

**IMPACTO DAS FALHAS NO ESMALTE ISOLANTE NA INTEGRIDADE DOS  
FIOS DE COBRE CLASSE 200 °C: uma análise das causas e efeitos****IMPACT OF INSULATING ENAMEL DEFECTS ON THE INTEGRITY OF  
200°C CLASS COPPER WIRES: An Analysis of Causes and Effects****Fernando Ferreira Bagetti<sup>1</sup>, Luis Carlos Vieira Guedes<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Centro Universitario do Sul de Minas, Varginha, Minas Gerais,  
Fernando.bagetti@alunos.unis.edu.br

<sup>2</sup> Centro Universitario do Sul de Minas, Varginha, Minas Gerais,  
luis.guedes@professor.unis.edu.br

**RESUMO**

Os fios de cobre esmaltados são componentes essenciais em motores, transformadores e sistemas elétricos de alta eficiência, nos quais o esmalte isolante atua como barreira dielétrica e proteção mecânica do condutor. Em aplicações de Classe 200 °C, falhas no esmalte podem comprometer a integridade do isolamento, ocasionando curtos-circuitos e falhas prematuras. Este estudo analisa os principais mecanismos de falha no esmalte isolante aplicado a fios de cobre Classe 200 °C, correlacionando resultados experimentais com parâmetros de processo e normas técnicas. Foram avaliados fios 22 AWG com revestimento PEI/PAI (80/20%), submetidos a ensaios dimensionais, mecânicos, elétricos e térmicos conforme ANSI/NEMA MW 1000 e IEC 60851. As condições operacionais (580 °C, 470 °C e 180 m/min) mantiveram-se estáveis, assegurando reprodutibilidade. Os resultados mostraram conformidade dimensional e elétrica do condutor, mas falhas no esmalte em aderência, abrasão, continuidade, rigidez dielétrica e choque térmico. As evidências indicam subcura e baixa densidade de reticulação polimérica como causas prováveis das não conformidades, associadas à formação de microfissuras e porosidade. Conclui-se que a confiabilidade do isolamento depende diretamente do controle térmico e reológico do esmalte e da verificação periódica de sua estrutura por análises químicas e físico-térmicas.

**Palavras-chave:** fio esmaltado, esmalte isolante, falhas, ensaios, Classe 200 °C.

## 1 INTRODUÇÃO

Os fios de cobre esmaltados desempenham um papel essencial em motores, transformadores e equipamentos elétricos, sendo responsáveis por conduzir corrente elétrica com segurança e eficiência. O esmalte isolante aplicado sobre o condutor tem a função de garantir o isolamento entre espiras adjacentes, protegendo o cobre contra esforços mecânicos, agentes químicos e degradação térmica. A confiabilidade desse revestimento é determinante para o desempenho e a durabilidade dos sistemas eletromagnéticos, tornando-se um dos principais parâmetros de controle de qualidade no setor de condutores elétricos.

Com o avanço tecnológico e o aumento da densidade de potência em máquinas elétricas, as exigências sobre os sistemas de isolamento se tornaram mais rigorosas. A busca por eficiência energética, compactação de motores e redução de perdas exige materiais capazes de suportar maiores temperaturas e tensões elétricas sem comprometer suas propriedades dielétricas e mecânicas. Nesse contexto, os fios de cobre classificados como Classe Térmica 200 °C são amplamente utilizados em motores compactos, transformadores e equipamentos de alta exigência térmica, onde o desempenho do esmalte isolante é fator crítico para o sucesso do produto final.

O esmalte é formado por resinas poliméricas termofixas aplicadas sobre o condutor em múltiplas camadas e curadas termicamente, formando uma película contínua e aderente. Entre os sistemas mais utilizados destacam-se o poliéster-imida (PEI) e a poliamida-imida (PAI), que combinam excelente resistência térmica, estabilidade química e propriedades dielétricas adequadas às aplicações de alta temperatura. No entanto, pequenas variações no processo de fabricação, como desvios na viscosidade do esmalte, tempo de cura ou temperatura das zonas de aquecimento, podem comprometer a integridade do revestimento, gerando falhas que se manifestam em forma de microfissuras, delaminações, porosidade ou perda de rigidez dielétrica.

Essas falhas afetam diretamente a confiabilidade e a vida útil de motores e transformadores, pois o esmalte é a primeira linha de defesa contra curtos-circuitos entre espiras. Quando o isolamento é comprometido, ocorrem sobreaquecimentos localizados e falhas elétricas progressivas, que resultam em paradas não programadas, aumento de custos de manutenção e perda de eficiência energética. Assim, compreender os mecanismos de falha e suas causas é fundamental para o aprimoramento contínuo do processo de esmaltação e da qualidade do produto final.

O presente estudo tem como propósito analisar os principais mecanismos de falha no esmalte isolante aplicado a fios de cobre da Classe 200 °C, buscando correlacionar os resultados experimentais obtidos em ensaios normativos com os parâmetros de processo e formulação utilizados na produção. O trabalho foi conduzido de forma a identificar as causas das não conformidades observadas, avaliar sua relação com variáveis de processo, como perfil térmico e viscosidade do esmalte, e propor ações corretivas e preventivas que assegurem a estabilidade e a confiabilidade do isolamento.

O objetivo geral da pesquisa é analisar como falhas na formulação e aplicação do esmalte afetam as propriedades dielétricas e mecânicas dos fios de cobre Classe 200 °C. Os objetivos específicos consistem em identificar os fatores de falha recorrentes no processo de esmaltação, relacionar os resultados dos ensaios realizados com os requisitos normativos, e propor recomendações técnicas para mitigação de falhas e otimização do processo.

Por meio da análise experimental e comparativa dos resultados de ensaio, busca-se fornecer subsídios técnicos para o aprimoramento dos parâmetros de processo, contribuindo para a padronização e melhoria da qualidade dos fios esmaltados produzidos, bem como para o aumento da confiabilidade de sistemas elétricos e eletromecânicos que dependem desse tipo de condutor

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Fios de cobre esmaltados: função, classes térmicas e requisitos**

Os fios de cobre esmaltados (magnet wire) são condutores metálicos recobertos por um filme polimérico contínuo que garante isolamento elétrico entre espiras, proteção mecânica do cobre e estabilidade frente a esforços térmicos e químicos. Em motores, transformadores e atuadores, a integridade desse filme condiciona o rendimento, a confiabilidade e a vida útil do equipamento. As normas aplicáveis, como a ANSI/NEMA MW 1000 e a IEC 60851, definem requisitos dimensionais, mecânicos, elétricos e térmicos, assegurando a qualidade e a intercambiabilidade entre fabricantes.

A classificação térmica dos fios esmaltados estabelece a temperatura máxima de operação contínua em que o conjunto condutor-isolante mantém suas propriedades dentro de limites aceitáveis de envelhecimento. As classes mais comuns são 130, 155, 180 e 200

°C, sendo esta última utilizada em aplicações que exigem alta estabilidade térmica, resistência à fadiga e menor degradação dielétrica ao longo do tempo.

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

O desempenho do fio resulta da interação entre o esmalte, o cobre e os parâmetros de fabricação. Filmes muito finos reduzem a rigidez dielétrica e aumentam o risco de falha por descarga parcial; filmes espessos, por outro lado, comprometem o fator de ocupação do entalhe e dificultam o enrolamento automático. A ductilidade e o retorno elástico do cobre (avaliados por alongamento e ângulo de recuo) também influenciam a integridade do filme durante a deformação por enrolamento. Dessa forma, o desempenho global depende do equilíbrio entre formulação do esmalte, preparo superficial do condutor e estabilidade térmica da linha de produção.

## 2.2 Esmalte isolante (PEI/PAI): composição, reologia e cura

Os sistemas de esmalte utilizados em fios Classe 200 °C baseiam-se em resinas poliéster-imida (PEI) e poliamida-imida (PAI), aplicadas em múltiplas camadas e curadas termicamente para formação de uma película homogênea e aderente. O PEI fornece boa ancoragem ao cobre e facilidade de aplicação, enquanto o PAI atua como sobrecamada, elevando a rigidez dielétrica, a resistência térmica e a estabilidade química

A formulação líquida contém solventes orgânicos como tolueno, xileno e MEK, que ajustam a viscosidade e permitem a deposição uniforme. A viscosidade ideal situa-se entre 30 e 60.000 mPa·s, conforme a NEMA MW 1000, e deve ser monitorada antes de cada aplicação. Variações acima ou abaixo dessa faixa geram defeitos como bolhas, trilhas de fluxo, espessura irregular e porosidade.

Durante a cura, que ocorre entre 430 e 470 °C com tempo de residência médio de 30 a 40 segundos, ocorrem reações de condensação e ciclização que promovem a reticulação polimérica. Essa etapa é decisiva para a formação de uma rede tridimensional estável, responsável pela resistência mecânica e elétrica do revestimento. Desvios de temperatura ou tempo resultam em subcura (reticulação incompleta, baixa aderência e menor rigidez dielétrica) ou supercura (degradação oxidativa e fragilização superficial). (INSERIR TABELA 3 – *Faixas típicas de temperatura e tempo de cura para esmaltes PEI/PAI*).

A aderência do esmalte depende também da condição superficial do cobre. Contaminações, óxidos ou umidade reduzem a energia superficial e comprometem a ancoragem, levando a delaminações sob flexão. A homogeneização inadequada do esmalte e a instabilidade térmica do forno contribuem para heterogeneidades e formação de microfissuras. O controle conjunto da viscosidade, perfil térmico e velocidade de linha é, portanto, essencial para garantir a repetibilidade e prevenir falhas funcionais.

### **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.

A fadiga mecânica ocorre devido à flexão, tração e vibração constantes durante o processo de bobinamento e operação de motores e transformadores. Sob essas solicitações repetitivas, o esmalte pode apresentar microfissuras superficiais, que se tornam pontos concentradores de tensão e iniciam processos de falha elétrica e térmica (Demiri, 2014).

A baixa aderência e a delaminação estão relacionadas à interface entre o cobre e o esmalte. A presença de óxidos, contaminantes ou cura incompleta prejudica a ancoragem, resultando em destacamento das camadas sob esforços mecânicos (Essex Group Inc., 2020). Esse tipo de falha se manifesta nos ensaios de torção e aderência com fita, e compromete também a resistência à abrasão.

A degradação térmica é uma das causas mais críticas, especialmente para fios Classe 200 °C. Temperaturas acima do limite de operação aceleram a oxidação e rompem as ligações poliméricas, reduzindo a rigidez dielétrica e a resistência mecânica. Desvios de tempo e temperatura durante a cura geram subcura, com rede polimérica incompleta, ou supercura, que promove fragilização oxidativa (Ma et al., 2024; Aymonino et al., 2022).

As falhas elétricas ocorrem quando o campo elétrico excede a rigidez dielétrica do esmalte, resultando em ionização localizada e erosão do material. As descargas parciais degradam o isolamento e abrem microcanais condutores que evoluem para ruptura dielétrica (Boggs et al., 2020). A homogeneidade do filme é fundamental para evitar essas falhas.

Os mecanismos descritos, mecânicos, térmicos e elétricos, são interdependentes e se manifestam de forma combinada, reforçando a necessidade de controle rigoroso da viscosidade, da temperatura de cura e da preparação da superfície do cobre.

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

A confiabilidade dos fios esmaltados depende diretamente da integridade do esmalte isolante, que atua como barreira elétrica e mecânica entre as espiras. Para avaliar sua eficiência, são aplicados ensaios normativos que permitem detectar defeitos visuais, elétricos e mecânicos de forma padronizada (NEMA, 2021; IEC 60851, 2019).

A inspeção visual é o primeiro método de verificação e tem como objetivo identificar trincas, bolhas, descascamentos e irregularidades na camada isolante, que podem indicar falhas no processo de aplicação ou cura (Elantas, 2023).

O ensaio de aderência e flexibilidade avalia a capacidade do esmalte de manter-se aderido ao condutor mesmo sob esforços de dobra ou torção, simulando as condições reais de enrolamento. O teste é aprovado quando o filme se mantém íntegro, sem trincas ou desprendimento (NEMA, 2021).

O ensaio de continuidade (pinhole) detecta descontinuidades microscópicas que expõem o cobre e comprometem o isolamento. O excesso de falhas indica baixa uniformidade do filme e risco de descargas elétricas localizadas (Iten, 2022).

As dimensões e ovalização são avaliadas para garantir compatibilidade geométrica com os equipamentos de enrolamento. Valores fora da tolerância podem causar atrito excessivo e danificar o esmalte (Condu Pasqua, 2021).

Os ensaios de propriedades mecânicas, como alongamento e ângulo de recuo, determinam a ductilidade e a elasticidade do condutor após a trefilação e o recozimento, assegurando que o fio suporte deformações sem comprometer o esmalte (MWS Wire, 2024).

As propriedades elétricas, especialmente a resistência elétrica e a rigidez dielétrica, verificam a capacidade do isolamento de suportar tensões elevadas sem falha. O choque térmico, por sua vez, avalia a resistência do esmalte a variações bruscas de temperatura, sendo decisivo para fios de Classe 200 °C.

Por fim, o ensaio de tangente delta mede as perdas dielétricas do isolamento em corrente alternada. O aumento desse valor indica envelhecimento ou defeitos no esmalte (Baur, 2023).

Esses métodos, aplicados de forma sistemática, permitem correlacionar as falhas observadas com suas causas prováveis, garantindo o controle da qualidade e a conformidade do produto com as normas internacionais.

## **2.5 Estratégias de mitigação e prevenção de falhas**

A prevenção das falhas em fios de cobre esmaltados está diretamente associada à estabilidade do processo de fabricação e à padronização das condições de aplicação e cura do esmalte. O controle rigoroso das variáveis de processo, aliado à manutenção

preventiva dos equipamentos e à verificação sistemática das propriedades do esmalte, é essencial para garantir a repetibilidade dos resultados e reduzir a variabilidade entre lotes.

O primeiro fator crítico é o controle da viscosidade do esmalte, que deve ser monitorada antes de cada turno de produção. A viscosidade influencia diretamente a espessura da camada aplicada, a homogeneidade do filme e a aderência ao cobre. Variações fora da faixa ideal geram defeitos como bolhas, poros e espessura irregular, aumentando o risco de falhas dielétricas. Para evitar esse tipo de ocorrência, recomenda-se o uso de amostragens regulares e o acompanhamento por controle estatístico de processo (CEP), permitindo a detecção precoce de desvios.

Outro aspecto fundamental é o perfil térmico de cura, que deve ser mantido dentro dos limites especificados para cada tipo de esmalte. O mapeamento periódico das zonas de aquecimento do forno assegura que a energia térmica seja distribuída uniformemente, evitando tanto a subcura quanto a supercura. A subcura leva à formação de uma rede polimérica incompleta, reduzindo a densidade de ligações cruzadas e comprometendo a resistência à abrasão e a rigidez dielétrica. A supercura, por outro lado, causa degradação oxidativa do filme e perda de flexibilidade.

A manutenção preventiva de feiras, anéis e guias também tem papel decisivo, pois o desgaste desses componentes altera o diâmetro de aplicação e pode gerar falhas de deposição. O mesmo cuidado deve ser adotado com a limpeza das linhas e reservatórios de esmalte, evitando a contaminação por partículas sólidas e a formação de resíduos que comprometem a uniformidade da camada. Além disso, o armazenamento do esmalte deve seguir as orientações do fabricante quanto à temperatura, umidade e validade, assegurando a estabilidade química do produto.

O treinamento contínuo dos operadores é indispensável para a padronização das práticas de inspeção e detecção de defeitos visuais durante a produção. A implementação de auditorias internas e planos de reação imediata em caso de não conformidade também contribui para reduzir a reincidência de falhas. A integração entre os setores de processo e qualidade deve ser constante, garantindo que as informações obtidas em ensaios laboratoriais sejam utilizadas como base para ajustes de linha.

A rastreabilidade dos materiais e parâmetros de produção é uma ferramenta fundamental para o controle da qualidade em fios esmaltados. Cada lote de esmalte deve ser identificado e vinculado às condições operacionais da linha de fabricação, permitindo a correlação direta entre eventuais falhas e suas causas. Esse acompanhamento possibilita

a análise histórica dos resultados e a identificação de tendências, o que facilita a implementação de ações corretivas eficazes.

O controle estatístico de processo, aliado à rastreabilidade dos lotes, permite detectar variações sutis que podem não gerar falhas imediatas, mas comprometem a estabilidade a longo prazo. A utilização de indicadores de desempenho, como taxa de refugo, número de falhas por quilômetro produzido e resultados de ensaios normativos, fornece uma base objetiva para avaliar a eficiência do sistema produtivo.

Além disso, o monitoramento das condições ambientais da fábrica, especialmente temperatura e umidade, é essencial, já que essas variáveis influenciam diretamente a evaporação dos solventes e o comportamento reológico do esmalte. O controle contínuo desses parâmetros evita variações indesejadas na espessura e na aderência do revestimento.

Por fim, a adoção de sistemas informatizados de registro de dados de produção e ensaio permite o rastreamento completo de cada lote de fio, desde a matéria-prima até o produto final. Esse nível de controle garante a confiabilidade das informações, facilita a análise de causa raiz em caso de falha e reforça o cumprimento dos requisitos normativos e de clientes. A rastreabilidade, portanto, é um elemento indispensável para a consolidação de um processo de fabricação estável, previsível e em conformidade com os padrões de qualidade internacionais.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Objeto de estudo**

O estudo foi desenvolvido com base em amostras industriais de fios de cobre Classe 200 °C, bitola 22 AWG (diâmetro nominal de 0,643 mm), produzidos em linha contínua sob condições controladas de processo. O sistema de isolamento utilizado é composto por uma camada base de poliéster-imida (PEI) e uma sobrecamada de poliamida-imida (PAI) na proporção aproximada de 80/20%. Esse sistema foi selecionado por ser amplamente empregado em aplicações que exigem alta resistência térmica e estabilidade dielétrica, como motores compactos e transformadores de média potência.

As amostras foram coletadas diretamente da linha de produção após a conclusão do processo de esmaltação, preservando as características originais de fabricação. Cada

bobina foi devidamente identificada e separada conforme o lote de produção, permitindo a rastreabilidade dos parâmetros de linha e dos resultados obtidos nos ensaios. O estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar a conformidade do esmalte com os requisitos normativos e identificar os fatores que contribuíram para as falhas detectadas em testes funcionais, correlacionando-os com as variáveis de processo.

As análises foram realizadas de acordo com os métodos prescritos pelas normas ANSI/NEMA MW 1000 e IEC 60851, que definem os critérios de aceitação e os procedimentos para verificação de propriedades dimensionais, mecânicas, elétricas e térmicas de fios esmaltados.

### 3.2 Condições de processo

Durante a fabricação das amostras, monitoraram-se as principais variáveis operacionais da linha de esmaltação, com foco na estabilidade térmica, na viscosidade do esmalte e na velocidade de linha. As zonas de recozimento operaram em temperatura média de 580 °C, assegurando o alívio de tensões do cobre e a remoção de impurezas superficiais. A zona de cura do esmalte manteve temperatura média de 470 °C, responsável pela reticulação completa da camada polimérica. A velocidade de linha foi controlada em 180 m/min, com variação máxima de  $\pm 5$  m/min, garantindo uniformidade na deposição e na espessura do filme.

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

A umidade relativa do ar na área de aplicação foi mantida próxima a 48%, e a temperatura ambiente em torno de 25 °C, de modo a evitar variações reológicas no

esmalte e interferências no processo de evaporação dos solventes. O sistema de exaustão e filtragem do forno garantiu a remoção eficiente dos vapores, prevenindo o acúmulo de resíduos e garantindo estabilidade térmica ao longo da linha.

Todos os equipamentos utilizados foram calibrados conforme os procedimentos internos da empresa e as recomendações dos fabricantes. O controle e o registro dos parâmetros foram realizados por meio de planilhas de acompanhamento e gráficos de controle de processo, assegurando rastreabilidade completa das variáveis durante o período de produção analisado.

### **3.3 Ensaios realizados**

As amostras de fios de cobre Classe 200 °C, bitola 22 AWG (0,643 mm de diâmetro nominal), foram submetidas a uma sequência completa de ensaios normativos, realizados conforme as metodologias descritas nas normas ANSI/NEMA MW 1000 e IEC 60851, com o objetivo de verificar a conformidade das propriedades dimensionais, mecânicas, elétricas e térmicas. Todos os testes foram executados em ambiente laboratorial controlado, com equipamentos devidamente calibrados e registros de cada etapa assegurando a rastreabilidade dos resultados.

Os ensaios dimensionais consistiram na medição do diâmetro do condutor nu, do diâmetro total com o esmalte e do acréscimo de revestimento, de modo a confirmar se os valores estavam dentro das tolerâncias especificadas para a bitola analisada. O diâmetro do condutor foi obtido após a remoção cuidadosa do esmalte por raspagem controlada, enquanto o diâmetro total foi medido mantendo-se a camada isolante intacta. O acréscimo de esmalte foi calculado pela diferença entre ambos os diâmetros. De acordo com a norma NEMA MW 1000, o acréscimo de esmalte para fios 22 AWG da Classe 200 °C deve estar compreendido entre 0,053 e 0,079 mm. Todas as amostras analisadas apresentaram conformidade geométrica dentro desse intervalo, demonstrando estabilidade dimensional do processo de aplicação.

Nos ensaios mecânicos, foram realizados testes de alongamento e ângulo de recuo do condutor, seguidos dos ensaios de aderência e flexibilidade. O alongamento à ruptura foi determinado em máquina de tração, medindo-se a porcentagem de deformação até a ruptura do fio. O valor mínimo exigido pela norma é de 27%, e as amostras analisadas apresentaram média de 25%, indicando uma leve redução de ductilidade, embora ainda dentro de margem aceitável para o processo. O ângulo de recuo, que mede a capacidade

de retorno elástico do fio após deformação, apresentou média de 45°, dentro do intervalo especificado (44°–48°), confirmando que o recozimento e a trefilação mantiveram o nível adequado de relaxamento do cobre.

O ensaio de aderência e flexibilidade foi executado enrolando-se o fio em um mandril metálico de diâmetro proporcional à bitola, realizando-se oito voltas completas. Em seguida, aplicou-se fita adesiva sobre o enrolamento, que foi removida rapidamente para avaliar a ocorrência de destacamentos do esmalte. O critério de aprovação exige ausência de fissuras ou deslocamentos. As amostras analisadas apresentaram destacamento parcial do revestimento, expondo o cobre em regiões localizadas, o que caracteriza reprovação nesse teste e indica baixa ancoragem entre o esmalte e o substrato metálico.

O ensaio de resistência à abrasão (scrape test) foi conduzido aplicando-se uma carga constante sobre o fio enquanto uma lâmina realizava movimento alternado até a exposição do condutor. Foram registradas a força e o número de ciclos até o rompimento do filme isolante. Para fios de 22 AWG Classe 200 °C, os valores de referência são de no mínimo 600 g (mínimo) e 700 g (médio). As amostras apresentaram valores de 480 g (mínimo) e 560 g (médio), resultando em reprovação, o que reforça a hipótese de subcura e baixa coesão interlaminar do esmalte.

Nos ensaios elétricos, foi aplicado o teste de continuidade, também conhecido como *pinhole*, com o objetivo de detectar discontinuidades microscópicas no filme. O método consiste em submeter o fio a uma tensão definida em banho condutivo, enquanto sensores automáticos registram o número de falhas. O limite máximo permitido pela norma é de 15 falhas em 30 metros de fio. As amostras apresentaram 26 falhas no mesmo comprimento, caracterizando não conformidade e evidenciando presença de poros ou bolhas de ar na camada isolante.

A rigidez dielétrica foi avaliada aplicando-se uma tensão alternada progressiva entre o condutor e um eletrodo metálico envolvente até a ruptura do isolamento. O limite mínimo estabelecido pela norma para fios Classe 200 °C é de 4.600 V. O valor médio obtido nas amostras foi de 2.500 V, indicando falha do filme em suportar a tensão de ruptura e confirmando a perda de resistência elétrica associada à presença de microdefeitos.

O choque térmico foi realizado enrolando-se o fio em mandril metálico e submetendo as amostras a uma temperatura de 220 °C por 30 minutos, seguida de resfriamento em temperatura ambiente. Após o ensaio, as espiras foram inspecionadas

visualmente, sendo constatadas trincas e destacamentos em três das cinco amostras avaliadas. Esse comportamento evidencia a fragilidade térmica do esmalte e a baixa densidade de reticulação do polímero curado.

Por fim, a resistência elétrica do condutor foi medida a 20 °C utilizando microhímetro de alta precisão, verificando-se o valor médio de 52,35  $\Omega$ /km, dentro da faixa normativa para fios de cobre 22 AWG. Esse resultado confirma que o condutor metálico apresenta propriedades elétricas conformes e que as falhas detectadas estão restritas ao esmalte.

Todas as medições foram realizadas em duplicata, com descarte de leituras inválidas e cálculo de valores médios e dispersão. Os resultados foram registrados em planilhas de controle de processo e comparados aos limites especificados pelas normas aplicáveis. A análise estatística dos dados permitiu verificar consistência, repetitividade e tendência de comportamento entre amostras, servindo como base para a discussão apresentada no capítulo seguinte.

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

Testes realizados	Unidades de medidas	Límite 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
Velocidade de linha	m/min	170 – 190	180
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	$\Omega$ /km	51,93 - 53,93	52,35

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

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

A etapa de resultados e discussões tem por objetivo avaliar o desempenho do fio esmaltado a partir dos ensaios normativos e interpretar as não conformidades à luz do referencial teórico. Os resultados obtidos permitem identificar quais propriedades atenderam aos requisitos e quais apresentaram desvios, possibilitando correlacionar causas prováveis no processo de esmaltação.

### **4.1 Condições operacionais e estabilidade do processo**

Os parâmetros operacionais apresentados na Tabela 2 indicaram processo estável durante a produção: zonas de recozimento em 580 °C, zona de cura em 470 °C, velocidade de linha de 180 m/min e umidade relativa próxima de 48%. Esses valores se mantiveram dentro das faixas usuais para a Classe 200 °C, sugerindo reprodutibilidade térmica e cinemática adequadas. Assim, eventuais não conformidades tendem a estar associadas predominantemente às características do revestimento (formulação e/ou efetividade da cura), e não a oscilações operacionais significativas.

### **4.2 Desempenho dimensional e mecânico**

Os ensaios dimensionais (diâmetro do condutor, diâmetro externo e acréscimo de esmalte) demonstraram conformidade geométrica com a janela prevista pela NEMA para 22 AWG/Classe 200 °C, incluindo o acréscimo nominal entre 0,053 mm e 0,079 mm. Esses dados confirmam deposição uniforme e controle dimensional adequado.

Nos ensaios mecânicos do condutor, o ângulo de recuo apresentou média de 45°, dentro da faixa de 44° a 48° exigida, validando o tratamento térmico do cobre e a estabilidade da trefilação. O alongamento à ruptura resultou em 25 %, ligeiramente abaixo do mínimo normativo de 27 %. Embora esse déficit indique pequena perda de ductilidade, ele não é suficiente, por si só, para comprometer o comportamento mecânico global do condutor, nem explica as reprovações observadas no esmalte.

### 4.3 Desempenho do esmalte isolante

A aderência e a flexibilidade reprovaram: após enrolamento em mandril e remoção da fita, houve destacamento parcial do filme com exposição localizada do cobre. Esse resultado aponta interface frágil cobre-polímero e coesão interlaminar insuficiente. Na resistência à abrasão (scrape), os valores obtidos foram 480 g (mínimo) e 560 g (médio), inferiores aos referenciais de 600 g (mínimo) e 700 g (médio) para 22 AWG/200 °C, caracterizando reprovação. A dureza superficial reduzida é compatível com filme com densidade de reticulação abaixo do ideal.

No ensaio de continuidade (*pinhole*), registraram-se 26 falhas/30 m, excedendo o limite máximo de 15 falhas/30 m. O alto número de descontinuidades indica porosidade e regiões de espessura efetiva reduzida.

Na rigidez dielétrica, obteve-se ruptura em 2 500 V, abaixo do mínimo exigido de 4 600 V para a Classe 200 °C, evidenciando capacidade de isolamento insuficiente do revestimento.

No choque térmico (220 °C por 30 min), 3 de 5 amostras apresentaram trincas e deslocamentos após o ciclo, confirmando baixa resistência do filme a variações bruscas de temperatura e compatível com rede polimérica incompletamente curada.

Por outro lado, a resistência elétrica do condutor a 20 °C resultou em 85,8  $\Omega$ /km, dentro do limite NEMA ( $\leq 86,0 \Omega$ /km) para 22 AWG, o que confirma integridade do cobre base e afasta a hipótese de contribuição do material metálico para as falhas observadas no isolamento.

### 4.4 Análise integrada e relação causa-efeito

A combinação dos resultados (aderência/flexibilidade reprovadas, abrasão inferior ao mínimo, excesso de pinholes, baixa rigidez dielétrica e falhas em choque térmico), frente à conformidade dimensional e à resistência elétrica do cobre, é típica de condição de subcura do esmalte. Em termos de mecanismo, a energia térmica efetiva de cura (função de perfil de temperatura, tempo de residência e remoção de solventes) não foi suficiente para promover a reticulação desejada em todo o volume do filme, deixando regiões menos coesas e com aderência deficiente. Esse estado reduz a dureza e a resistência à abrasão, facilita delaminação sob flexão e gera porosidade, o que diminui a

espessura dielétrica efetiva e, por consequência, o valor de ruptura elétrica. A congruência entre os ensaios confere robustez a essa interpretação.

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

As não conformidades do esmalte elevam o risco de falhas entre espiras em motores e transformadores, com aumento de perdas, formação de hotspots e redução da vida útil do isolamento. Em operação, a presença de poros e a baixa rigidez dielétrica favorecem descargas localizadas e curto-circuitos internos, levando a paradas não programadas e custos de manutenção mais altos. Do ponto de vista fabril, a reincidência de reprovações impacta diretamente a produtividade e o custo da não qualidade.

### **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Com base nos ensaios realizados e nos resultados apresentados, constatou-se que o processo de esmaltação manteve conformidade dimensional e estabilidade operacional, assegurando controle adequado das etapas de trefilação, recozimento e deposição do esmalte. No entanto, os resultados de desempenho mecânico, elétrico e térmico indicaram falhas significativas no revestimento isolante, caracterizando condição de subcura.

As reprovações observadas nos ensaios de aderência, abrasão, continuidade, rigidez dielétrica e choque térmico apontam para uma densidade de reticulação insuficiente na matriz polimérica, ocasionando baixa coesão entre camadas e deficiência na ancoragem ao cobre. A subcura leva à formação de regiões menos compactas e porosas, reduzindo a resistência à abrasão e à ruptura elétrica. Esses resultados demonstram que as falhas são intrínsecas ao esmalte, e não ao condutor metálico, cuja resistência elétrica e propriedades geométricas se mantiveram dentro dos limites normativos.

Conclui-se, portanto, que a principal causa das não conformidades está associada à etapa de cura do esmalte, em especial à estabilidade térmica e ao tempo de residência nas zonas do forno. Pequenas variações nessas condições comprometem o equilíbrio entre evaporação dos solventes e reticulação da resina, gerando o comportamento não conforme observado.

Para evitar recorrência dessas falhas, recomenda-se o reforço no controle de processo, com monitoramento contínuo da viscosidade do esmalte e do perfil térmico do

forno, além de mapeamento periódico das zonas de aquecimento. Também são essenciais a rastreabilidade dos lotes, a calibração frequente dos instrumentos de medição e o treinamento dos operadores quanto à detecção de sintomas visuais de subcura. A implementação dessas ações pode reduzir o número de reprovações e elevar a confiabilidade do produto final.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar a investigação por meio de análises laboratoriais específicas que permitam confirmar a hipótese de subcura e caracterizar o esmalte em diferentes condições de processo. Ensaios complementares de envelhecimento térmico e estudos de variação da viscosidade ao longo do tempo também podem contribuir para estabelecer correlações entre a estabilidade do verniz e o desempenho dielétrico. Além disso, seria relevante avaliar a influência de alterações no perfil térmico de cura e na composição da resina sobre as propriedades finais do isolamento, possibilitando o desenvolvimento de um modelo preditivo de comportamento do esmalte em função dos parâmetros de processo.

## **ABSTRACT (em Inglês)**

*Enameled copper wires are essential components in motors, transformers, and high-efficiency electrical systems, where the insulating enamel acts as both a dielectric barrier and mechanical protection for the conductor. In Class 200 °C applications, enamel failures can compromise insulation integrity, leading to short circuits and premature breakdowns. This study analyzes the main failure mechanisms of insulating enamel applied to Class 200 °C copper wires, correlating experimental results with process parameters and technical standards. Samples of 22 AWG wires coated with PEI/PAI (80/20%) were tested for dimensional, mechanical, electrical, and thermal properties according to ANSI/NEMA MW 1000 and IEC 60851 standards. The operational conditions (580 °C, 470 °C, and 180 m/min) remained stable, ensuring process reproducibility. The results showed dimensional and electrical conformity of the conductor but revealed enamel failures in adhesion, abrasion, continuity, dielectric strength, and thermal shock. The evidence indicates under-curing and low polymer cross-link density as the most probable causes of non-conformities, associated with the formation of micro-cracks and porosity. It is concluded that the reliability of the insulation depends directly on strict thermal and rheological control of the enamel, as well as on the periodic verification of its structure through chemical and thermal analyses.*

**Keywords:** *enameled wire, insulating enamel, failures, tests, Class 200 °C.*

## REFERÊNCIAS

- ALTANA ELECTRICAL INSULATION GMBH. *Titanate catalysis in polyesterimide wire enamels*. Wesel, 2012.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE; NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. *ANSI/NEMA MW 1000: Magnet Wire Standard*. Rosslyn, VA: NEMA, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D1676 – Standard Test Methods for Electrical Insulating Varnishes*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024.
- ANTON, R.; FUNER, M.; THEIS, F. *In-situ curing control of electrical insulation coatings*. IEEE CEIDP, 2006.
- 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.
- 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.
- BAUR, T. Dielectric loss tangent analysis of polymeric insulations under AC stress. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 30, n. 3, p. 844–852, 2023.
- 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.
- CONDU PASQUA. *Ovalização e tolerâncias dimensionais em fios esmaltados*. São Paulo, 2021.
- CRESWELL, J. W.; CLARK, V. L. P. *Pesquisa de métodos mistos*. 3. 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. 35–47, 2023.
- DEMIRI, S. Effect of mechanical fatigue on insulation failure in magnet wires. *Electrical Insulation Conference (EIC)*, p. 1–5, 2014.
- ELANTAS. *Processing Guidelines for Wire Enamels*. Wesel: Elantas Electrical Insulation, 2023.
- ESSEX GROUP INC. *Copper Wire Surface Preparation and Adhesion Improvement Techniques*. Indiana: Essex Brownell, 2020.

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.

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

HÖPNER, M. Solvent systems for wire enamels: rheology and application windows. *Wire & Cable Technology International*, v. 48, n. 3, p. 54–58, 2021.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). *IEC 60317; IEC 60851-5; IEC 60085: Winding wires – Test methods and thermal classes*. Geneva: IEC, 2019.

ISO. *ISO 9001:2015 – Quality management systems – Requirements*. Geneva: ISO, 2015.

KATO, T. et al. Partial discharge endurance of nanoparticle-modified enamel coatings. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 10, n. 2, p. 321–328, 2003.

LEE, H. et al. Dielectric and mechanical performance of nanoparticle-enhanced enamels. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 15, n. 4, p. 1187–1194, 2008.

MA, Y. et al. Comparative thermal performance of polyimide and polyesterimide enamels. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 147, p. 211–220, 2024.

MWS WIRE INDUSTRIES. *Mechanical properties and test guidance for magnet wire*. Oswego, IL, 2024.

NASA. *Coatings and Surface Treatments for High Reliability Applications*. Washington, D.C.: NASA Technical Report, 2001.

PAULSSON, B. et al. *Enameled Copper Wire Handbook*. 2. ed. Stockholm: MWS Group, 2021.

REMINGTON INDUSTRIES. *Magnet wire technical data*. Chicago, IL, 2023.

RUGGED MONITORING. *Partial discharge monitoring for rotating machines*. Quebec, 2022.

STONE, G. C.; CULBERT, I.; BOULTER, E. A. *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. 2. ed. Hoboken: IEEE Press, 2014.

VAKULENKO, A. Solvent evaporation control in wire enamel curing. *Wire Industry Journal*, v. 42, p. 33–37, 2021.

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