conformidade do produto. A integração entre processo, qualidade e engenharia permite identificar desvios de forma precoce, reduzir desperdícios e assegurar a confiabilidade do isolamento elétrico, atendendo aos padrões exigidos pelas normas NEMA MW 1000 e IEC 60851.

### 3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia adotada para o desenvolvimento do estudo, que teve como foco a análise das falhas no esmalte isolante aplicado em fios de cobre da classe térmica 200 °C. A abordagem metodológica combina aspectos qualitativos e quantitativos, sendo estruturada como um estudo de caso experimental realizado em ambiente industrial, com base em dados reais de produção e em ensaios laboratoriais padronizados.

A pesquisa é de natureza aplicada, pois busca solucionar um problema concreto de qualidade no processo de esmaltagem, e apresenta caráter exploratório e descritivo, ao investigar as causas e consequências das falhas no isolamento. O caráter experimental é evidenciado pela realização de ensaios de desempenho físico, elétrico e térmico nas amostras coletadas, permitindo a comparação entre os resultados obtidos e os limites definidos pelas normas técnicas, especialmente a ANSI/NEMA MW 1000.

#### 3.1 Objeto de estudo

O objeto de estudo deste trabalho consiste em fios de cobre esmaltados da classe térmica 200 °C, amplamente utilizados em motores elétricos, transformadores e outros dispositivos submetidos a elevadas temperaturas de operação. O condutor analisado é revestido com um sistema isolante formulado à base de poliéster-imida (PEI) e poliamida-imida (PAI) na proporção de 80/20%, combinação que proporciona excelente resistência térmica, elétrica e mecânica, conforme recomendado para esta classe de desempenho.

- Foram utilizados dois tipos de esmaltes industriais da marca Elantas, amplamente empregados na fabricação de fios de alta performance:
- Poliesterimida (PEI) aplicado como camada base, responsável pela aderência e resistência mecânica;
- Poliamida-imida (PAI), aplicado como sobrecamada, conferindo maior estabilidade térmica e resistência química ao sistema isolante.

Durante o processo de fabricação, foram monitorados parâmetros como velocidade de trefilação, temperatura de cura e número de camadas de esmalte aplicadas, garantindo a uniformidade do revestimento. Esses fatores influenciam diretamente a espessura do filme, a aderência do esmalte ao cobre e a integridade dielétrica do condutor.

As amostras analisadas foram coletadas diretamente da linha de produção e submetidas aos ensaios de caracterização previstos na norma ANSI/NEMA MW 1000 para fios da classe 200 °C, de modo a avaliar a conformidade do isolamento com os requisitos mecânicos, elétricos e térmicos estabelecidos.

### 3.2 Avaliação das Condições Operacionais do Processo de Esmaltação

A verificação das condições operacionais da linha de esmaltação foi realizada com o intuito de comprovar que as variáveis de processo se mantiveram dentro das faixas especificadas para o fio de cobre esmaltado da Classe 200 °C, com diâmetro de 0,643 mm (22 AWG). Essa etapa é essencial para confirmar a estabilidade térmica e cinemática da produção, assegurando que eventuais falhas observadas estejam associadas ao comportamento do esmalte isolante e não a desvios de processo. De acordo com o referencial teórico, a aderência e a integridade do filme isolante estão diretamente relacionadas à temperatura de cura e à uniformidade de aplicação (PAULSSON et al., 2021; AWAJA et al., 2016).

Durante a produção do lote analisado, foram monitoradas as variáveis críticas de processo, abrangendo zonas de recozimento, zona de cura, velocidade de linha e condições ambientais. As medições foram obtidas por meio do sistema de controle automatizado da linha, calibrado segundo os padrões internos da empresa. Os valores médios registrados são apresentados nas Tabelas 2.

TABELA 02- PARÂMETROS DA MÁQUINA DURANTE A PRODUÇÃO DO FIO

Parâmetro	Unidade	Faixa especificada	Valor médio observado	Situação
Zona de recozimento 1	°C	550 – 600	580	Conforme

Zona de recozimento 2	°C	550 – 600	580	Conforme
Zona de cura	°C	430 – 470	470	Conforme
Velocidade de linha	m/min	170 – 190	180	Conforme

Fonte: Painel de controle de máquina de uma empresa do Sul de Minas

Os resultados apresentados na Tabela 2 demonstram que o processo de esmaltação operou de forma estável e dentro dos limites estabelecidos pelas normas técnicas. As zonas de recozimento mantiveram temperaturas médias de 580 °C, assegurando a remoção adequada de óxidos e proporcionando boas condições de aderência para o esmalte. A zona de cura, com temperatura média efetiva de aproximadamente 470 °C, situou-se na faixa ideal para promover a reticulação completa das resinas poliéster-imida (PEI) e poliamida-imida (PAI), conforme as recomendações do fabricante ELANTAS (2023).

A velocidade de linha registrada em 180 m/min garantiu tempo de residência suficiente para a cura uniforme, sem super aquecimento ou queima do filme. As condições ambientais também permaneceram controladas, com umidade relativa em torno de 48%, evitando condensação e volatilização irregular dos solventes durante a aplicação do esmalte.

Esses resultados confirmam que o processo de esmaltação ocorreu sob condições reprodutíveis e controladas, em conformidade com as normas ANSI/NEMA MW 1000 (Seção 3.5) e IEC 60851-5 (2019). Dessa forma, eventuais falhas identificadas nos ensaios experimentais subsequentes não podem ser atribuídas a desvios operacionais da linha, mas sim a características intrínsecas do esmalte isolante, como variações de cura, degradação térmica ou instabilidade do material.

### 3.3 Ensaios Experimentais e Análise dos Resultados

Com o objetivo de verificar a conformidade do fio esmaltado quanto aos requisitos mecânicos, elétricos e térmicos estabelecidos em norma, foi conduzida uma sequência de ensaios segundo os métodos descritos na ANSI/NEMA MW 1000:2018 e complementados pela IEC 60851.

Esses testes permitem avaliar a qualidade global do produto, assegurando que o condutor e o revestimento isolante apresentem desempenho adequado sob as condições de operação para as quais foram projetados.

As amostras analisadas correspondem a fios de cobre da Classe 200 °C, com diâmetro nominal de 0,643 mm (22 AWG), produzidos sob as mesmas condições operacionais apresentadas na Seção 3.2.

Após a fabricação, as amostras foram submetidas a um programa completo de ensaios no laboratório de controle de qualidade, abrangendo medições dimensionais, propriedades mecânicas e elétricas.

Os procedimentos seguiram rigorosamente os limites de aceitação definidos pela NEMA, permitindo estabelecer comparações objetivas entre o desempenho obtido e o esperado.

A Tabela 3 apresenta o resumo dos resultados, comparando os valores obtidos com os limites mínimos e máximos previstos para os fios da Classe 200 °C.

TABELA 03 - RESULTADOS DOS TESTES REALIZADOS COMPARADOS COM A NORMA NEMA

Testes realizados	Unidades de medidas	Limite normativo (NEMA MW 1000)	Valor obtido através dos testes realizados
Diâmetro do condutor	mm	0,635 - 0,650	0,643
Acréscimo de esmalte	mm	0,053 - 0,079	0,053
Externo máximo	mm	0,688 - 0,714	0,696
Alongamento à ruptura	%	$\geq 27$	25
Ângulo de recuo	°	44 – 48	45
Resistência à abrasão	g	mín. 600 / média 700	mín. 480 / média 560
Tensão disruptiva	V	$\geq 4\,600$	2500
Continuidade	falhas / 30 m	$\leq 15$	26
Aderência / Flexibilidade	OK/NOK	OK	NOK

Choque térmico	OK/NOK	OK	NOK
Resistência elétrica	$\Omega/\text{km}$	51,93 - 53,93	52,35

Fonte: Norma NEMA MW 1000 e ficha de controle de testes de empresa do Sul de Minas

Os resultados dimensionais indicam que o processo de fabricação e aplicação do esmalte manteve estabilidade operacional. Contudo, os ensaios funcionais demonstraram não conformidade do produto em diversos parâmetros críticos, implicando a reprovação do lote analisado.

### 3.3.1 Ensaios dimensionais (diâmetro de condutor, externo e acréscimo)

Os ensaios dimensionais têm como objetivo verificar a conformidade geométrica do fio esmaltado com os limites estabelecidos pela norma ANSI/NEMA MW 1000:2018, assegurando uniformidade no processo de trefilação e aplicação do esmalte.

Embora não representem, isoladamente, o desempenho elétrico ou mecânico do isolamento, esses ensaios são fundamentais para garantir a estabilidade dimensional e a compatibilidade do fio com os equipamentos de enrolamento e inserção automática, além de indicar a consistência do processo produtivo.

Como o fio é produzido em linha contínua por meio de uma máquina tandem de trefilação e esmaltação, o controle é feito de maneira prática pelo operador, que utiliza amostras retiradas do mesmo lote para determinar o diâmetro do condutor nu e o diâmetro externo após o revestimento.

- Primeiro, o operador remove o esmalte de um pequeno trecho do fio por raspagem controlada, expondo totalmente o cobre.
- Com o condutor limpo, é feita a medição do diâmetro do condutor (d), utilizando o micrômetro.
- Em seguida, um segundo trecho, ainda esmaltado, é medido para determinar o diâmetro externo (D).

- O acréscimo total do esmalte é então obtido pela diferença entre as duas medições, conforme a Equação 1:

$$D - d = \text{Acréscimo}$$

Para fios da Classe 200 °C – bitola 22 AWG (0,643 mm), a NEMA MW 1000 estabelece valores mínimos e máximos de 0,053 mm e 0,079 mm, respectivamente.

Os resultados obtidos, apresentados na Tabela 3, encontram-se dentro dessa faixa, confirmando que o processo de trefilação e aplicação manteve controle dimensional adequado e estabilidade nas fieiras e na viscosidade do esmalte.

Apesar de não indicar a qualidade do isolamento de forma direta, ele confirma que as variáveis geométricas e operacionais da linha estavam sob controle, fornecendo uma base consistente para a análise dos ensaios mecânicos, térmicos e elétricos subsequentes.

### 3.3.2 Ensaios Mecânicos (Alongamento e Ângulo de Recuo)

Os ensaios mecânicos têm como finalidade avaliar a ductilidade e o comportamento elástico do condutor após a trefilação e a aplicação do esmalte isolante, parâmetros essenciais para o desempenho do fio durante o bobinamento e em condições de serviço. A NEMA MW 1000:2018 (Seção 3.6) e a IEC 60851-3 descrevem os procedimentos para determinação do alongamento à ruptura e do ângulo de recuo, os quais permitem identificar possíveis alterações estruturais no cobre e efeitos térmicos decorrentes do processo de recozimento e da cura do esmalte.

#### 3.3.2.1 Ensaio de Alongamento à Ruptura

O ensaio de alongamento tem por objetivo determinar a capacidade do fio em deformar-se plasticamente antes da ruptura, refletindo a ductilidade do cobre e a efetividade do recozimento. As amostras foram selecionadas conforme a faixa de bitola e instaladas em equipamento de tração calibrado, em orientação horizontal ou vertical conforme o diâmetro, assegurando alinhamento axial e evitando flexões. O comprimento útil de medição foi ajustado para a faixa padronizada ( $\approx 250$  mm, quando aplicável à categoria dimensional).

O método seguiu a NEMA MW 1000:2018, §3.6.1 e prática de laboratório:

- Aplicação da carga: tração contínua e uniforme até a ruptura, sem interrupções;
- Critério de descarte: rupturas nas garras ou a  $\leq 5$  mm de sua borda são desconsideradas, por não representarem a ductilidade intrínseca;
- Repetitividade: executaram-se  $\geq 2$  ensaios por bitola, com cálculo do valor médio e do valor mínimo;
- Rastreabilidade: todos os resultados foram registrados no sistema corporativo de controle de ensaios.

Figura 2 - Teste de alongamento



Fonte:

<https://www.fibercablemachine.com/sale-31632618-xlkj-100s-enamelled-wire-elongation-and-tensile-tester.html>

De acordo com a NEMA MW 1000:2018, fios de cobre 22 AWG (0,643 mm) devem apresentar alongamento mínimo de 27 %. Para o lote avaliado, obteve-se 25 %, valor inferior ao limite e, portanto, reprovado no critério de alongamento. Esse resultado indica leve perda de ductilidade do condutor, compatível com recozimento marginal ou efeitos térmicos de processo, situação que aumenta a suscetibilidade a fissuras sob flexões sucessivas no bobinamento. A estabilidade dimensional, contudo, foi mantida, permitindo a continuidade dos demais ensaios.



### 3.3.2.2 Ensaio de Ângulo de Recuo

O ensaio de ângulo de recuo avalia a elasticidade residual do condutor (tendência de retorno após deformação), sendo um indicador indireto do grau de recozimento e da uniformidade do tratamento térmico. O método está descrito na NEMA MW 1000:2018, §3.6.2.

Procedimento executado com esmalte intacto:

- Seleção da amostra: trecho reto do fio, comprimento típico  $\approx 200$  mm;
- Curvatura controlada: enrolamento sobre mandril padronizado, com número de voltas definido pela faixa de bitola; liberação subsequente para permitir o retorno elástico;
- Leitura: determinação do ângulo de recuo em escala graduada ou goniômetro;
- Repetitividade e registro:  $\geq 2$  medições por amostra, com lançamento no sistema corporativo.

Para fios de cobre recozido Classe 200 °C – 22 AWG, a NEMA MW 1000:2018 estabelece faixa de 44° a 48°. O valor médio obtido foi 45°, portanto conforme. A concordância do ângulo de recuo, apesar da leve redução do alongamento, indica estabilidade do recozimento, sem evidências de encruamento crítico, e sugere que o processo térmico permaneceu dentro da janela operacional. Tal comportamento é comum quando o sistema trabalha próximo ao limite térmico da classe, preservando elasticidade adequada, ainda que com pequena redução da deformação plástica total.

Os resultados consolidados dos ensaios mecânicos encontram-se na Tabela 3. Em conjunto, evidenciam que, embora o alongamento tenha ficado abaixo do mínimo normativo, o ângulo de recuo permaneceu dentro da faixa especificada, indicando condutor com elasticidade suficiente e apto à sequência de avaliações elétricas e térmicas.

Figura 3 - Teste de ângulo de recuo



Fonte: [https://yasudaseiki.com/product/electrical\\_wire/enamel-stiffness/](https://yasudaseiki.com/product/electrical_wire/enamel-stiffness/)

### 3.3.3 Ensaio de Aderência e Flexibilidade

O ensaio de aderência e flexibilidade tem como objetivo verificar a capacidade do esmalte isolante de permanecer aderido ao condutor e resistir à deformação mecânica sem apresentar trincas, destacamento ou descascamento.

Esse teste é fundamental para avaliar a integridade do isolamento durante o processo de enrolamento e operação de motores, transformadores e bobinas, em que o fio é submetido a esforços repetitivos de flexão e torção.

O procedimento segue as diretrizes da ANSI/NEMA MW 1000:2018, Seção 3.7, e da IEC 60851-3, que padronizam o método de enrolamento em mandril e verificação visual do comportamento do esmalte.

As amostras utilizadas foram retiradas diretamente da bobina de produção, preservando a condição real do produto acabado.

O operador seleciona um trecho de aproximadamente 300 mm e o enrola manualmente sobre um mandril metálico com diâmetro igual a duas vezes o diâmetro nominal do condutor (2D), realizando oito voltas completas e uniformes.

Em seguida, aplica-se uma fita adesiva técnica de alta adesividade sobre as espiras, pressionando levemente para garantir contato uniforme com a superfície.

Após alguns segundos, a fita é removida de forma contínua e observa-se visualmente a superfície do fio, verificando a presença de fissuras, destacamentos ou exposição do cobre.

O ensaio é considerado aprovado quando o esmalte permanece íntegro, sem qualquer sinal de falha ou deslocamento.

De acordo com os critérios da NEMA MW 1000, o fio da bitola 22 AWG (0,643 mm), Classe 200 °C, deve manter total aderência após o ensaio.

Nas amostras analisadas, foi constatado destacamento parcial do esmalte após a remoção da fita, com regiões de cobre expostas em diversas voltas, resultando em reprovação no ensaio de aderência e flexibilidade.

Esse comportamento indica baixa ancoragem do esmalte ao condutor, frequentemente associada a cura insuficiente, contaminação da resina ou degradação térmica do verniz durante o processo de aplicação.

A falha observada representa a primeira evidência física de perda de integridade do isolamento, estando em concordância com os resultados insatisfatórios obtidos nos ensaios de resistência à abrasão e choque térmico, apresentados nas seções seguintes.

### **3.3.4 Ensaio de Resistência à Abrasão**

O ensaio de resistência à abrasão tem como objetivo avaliar a capacidade do esmalte isolante de resistir a esforços de atrito e desgaste superficial, verificando se o filme mantém integridade sob contato mecânico contínuo.

Esse teste reproduz, em escala laboratorial, as condições de atrito a que o fio é submetido durante o enrolamento em bobinas, passagem por guias e travessias em componentes metálicos, sendo um dos indicadores mais diretos da coesão e da dureza do esmalte.

O método adotado segue as especificações da ANSI/NEMA MW 1000:2018 (Seção 3.8) e da IEC 60851-3, que descrevem o procedimento conhecido como scrape test.

No equipamento de ensaio, uma agulha ou pino metálico com extremidade padronizada é posicionada em contato perpendicular à superfície do fio esmaltado.

A amostra é submetida a um movimento alternado de raspagem sob carga constante, até que ocorra a ruptura do esmalte e o contato elétrico entre o pino e o condutor de cobre.

O número de ciclos necessários para que isso ocorra é registrado automaticamente pelo aparelho.

Na prática, o operador corta um trecho do fio diretamente da bobina e o fixa no suporte do equipamento, mantendo-o esticado e alinhado.

O sistema de raspagem é acionado, e o teste é repetido em três pontos distintos da amostra, conforme o procedimento interno da empresa.

A resistência média e o valor mínimo obtidos são então comparados com os limites definidos pela norma.

De acordo com a NEMA MW 1000, para fios de 22 AWG (0,643 mm), Classe 200 °C, os valores mínimo e médio de resistência à abrasão devem ser de 600 g e 700 g, respectivamente.

Nas amostras analisadas, obtiveram-se resultados de mínimo 480 g e média 560 g, configurando reprovação no ensaio.

O desempenho inferior indica redução da dureza superficial do filme e perda de coesão entre as camadas de esmalte, o que pode ser atribuído à cura insuficiente ou à formação de poros e bolhas durante o processo de aplicação.

Essa falha é significativa, pois um isolamento com baixa resistência à abrasão tende a sofrer danos durante o enrolamento, expondo o cobre e aumentando o risco de curtos-circuitos entre espiras.

Os resultados obtidos reforçam o diagnóstico de que o esmalte utilizado não apresentou resistência mecânica adequada, sendo essa uma das principais causas para a reprovação geral do lote analisado.

Figura 4 - Teste de resistência à abrasão



fonte:

<https://www.fibercablemachine.com/sale-31632618-xlkj-100s-enamelled-wire-elongation-and-tensile-tester.html>

### 3.3.5 Ensaio de Tensão Disruptiva (Rigidez Dielétrica)

O ensaio de tensão disruptiva, também conhecido como teste de rigidez dielétrica, tem como finalidade determinar a capacidade do esmalte isolante de resistir à aplicação de uma tensão elétrica crescente sem ocorrer ruptura do isolamento.

Esse teste avalia diretamente a eficiência elétrica do revestimento, sendo um dos parâmetros mais importantes para a aprovação do fio esmaltado conforme os requisitos da ANSI/NEMA MW 1000:2018 e da IEC 60851-5.

O princípio do método consiste em aplicar uma diferença de potencial entre o condutor de cobre e um eletrodo metálico externo, em contato com a superfície esmaltada, até que ocorra a perfuração do filme isolante e o estabelecimento do arco elétrico.

O valor da tensão no momento da ruptura é registrado como tensão disruptiva e representa o limite dielétrico do esmalte.

No laboratório, o ensaio é executado por meio de um equipamento automatizado que realiza a aplicação de tensão alternada (AC) de forma progressiva, com taxa de elevação controlada.

O operador corta uma amostra diretamente da bobina, mantendo o fio em linha reta, e posiciona o trecho entre dois contatos:

- o primeiro, conectado ao condutor interno de cobre;
- o segundo, formado por um banho metálico de mercúrio, aço ou alumínio, que atua como eletrodo externo em contato com o esmalte.

O sistema eleva a tensão até que ocorra a ruptura dielétrica do revestimento e o resultado é expresso em volts (V) e comparado aos limites normativos.

Para fios de bitola 22 AWG (0,643 mm) e Classe 200 °C, a NEMA MW 1000 estabelece uma tensão mínima de ruptura de 4 600 V.

No lote avaliado, o valor obtido foi de 2 500 V, configurando reprovação no ensaio de tensão disruptiva.

Esse desempenho insatisfatório indica que o filme isolante não apresentou a resistência elétrica esperada, possivelmente em função de microfissuras, porosidade interna ou sub cura da resina.

A presença dessas discontinuidades facilita a passagem de corrente elétrica sob campo elevado, comprometendo a confiabilidade do produto e reduzindo sua vida útil em serviço.

Além disso, a baixa rigidez dielétrica observada está em conformidade com os resultados dos ensaios anteriores de aderência e abrasão, que já haviam evidenciado a fragilidade mecânica e coesiva do esmalte.

Dessa forma, o ensaio de tensão disruptiva consolida o diagnóstico de não conformidade elétrica do lote analisado, confirmando que o problema está diretamente relacionado à qualidade do verniz isolante, e não às condições do processo produtivo.

Figura 5 - Teste de tensão disruptiva



fonte: <https://www.electric-test.com/new-products/hzqb2612-automatic-15kv-enamel-copper-wire.html>

### 3.3.6 Ensaio de Continuidade (Pinhole Test)

O ensaio de continuidade, conhecido também como teste de pinhole, tem por finalidade detectar a presença de descontinuidades no filme isolante do fio esmaltado, como poros, micro fissuras ou bolhas que exponham o condutor.

Essas imperfeições, ainda que microscópicas, comprometem a resistência elétrica do esmalte e podem gerar curtos-circuitos entre espiras, principalmente sob altas tensões ou temperaturas elevadas.

O método segue as diretrizes da ANSI/NEMA MW 1000:2018, Seção 3.10, e da IEC 60851-5, Teste 6.

O princípio consiste em aplicar uma tensão elétrica constante entre o condutor de cobre e um eletrodo metálico em contato com o esmalte, em um ambiente líquido condutivo.

Quando o isolamento apresenta descontinuidade, ocorre passagem de corrente e o equipamento registra automaticamente uma falha de continuidade (pinhole).

No procedimento prático, um trecho de 30 m de fio esmaltado é retirado diretamente da bobina e passado por uma cuba contendo solução condutiva de cloreto de sódio (NaCl), sobre a qual é mantido um eletrodo metálico conectado à fonte de tensão.

O condutor interno é ligado ao terminal oposto da fonte, e a tensão de ensaio é ajustada conforme a bitola do fio — para 22 AWG (0,643 mm), aplica-se normalmente 1 500 V AC.

À medida que o fio percorre o sistema, o equipamento monitora a corrente e contabiliza o número de pontos em que ocorre ruptura do isolamento.

De acordo com a NEMA MW 1000, o limite máximo permitido para essa bitola é de 15 falhas em 30 m.

Nas amostras analisadas, o ensaio registrou 26 falhas em 30 m, caracterizando reprovação por excesso de descontinuidades no esmalte.

O elevado número de pinholes indica baixa homogeneidade do revestimento e presença de imperfeições formadas durante a aplicação ou cura, como bolhas de solvente ou partículas contaminantes.

Essas descontinuidades facilitam o surgimento de arcos elétricos localizados e reduzem a resistência dielétrica efetiva do fio.

O resultado obtido corrobora os ensaios de aderência, abrasão e tensão disruptiva, reforçando que o esmalte apresentou falhas estruturais associadas à má cura e porosidade interna, comprometendo a confiabilidade elétrica do produto.



Figura 6 - Teste de continuidade



fonte: <https://dsetestsolutions.com/p/wire-testers>

### 3.3.7 Ensaio de Choque Térmico

O ensaio de choque térmico tem como objetivo avaliar a capacidade do esmalte isolante de resistir à dilatação térmica do condutor e às variações bruscas de temperatura, sem apresentar trincas, fissuras ou desprendimento do filme.

Esse teste reproduz as condições extremas a que o fio esmaltado é submetido durante a operação de motores e transformadores, especialmente nas fases de partida, frenagem e sobrecarga, em que ocorrem oscilações rápidas de temperatura.

O procedimento segue as especificações da ANSI/NEMA MW 1000:2018, Seção 3.11, e da IEC 60851-6, Teste 4, que definem o método de exposição térmica direta e verificação visual subsequente.

O princípio consiste em submeter o fio a uma elevação súbita de temperatura, mantendo-o por um período determinado, e posteriormente inspecionar a superfície do esmalte quanto à ocorrência de trincas ou destacamentos.

Na prática, o ensaio foi executado da seguinte forma:

- Amostras de aproximadamente 300 mm foram retiradas da bobina de produção, mantendo o estado original do produto.

- As amostras foram enroladas em torno de um mandril metálico, com diâmetro correspondente a três vezes o diâmetro nominal do condutor (3D), formando espiras uniformes e justas.
- O conjunto foi colocado em um forno de circulação de ar previamente aquecido a 220 °C, valor adotado conforme o critério para fios da Classe 200 °C, permanecendo por 30 minutos.
- Após a retirada do forno, as amostras foram resfriadas à temperatura ambiente e inspecionadas visualmente sob iluminação direta, avaliando-se a presença de fissuras, descascamento ou exposição do cobre.

Segundo a NEMA MW 1000, o ensaio é considerado aprovado quando o esmalte se mantém íntegro, sem falhas visíveis após o ciclo térmico.

Nas amostras avaliadas, observou-se trincas e destacamentos em 3 das 5 amostras testadas, caracterizando reprovação no ensaio de choque térmico.

O resultado indica que o filme isolante não apresentou estabilidade térmica suficiente para resistir à expansão do cobre durante o aquecimento.

Esse comportamento é típico de esmaltes com rede polimérica incompleta (subcura) ou com presença de solventes residuais, que reduzem a coesão interna do filme e facilitam a formação de microfissuras sob variação de temperatura.

A falha observada reforça os resultados dos ensaios anteriores — especialmente de aderência e abrasão — evidenciando que a resistência mecânica e térmica do esmalte foi comprometida, sendo essa uma das causas primárias para a reprovação global do lote.

### **3.3.8 Ensaio de Resistência Elétrica**

O ensaio de resistência elétrica tem por finalidade verificar a conformidade do condutor de cobre quanto à resistividade elétrica em temperatura controlada, assegurando que o material base atenda às especificações normativas.

Esse teste é fundamental para confirmar a qualidade metalúrgica e o recozimento do cobre, servindo também como referência para avaliar se as falhas identificadas nos ensaios anteriores estão associadas ao esmalte ou ao condutor.

O procedimento segue as orientações da ANSI/NEMA MW 1000:2018, Seção 3.12, e da IEC 60851-5, Teste 2.

O princípio do método consiste em medir a resistência elétrica linear de um trecho do fio a 20 °C, utilizando um microhímetro de alta precisão.

O valor obtido é então comparado ao limite máximo permitido pela norma, que é função da bitola do fio e do material condutor.

Para fios de 22 AWG (0,643 mm) de cobre recozido, a NEMA MW 1000 estabelece uma resistência máxima de 86,0  $\Omega$ /km.

O ensaio foi realizado com o fio exatamente como produzido, sem qualquer modificação.

As amostras foram cortadas em trechos de 1 metro e medidas individualmente, garantindo estabilidade térmica e boa conexão entre os terminais de contato.

A temperatura do ambiente foi monitorada durante a execução do teste, assegurando que a medição ocorresse próxima dos 20 °C exigidos pela norma.

O resultado obtido foi de 85,8  $\Omega$ /km, valor dentro do limite especificado pela NEMA, sendo, portanto, considerado conforme.

Esse resultado confirma que o condutor metálico manteve suas propriedades elétricas normativas, evidenciando que o processo de trefilação e recozimento ocorreu de forma adequada.

A conformidade do condutor reforça a conclusão de que as falhas observadas nos ensaios de aderência, abrasão, continuidade e rigidez dielétrica não têm relação com o cobre base, mas são decorrentes de deficiências do esmalte isolante — seja por subcura, porosidade ou degradação química do verniz.

Dessa forma, o ensaio de resistência elétrica atua como elemento de validação final do processo, confirmando que o problema identificado é restrito ao revestimento isolante, e não ao material condutor.

#### **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

A etapa de resultados e discussões representa o momento de avaliação crítica das evidências experimentais, permitindo correlacionar os dados obtidos com os fundamentos teóricos apresentados anteriormente.

Nesta fase, os resultados dos ensaios realizados em fios de cobre Classe 200 °C são analisados à luz das normas técnicas e dos mecanismos de falha descritos na literatura, com o objetivo de identificar as causas predominantes de não conformidade e compreender seus efeitos sobre a integridade e o desempenho do isolamento esmaltado.

#### **4.1 Condições Operacionais e Estabilidade do Processo**

Os parâmetros operacionais apresentados na Tabela 2 demonstraram que o processo de esmaltação ocorreu dentro das faixas especificadas. As temperaturas das zonas de recozimento (580 °C), da zona de cura (470 °C) e a velocidade de linha (180 m/min) mantiveram-se estáveis e em conformidade com as recomendações do fabricante do verniz e das normas aplicáveis. Esses resultados confirmam que o processo térmico e cinemático foi conduzido de forma controlada, de modo que as falhas observadas nos ensaios não podem ser atribuídas a variações operacionais, mas possivelmente a características intrínsecas do sistema de revestimento.

#### **4.2 Desempenho Dimensional e Mecânico**

A Tabela 3 apresenta o conjunto de ensaios realizados e seus respectivos valores comparados aos limites normativos. As dimensões do condutor e o acréscimo de esmalte mantiveram-se dentro das tolerâncias estabelecidas, confirmando estabilidade geométrica do fio e controle satisfatório das fieiras e da viscosidade de aplicação. O ângulo de recuo, com média de 45°, está em conformidade com a faixa de 44° a 48° especificada pela NEMA MW 1000 (§ 3.6.2), indicando recozimento adequado e ausência de encruamento. O alongamento à ruptura, de 25 % frente ao mínimo normativo de 27 %, revela apenas leve redução de ductilidade, insuficiente para comprometer o comportamento mecânico global do condutor.

Esses dados demonstram que o substrato metálico manteve integridade e que o processo de trefilação e recozimento não apresentaram influência direta sobre as falhas registradas, permitindo concluir que o condutor base encontra-se conforme e que as não conformidades observadas estão relacionadas ao revestimento isolante.

#### **4.3 Desempenho do Esmalte Isolante**

Os ensaios funcionais evidenciaram desempenho insatisfatório da camada de esmalte isolante, com reprovação nos testes de aderência, abrasão, continuidade, rigidez dielétrica e choque térmico.

No ensaio de aderência e flexibilidade, verificou-se destacamento parcial do revestimento após a remoção da fita adesiva, sugerindo baixa coesão interlaminar e adesão limitada entre o esmalte e o cobre. Esse comportamento é característico de sistemas com subcura térmica, nos quais a reticulação polimérica é incompleta, resultando em perda de resistência mecânica e falhas na interface metal-polímero (NEMA MW 1000:2018, § 3.7).

O ensaio de resistência à abrasão reforçou essa tendência, apresentando valores médios de 560 g, abaixo do limite mínimo de 700 g previsto em norma. A menor resistência ao desgaste superficial indica baixa densidade de ligações cruzadas na matriz do esmalte, o que reduz a dureza e a estabilidade mecânica do filme (Stone; Culbert; Boulter, 2014).

De forma coerente, os resultados de continuidade e rigidez dielétrica apresentaram valores abaixo do esperado. Foram registradas 26 falhas por 30 m de fio, superior ao limite de 15 falhas estabelecido pela NEMA MW 1000 (§ 3.9), e ruptura dielétrica a 2 500 V, inferior ao mínimo normativo de 4 600 V. Esses resultados sugerem a presença de microfissuras, porosidade ou retenção de solventes durante a cura do esmalte. Tais imperfeições reduzem a espessura efetiva da camada isolante e comprometem a capacidade dielétrica do fio.

Apesar de não terem sido realizados ensaios químicos complementares, como espectroscopia ou análise térmica diferencial, todos os resultados apontam para a hipótese de que o problema está relacionado às características do esmalte utilizado. A combinação de baixa aderência, resistência mecânica insuficiente e falhas elétricas indica uma reticulação

incompleta ou formulação inadequada do verniz, sugerindo uma origem intrínseca ao material isolante e não ao processo de aplicação.

#### **4.4 Relação Causa e Efeito das Falhas**

A análise conjunta dos resultados permite observar que as falhas apresentam uma correlação direta entre si e decorrem de causas específicas do processo de esmaltação. A ocorrência simultânea de baixa aderência, resistência à abrasão insuficiente e rigidez dielétrica reduzida indica subcura do sistema de esmalte, resultando em formação incompleta da rede polimérica e consequente perda de propriedades mecânicas e elétricas.

A presença de microfissuras e porosidade observada nos ensaios de continuidade e choque térmico reforça a hipótese de que o processo de cura não atingiu o grau ideal de reticulação, o que comprometeu a integridade do filme e favoreceu falhas dielétricas prematuras.

Dessa forma, estabelece-se uma relação causa e efeito clara:

- Causa: parâmetros de cura ou formulação inadequados
- Efeito técnico: delaminação, perda de aderência e baixa rigidez dielétrica
- Consequência industrial: reprovação em ensaios normativos e risco de falhas funcionais.

Essas evidências confirmam o vínculo direto entre o controle térmico do processo e a confiabilidade do esmalte isolante.

#### **4.5 Possíveis impactos no usuário final**

As falhas observadas nos ensaios laboratoriais não se restringem a efeitos internos de processo. Em aplicações reais, tais defeitos impactam diretamente o desempenho e a

confiabilidade dos equipamentos que utilizam fios de cobre esmaltados, como motores elétricos, transformadores e bobinas.

A baixa rigidez dielétrica e a presença de descontinuidades aumentam o risco de curtos-circuitos entre espiras, aquecimento excessivo e falhas prematuras do isolamento, comprometendo o rendimento e a durabilidade dos sistemas elétricos. Além disso, a perda de aderência e a fragilidade mecânica do esmalte reduzem a resistência às vibrações e aos ciclos térmicos típicos de operação industrial, acelerando o envelhecimento do material isolante.

Essas condições podem resultar em paradas não programadas, aumento dos custos de manutenção e redução da confiabilidade global dos produtos, afetando diretamente o desempenho percebido pelo cliente final e a imagem de qualidade do fabricante.

Dessa forma, as falhas identificadas nos ensaios laboratoriais demonstram que desvios sutis na cura do esmalte podem gerar consequências significativas no desempenho elétrico e mecânico do produto final. A relação observada entre as variáveis de processo e os resultados funcionais evidencia a importância do controle térmico e da formulação do verniz na confiabilidade do isolamento. Esses aspectos serão considerados na etapa seguinte, em que se sintetizam as conclusões gerais do estudo.

## **5 CONCLUSÕES**

O presente estudo teve como objetivo analisar os mecanismos e impactos das falhas no esmalte isolante aplicados em fios de cobre da Classe 200 °C, buscando identificar suas causas e efeitos sobre a integridade mecânica, elétrica e térmica do condutor. A partir da avaliação experimental realizada, foi possível obter resultados consistentes que permitem uma compreensão ampla do comportamento do isolamento em condições reais de produção e ensaio.

Os dados obtidos demonstraram que o processo de trefilação, recozimento e esmaltação foi conduzido dentro dos parâmetros especificados pela ANSI/NEMA MW 1000 (2018), conforme evidenciado pelos valores estáveis de temperatura e velocidade de linha. As propriedades dimensionais e mecânicas do cobre mostraram-se adequadas, indicando que o

substrato metálico e o controle operacional não foram fatores determinantes para as falhas observadas.

As não conformidades verificadas nos ensaios de aderência, resistência à abrasão, continuidade, rigidez dielétrica e choque térmico indicam tendência de degradação localizada na camada de esmalte, possivelmente associada à subcura térmica e à baixa densidade de reticulação polimérica. Esses fatores comprometem a coesão entre camadas, reduzem a rigidez dielétrica e favorecem o aparecimento de microfissuras e falhas elétricas prematuras.

Embora os resultados experimentais apontem fortemente para a estrutura do esmalte isolante como principal origem das falhas, não é possível afirmar essa relação de forma conclusiva, uma vez que não foram realizados ensaios físico-químicos específicos sobre o material. A confirmação dessa hipótese exige análises complementares, como espectroscopia no infravermelho (FTIR), análise termogravimétrica (TGA), calorimetria diferencial de varredura (DSC) e microscopia eletrônica de varredura (SEM), que permitiriam avaliar a composição, a degradação térmica e o grau de reticulação do verniz.

Com base nas evidências disponíveis, conclui-se que as falhas detectadas são provavelmente decorrentes de variações na estrutura e no processo de cura do esmalte isolante, e não de problemas inerentes ao cobre ou às condições de trefilação. Assim, recomenda-se intensificar o controle da viscosidade do verniz, a calibração térmica das zonas de cura, a rastreabilidade dos lotes de esmalte e a padronização de procedimentos de aplicação, conforme as diretrizes da NEMA MW 1000 (2018) e da IEC 60851 (2019).

Além disso, sugere-se a implementação de um programa de análise periódica do esmalte, com foco em estabilidade térmica e composição química, visando reduzir a variabilidade entre lotes e melhorar a consistência do isolamento. A integração entre o setor de processo e o laboratório de qualidade é fundamental para a detecção precoce de desvios e para a correção imediata de parâmetros críticos.

Apesar de os ensaios realizados terem permitido identificar a origem provável das falhas, não foram conduzidas análises químicas complementares (como FTIR, DSC ou TGA) capazes de confirmar a hipótese de sub-cura ou degradação térmica do esmalte. Assim, recomenda-se, para trabalhos futuros, a realização de testes químicos e térmicos detalhados no material isolante, de modo a caracterizar sua composição e grau de reticulação. Essa



abordagem permitiria confirmar de forma conclusiva se as falhas derivam de formulação inadequada, envelhecimento do verniz ou desvios durante o processo de cura.

De forma geral, este estudo contribui para o entendimento técnico das falhas em fios de cobre da Classe 200 °C e reforça a importância do controle da estrutura polimérica do esmalte como fator determinante para o desempenho dielétrico e a confiabilidade do produto final. Os resultados obtidos servem como base para ações de melhoria contínua no processo industrial, alinhadas às práticas de qualidade e às exigências normativas internacionais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTANA ELECTRICAL INSULATION GMBH. Titanate catalysis in polyesterimide wire enamels. Wesel, 2012. Disponível em: <https://www.altana.com>. Acesso em: 6 jun. 2025.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE; NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. ANSI/NEMA MW 1000: Magnet Wire Standard. Rosslyn, VA: NEMA, 2018. Disponível em : <https://www.nema.org/standards/view/ansi-nema-mw-1000>. Acesso em: 6 jun. 2025.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1676: Standard Test Methods for Electrical Insulating Varnishes. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024. Disponível em: <https://www.astm.org/d1676>. Acesso em: 6 jun. 2025.

ANTON, R.; FUNER, M.; THEIS, F. In-situ curing control of electrical insulation coatings. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006. DOI: 10.1109/CEIDP.2006.312007.

AWAJA, M. et al. Review of polymeric materials used for wire insulation and related failure mechanisms. Engineering Failure Analysis, v. 66, p. 480–501, 2016. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.05.008.

AYMONINO, P. et al. Thermal aging and curing effects in high-temperature enameled wires. Journal of Polymer Research, v. 29, n. 4, p. 1–12, 2022. DOI: 10.1007/s10965-022-02817-9.

BAEWIRE. Dielectric properties and magnet wire basics. [S.l.]: Baewire, 2024. Disponível em: <https://www.baewire.com>. Acesso em: 6 jun. 2025.

BAUR, T. Dielectric loss tangent analysis of polymeric insulations under AC stress. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 30, n. 1, p. 112–120, 2023. DOI: 10.1109/TDEI.2023.1024132.

BOGGS, M. et al. High-frequency detection of partial discharges in coated wires using UHF sensors. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 27, n. 4, p. 1234–1241, 2020. DOI: 10.1109/TDEI.2020.9145566.

CONDU PASQUA. Ovalização e tolerâncias dimensionais em fios esmaltados. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.condupasqua.com.br>. Acesso em: 6 jun. 2025.

CRESWELL, J. W.; CLARK, V. L. P. Pesquisa de métodos mistos. 2. ed. Porto Alegre: Penso, 2013.

DE MELE, P. A. et al. Adhesion failure in enameled copper wires under cyclic thermal stress. *Materials Performance and Characterization*, v. 12, p. 1–10, 2023. DOI: 10.1520/MPC20230015.

DEMIRI, S. Effect of mechanical fatigue on insulation failure in magnet wires. *Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2014. DOI: 10.1109/EIC.2014.6869205.

ELANTAS. Processing Guidelines for Wire Enamels. Wesel: Elantas Electrical Insulation, 2023. Disponível em: <https://www.elantas.com> . Acesso em: 6 jun. 2025.

ESSEX GROUP INC. Copper Wire Surface Preparation and Adhesion Improvement Techniques. Indiana: Essex Brownell, 2020. Disponível em: <https://essexbrownell.com>. Acesso em: 6 jun. 2025.

FABIANI, D. et al. Electrical insulation failures in power electronics: a literature survey and analysis. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 17, n. 5, p. 1435–1445, 2010. DOI: 10.1109/TDEI.2010.5589277.

GORNICKA, K.; GORECKI, J. Chemical degradation of polyamide-imide coatings in magnet wires. *Materials Chemistry and Physics*, v. 122, p. 489–496, 2010. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2010.03.054.

HÖPNER, M. Solvent systems for wire enamels: rheology and application windows. *Coatings Technology Journal*, 2021.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE) – DEIS. Annual Report on Insulation Research. New York: IEEE, 2024.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60317: Specifications for particular types of winding wires. Geneva: IEC, 2019. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/publication/68264>. Acesso em: 6 jun. 2025.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60851-5: Winding wires – Test methods – Part 5: Electrical properties. Geneva: IEC, 2019. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/publication/68264>. Acesso em: 6 jun. 2025.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60085: Electrical insulation – Thermal evaluation and designation. Geneva: IEC, [s.d.].

ISO. ISO 9001:2015 – Quality management systems – Requirements. Geneva: International Organization for Standardization, 2015.

KATO, T. et al. Partial discharge endurance of nanoparticle-modified enamel coatings. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 10, n. 6, p. 1101–1108, 2003. DOI: 10.1109/TDEI.2003.1266071.

LEE, H. et al. Dielectric and mechanical performance of nanoparticle-enhanced enamels. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 15, n. 6, p. 1447–1454, 2008. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4712638.

MA, Y. et al. Comparative thermal performance of polyimide and polyesterimide enamels. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 147, p. 211–220, 2024. DOI: 10.1007/s10973-024-12052-9.

MWS WIRE INDUSTRIES. Mechanical properties and test guidance for magnet wire. Westlake Village, CA, 2024. Disponível em: <https://mwswire.com>. Acesso em: 6 jun. 2025.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). Coatings and Surface Treatments for High Reliability Applications. Washington, DC, 2001. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20010065430>. Acesso em: 6 jun. 2025.

PAULSSON, B. et al. Enameled Copper Wire Handbook. 2. ed. Berlin: Springer, 2021. DOI: 10.1007/978-3-662-63159-2.

REMINGTON INDUSTRIES. Magnet wire technical data. Chicago, 2023. Disponível em: <https://www.remingtonindustries.com>. Acesso em: 6 jun. 2025.

RUGGED MONITORING. Partial discharge monitoring for rotating machines. Montreal, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ruggedmonitoring.com>. Acesso em: 6 jun. 2025.

STONE, G. C.; CULBERT, I.; BOULTER, E. A. Electrical Insulation for Rotating Machines. 2. ed. Hoboken: IEEE Press, 2014.

VAKULENKO, A. Solvent evaporation control in wire enamel curing. Coatings Technology Journal, 2021.

YIN, R. K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.