

Falhas no Isolamento dos Motores de Tração em Corrente Contínua

José Luiz Borba *

* VALE S.A. - *Capacitação e Inovação*

Av. Dante Michelini, 5500, CEP: 29090-900 - Vitória - Espírito Santo

* UFES – *Departamento de Engenharia Elétrica*

Av. Fernando Ferrari, 514, CEP: 29075-910 - Vitória - Espírito Santo

e-mail: jose.borba@vale.com

Resumo

O presente trabalho consiste em enumerar as falhas dos motores de tração em corrente contínua pertencentes às frotas de locomotivas da Vale e definir as características e as causas das que estão relacionadas com o sistema isolante.

São relacionados testes elétricos nos motores de tração com o objetivo de avaliar se os mesmos estão em condições de serem colocados em funcionamento, sob o ponto de vista de seu sistema isolante e detectar, através de medidas periódicas, problemas de sujeira, umidade e até mesmo o enfraquecimento do sistema isolante.

Palavras-Chave: Locomotivas, Motor de Tração, Sistema de Isolamento, Testes Elétricos

1 Falhas

As falhas nos motores de tração podem ser de origem elétrica ou mecânica.

Essas duas categorias de falhas podem ainda ser subdivididas em alguns tipos de problemas, com suas características e causas.

São considerados como modos de falhas mais frequentes:

- Armadura aterrada
- Pinhão solto
- *Flashover*

- Campo aterrado
- Interpolo aterrado
- Armadura em curto
- Campo aberto
- Escova solta
- Cabos avariados
- Coletor ovalizado
- Baixa isolação
- Interpolo aberto

Existem causas que são responsáveis pela ocorrência da maioria das falhas.

As principais são a vibração e problemas com o sistema isolante dos motores.

A vibração excessiva é uma das causas mais evidentes da falha *Campo Aberto*, enquanto que a fadiga precoce dos materiais isolantes é uma das principais causas dos modos de falha: *Armadura Aterrada*, *Campo Aterrado* e *Interpolo Aterrado*.

1.1 Vibração

A vibração excessiva que é causada, principalmente, pelo desgaste no acoplamento entre a coroa do rodeiro e o pinhão do motor de tração, contribui para todos os modos de falha.

Dependendo das condições do acoplamento coroa-pinhão, danos significativos são provocados por choques e vibrações de frequências mais altas gerados no mesmo, os quais são transmitidos à armadura e ao estator do motor de tração.

Se há uma perfeita envolvente dos dentes da coroa e do pinhão, a rotação constante do pinhão produz rotação constante da coroa.

Entretanto, um mínimo desvio na envolvente, seja na coroa ou no pinhão, produz, quase que instantaneamente, uma pequena variação na rotação entre as engrenagens, o que leva a rápidos e grandes incrementos na carga dos dentes de ambas e no torque dos eixos da armadura e do rodeiro.

Em casos extremos, o incremento no torque aplicado ao eixo pode ser grande o suficiente para produzir pequenos deslizamentos no rodeiro (micro patinações) correspondentes a cada engrenamento dos dentes.

Essas patinações ocorrem a intervalos igualmente espaçados, proporcionais à distância entre os dentes da coroa e do pinhão.

O desgaste excessivo nos mancais do eixo do rodeiro pode ser uma das causas do desalinhamento entre a coroa e o pinhão.

Esse desalinhamento é caracterizado por cavitações ou desgastes não-uniformes no pinhão.

As mudanças de velocidade, que são acompanhadas das variações de torque, prejudicam seriamente o enleamento da armadura.

O enleamento no lado oposto ao comutador gira com um movimento inercial enquanto o eixo e o pacote magnético giram rapidamente com a variação de velocidade.

Isso causa trincas e desgastes no material isolante, levando-o à fadiga e provocando aterramentos e curtos-circuitos no enleamento e, também, explica o alto índice dos modos de falha: *Armadura Aterrada*, *Interpolo Aterrado* e *Campo Aterrado*.

As variações de alta frequência produzem vibrações correspondentes no rolamento lado pinhão.

Essas vibrações provocam esforços em toda estrutura do estator, ocasionando falhas por fadiga em inúmeros componentes.

As fadigas provocadas na caixa das engrenagens (caixa de graxa, caixa de óleo) ocasionam trincas na estrutura da caixa ou nas fixações que seguram as duas metades, ocasionando uma rápida perda do material lubrificante do acoplamento, levando a danos irreparáveis no eixo, tampas, retentores e rolamentos.

1.2 Isolação

O sistema isolante dos motores de tração geralmente consiste de isolação entre

espiras, isolação para a massa, estecas, amarrações e vernizes de impregnação.

A vida de um motor de tração é grandemente determinada pelo material isolante, que é afetado por muitos fatores.

As bobinas de armadura, de campo e de interpolo de um motor de tração devem apresentar excelentes características de isolação e boas propriedades de troca térmica, o que lhes assegura uma operação em temperaturas menos altas e boas características de impermeabilização.

Portanto, a escolha de um sistema isolante deve levar em consideração as propriedades elétricas, mecânicas, químicas e térmicas dos materiais.

1.2.1 Propriedades dos Materiais Isolantes

As propriedades dos materiais isolantes variam largamente com a temperatura, umidade, limpeza, tensão e duração do tempo de aplicação da mesma.

As análises do comportamento, características e propriedades dos materiais isolantes são relativamente complexas, as quais exigem amplos conhecimentos no campo da física e química.

➤ Rigidez Dielétrica

A rigidez dielétrica é o máximo valor de tensão que o material suporta sem a perda de suas propriedades isolantes.

Ao aumentar progressivamente a diferença de potencial V entre dois condutores separados por um material isolante, aumenta-se a quantidade de carga Q recebida pelos mesmos.

A partir de um certo valor de V , o material isolante deixa de funcionar bruscamente como isolante sendo atravessado por uma corrente elétrica.

O valor da diferença de potencial correspondente, referido à unidade de espessura do material isolante [kV/mm], é a resistência dielétrica ou rigidez dielétrica.

O valor da rigidez dielétrica de um certo material isolante depende de vários fatores, tais como:

- Espessura do isolante
- Temperatura
- Duração da aplicação de V
- Taxa de crescimento de V
- Frequência de v

➤ Resistência de Isolação

Ao aplicar uma diferença de potencial V contínuo a dois condutores separados por um material isolante, ocorre uma circulação de corrente, dada pela expressão:

$$i = i_f + i_a + i_c$$

i_f ⇒ corrente de fuga - é uma componente constante correspondente a corrente que realmente circula pelo material isolante, através da sua massa, ou pela sua superfície;

i_a ⇒ corrente de absorção - é a corrente proveniente da polarização dos condutores, que pode levar alguns minutos a várias horas para desaparecer;

i_c ⇒ corrente capacitiva - é a corrente proveniente da carga da capacitância, que se extingue rapidamente.

A resistência elétrica oferecida à circulação da corrente de fuga é a resistência de isolamento.

A resistência de isolamento só deve ser medida após o desaparecimento da corrente de absorção, o que, de acordo com a *Lei de Ohm*, vai implicar num aumento da resistência de isolamento com o passar do tempo.

A Figura 1 apresenta o comportamento das correntes.

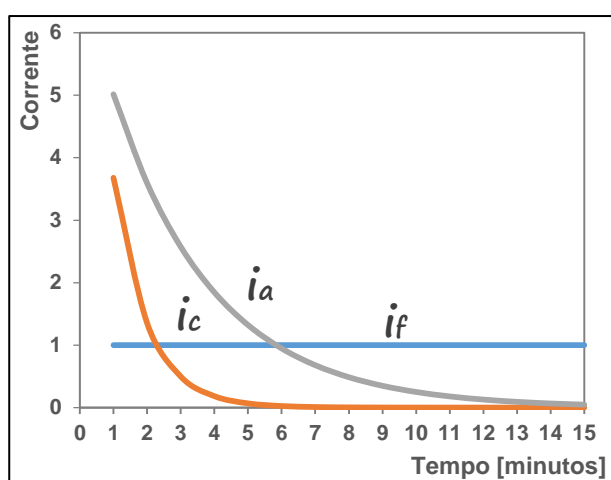


Figura 1 - Comportamento das correntes

➤ Resistência Mecânica

As propriedades mecânicas dos materiais isolantes, tais como: flexibilidade, resistência ao rompimento, capacidade de adesão, são importantes, pois o motor de tração, como consequência natural de seu funcionamento, é submetido a vibrações mecânicas que perduram por toda a sua vida.

➤ Transferência de Calor

O motor de tração quando em funcionamento produz calor, que é gerado por *Efeito Joule* nos condutores, por perdas no ferro dos núcleos e pela própria corrente de fuga que atravessa o material isolante, entre outros.

Os materiais isolantes devem funcionar como bons transmissores de calor para o ambiente a fim de manter a temperatura interna dentro dos limites estabelecidos.

Caso contrário, os efeitos da elevação de temperatura provocam um aumento dos vãos na estrutura do material e um aumento da movimentação de íons por agitação térmica.

Esses dois efeitos acontecendo simultaneamente causam um aumento da condutibilidade do material, provocando a rápida deterioração.

➤ Estabilidade Química

A estrutura do material isolante não deve ser alterada por reações químicas, principalmente com agentes presentes na atmosfera. A maioria dos isolantes sólidos é higroscópica e a umidade tende a diminuir a resistência mecânica e elétrica do material, e causar dissociação iônica, liberando uma maior quantidade de íons livres por unidade de volume.

1.2.2 Falhas do Sistema Isolante

As perdas das propriedades dielétricas não são as únicas que influenciam na degradação do sistema isolante.

Antes disso, ele pode vir a falhar por perdas das propriedades mecânicas, químicas, térmicas e outros agentes.

A ação interna dos fatores degenerativos dos sistemas isolantes como altos gradientes de tensão, sobre temperaturas, aceleram o processo de degradação do isolante, sendo seu efeito ainda de natureza cumulativa.

Assim, um sistema isolante poderá ter sua vida útil reduzida se submetido

frequentemente a solicitações elétricas, térmicas ou mecânicas superiores às normais ou se exposto à ação de fatores ambientais como umidade, presença de ozona, radiações ultravioletas e outros.

As causas principais de falhas do sistema isolante das bobinas da armadura e do estator são:

➤ **Degradação Térmica**

A aplicação de materiais isolantes termicamente subdimensionados ou a exposição do motor de tração a temperaturas elevadas por um longo período de tempo, leva à carbonização do material isolante, alterando sua estrutura e propiciando perdas por *Efeito Corona*.

Têm-se, como inevitáveis, consequências como aparecimento de correntes de fuga e enfraquecimento da resistência mecânica.

A durabilidade de um motor de tração pode ser reduzida drasticamente, se seus enrolamentos forem submetidos a um sobreaquecimento superior àquele para o qual foi projetado.

Um aumento de 8 a 10 °C na temperatura da isolação reduz vida útil do isolante pela metade.

Quando falamos em diminuição da vida útil do isolante, não nos referimos às temperaturas elevadas, quando o isolante é destruído repentinamente.

A vida útil da isolação em termos de temperatura de trabalho, bem abaixo daquela em que o material se queima, refere-se ao envelhecimento gradual, em que o isolante vai se tornando ressecado, perdendo o poder

isolante, até que não suporte mais a tensão aplicada e produz o curto-circuito.

Dentre os fatores que aceleram a degradação térmica tem-se:

- Operação do motor em ambientes de temperatura superior à de projeto;
- Operação do motor com carga superior à de projeto;
- Restrição do sistema de ventilação;
- Impedimento, por pó e sujeira, da passagem de ar pelos enrolamentos.

Para fins de normalização, os materiais isolantes e os sistemas de isolamento (cada um formado pela combinação de vários materiais) são agrupados em classes de isolamento, cada qual definida pelo respectivo limite de temperatura, ou seja, pela maior temperatura que o material pode suportar continuamente sem que seja afetada a sua vida útil.

A classe de isolamento utilizada nos motores de tração, conforme a norma NBR 7094, é a *Classe H*, cujo limite de temperatura é de 180 °C.

➤ **Danos por Contaminação**

A retenção de contaminantes, como: umidade, poeiras condutivas, agentes químicos ou partículas abrasivas, pelos vazios no conjunto do enrolamento acarretam em falhas.

Por serem estacionários, os componentes dos polos e suas interligações coletam poeira, sujeira e outros contaminantes que são soprados através do motor durante sua operação.

Podem ocorrer danos, se os elementos agressivos em suspensão no meio ambiente, como umidade, pó condutor e óleo, penetrarem no sistema isolante das bobinas, levando à redução da resistência de isolamento entre enrolamento e carcaça, entre bobinas e entre espiras da bobina.

Uma simples inspeção pode determinar se há presença de pó de carvão, óleo, umidade ou partículas abrasivas.

A existência de áreas desgastadas nos locais de maior incidência do fluxo de ar da ventilação, ou seja, em dutos, núcleos e cabeças de bobinas, é evidência de abrasão por partículas em suspensão.

Outra indicação de dano químico é a degradação das propriedades físicas dos materiais isolantes.

Contaminantes químicos atacam a isolamento do enrolamento, amolecendo, degradando ou formando pontos fracos que reduzem a eficiência do sistema isolante.

➤ **Abrasão Mecânica**

A abrasão mecânica mostrou ser a maior origem das falhas em enrolamentos e é causada por movimentos rotativos devido a folgas entre:

- Bobinas e ranhuras;
- Esteca e fundo da ranhura;
- Cabeças das bobinas;
- Bobina e núcleo;
- Bobina e anéis de amarrações;
- Condutores de uma mesma bobina.

Esses movimentos causam, além da abrasão na isolação, cunhas soltas e deterioração generalizada no enrolamento.

1.2.3 Degradação do Sistema Isolante

Os fatores de degradação de um sistema isolante são distribuídos da seguinte forma:

➤ **Durante a Fabricação dos Materiais Isolantes**

- Baixa qualidade dos elementos;
- Danos aos elementos durante a preparação;
- Formulação inadequada;
- Introdução de sistemas contaminantes;
- Acondicionamento e manuseio.

➤ **Durante a Aplicação dos Materiais Isolantes nas Bobinas**

- Erros de projeto e especificação;
- Distorções no processo;
- Introdução de substâncias contaminantes;
- Problemas de processo;
- Inexperiência e falta de cuidado dos aplicadores;
- Problemas de ferramental;
- Ausência de controle do processo.

➤ **Durante o Armazenamento**

- Transporte e manuseio incorreto;
- Contaminações;
- Armazenamento inadequado.

➤ **Com as Bobinas Montadas no Motor**

- Transporte;
- Manuseio incorreto;
- Componentes dimensionados incorretamente;
- Contaminações;
- Temperatura excessiva nas interligações;
- Utilização de ferramentas incorretas;

- Pessoas inexperientes;
- Testes destrutivos.

➤ **Quando da Aplicação no Motor**

- Aplicação inadequada com relação ao tipo;
- Tamanho;
- Ciclo de trabalho;
- Ambiente.

➤ **Quando da Operação do Motor**

- Fontes de calor interna e externa;
- Esforços mecânicos;
- Distúrbios elétricos;
- Efeito Corona;
- Operação abusiva;
- Atmosferas químicas;
- Poeira abrasiva;
- Umidade e água.

1.2.4 Rupturas do Sistema Isolante

Um material isolante será levado à ruptura se a solicitação elétrica a ele imposta superar a sua rigidez dielétrica.

O valor da tensão em que ocorre a ruptura é denominada de tensão de ruptura e, no caso específico de isolantes sólidos, tensão de perfuração.

As rupturas em isolantes sólidos são classificadas da seguinte forma:

➤ **Perfuração por Efeito Elétrico**

A *perfuração por efeito elétrico* ocorre através da destruição das propriedades dielétricas do material devido exclusivamente ao campo elétrico.

O processo acontece num tempo extremamente curto (10^{-8} s).

A ruptura se inicia quando as partículas livres carregadas, aceleradas pelo campo elétrico, colidem contra a superfície do condutor e do dielétrico sólido culminando em aquecimentos localizados.

Os materiais isolantes comerciais possuem normalmente estruturas não homogêneas, uma vez que, são fabricados pela combinação de diferentes materiais ou geralmente possuem bolhas de ar ou fissuras internas.

Dessa maneira, o campo elétrico não se distribui uniformemente ao longo da estrutura do material, mas na razão inversa das constantes dielétricas das diversas camadas. Camadas com baixa constante dielétrica ficarão submetidas a um alto gradiente de tensão podendo ocorrer sua ruptura pelo que é conhecido como solicitação localizada.

Algo similar ocorre quando da presença de ar entre as camadas do material isolante ou entre o condutor e o isolante.

A eliminação desses espaços é feita com resinas sem solvente utilizando a impregnação de resina a vácuo pressão (*Vacuum Pressure Impregnation - VPI*).

No processo de confecção, as bobinas do estator podem ser cobertas por uma fita de fibra de vidro impregnada com borracha de silicone.

Passam por um processo de vulcanização e, simultaneamente, são prensadas em todos os lados.

O processo de vulcanização se dá pela passagem de uma alta corrente através da

bobina, gerando calor suficiente para vulcanizar a borracha de silicone.

A isolação com borracha de silicone vulcanizada é insubstituível, dispensando totalmente a impregnação com resina pelo sistema VPI, uma vez que, se forem utilizados materiais de boa qualidade e um processo de prensagem e vulcanização controlado, a possibilidade de presença de bolhas de ar entre as espiras das bobinas é quase nula.

Objetivando o preenchimento de vazios, ao final do processo de montagem da armadura e da instalação das bobinas no estator, tanto a armadura como a carcaça do motor devem sofrer a aplicação de resina pelo processo de VPI, seguido de cura em estufa.

A resina proporciona uma melhora na transferência de calor pela ausência de vazios, além de auxiliar na redução das vibrações e na eliminação da possibilidade de entrada de umidade e contaminantes.

Na armadura, a resina, além de travar as bobinas nas ranhuras do pacote laminado, auxilia no travamento das cabeças de bobinas.

Entretanto, é muito difícil remover todo o ar, preenchê-lo com a resina e mantê-la neste espaço até que se solidifique.

Para isso, é imprescindível que a resina seja extremamente fina e de alta qualidade, não contenha solvente e sua solidificação seja quase instantânea.

Além disso, é necessário total controle sobre o processo.

Se a camada de ar for submetida a campos elétricos maiores que o seu campo elétrico de ruptura, haverá sobrecarga elétrica e será

tanto maior quanto menor for a espessura da camada, acarretando em ionização do ar e descargas parciais, as quais degradarão progressivamente o isolante, através do ataque localizado, levando-o à ruptura completa.

➤ **Perfuração por Efeito Térmico**

A transferência de calor das bobinas para o ambiente configura-se como um dos mais importantes fatores do projeto e no rendimento do motor de tração.

Além do efeito elétrico na perfuração do isolante, a presença de bolhas ou camadas de ar no material isolante ou entre este e o condutor, prejudica enormemente a transferência de calor entre as bobinas e o ambiente.

As perdas por efeito Joule ou por histerese provocam aquecimentos localizados que são dissipados no material isolante.

O aumento da temperatura do isolante faz com que as perdas aumentem ainda mais e assim sucessivamente.

Se o calor desenvolvido não for equilibrado pela troca térmica com o ambiente, haverá carbonização do isolante e a ruptura poderá ocorrer com tensões bastante reduzidas.

➤ **Perfuração por Efeito Químico**

Podem ocorrer perfurações químicas devido à oxidação, instabilidade química, hidrólise, incompatibilidade de materiais e outros.

A facilidade com que um material isolante reage com outras substâncias é característica de instabilidade química, que é fortemente influenciada pela temperatura.

➤ **Perfuração por Descarga Artificial**

A descarga elétrica superficial pode culminar na abertura de um caminho de corrente pela superfície do isolante, devido à carbonização da mesma.

A ação térmica, além de diminuir a tensão de ruptura do isolamento, também tem como efeitos nocivos à redução da resistência mecânica do isolamento, o aumento das perdas dielétricas e a aceleração do processo de ionização.

A ação térmica carboniza o material, reduzindo seu volume, criando vãos livres e poros no seu interior e propiciando condições de degradação do isolante por descargas parciais.

Um material isolante carbonizado, por outro lado, ainda que possua rigidez dielétrica suficiente para continuar operando por mais algum tempo, em condições normais e sem altas solicitações, não possui resistência mecânica e poderá ser destruído na primeira solicitação eletrodinâmica a que for submetido.

Por fim, tem-se que o aumento de temperatura cria condições ou acelera o processo de degradação e ruptura química do material.

1.3 Testes Elétricos

A realização de testes elétricos em motores tem como objetivo avaliar se os mesmos estão em condições de serem colocados em funcionamento, sob o ponto de vista de seu sistema isolante e detectar, através de medidas periódicas, problemas de sujeira,

umidade e até mesmo o enfraquecimento do sistema isolante.

➤ **Resistência de Isolação**

O teste de resistência de isolação é usado quando é desejável obter-se uma rápida avaliação do sistema isolante do motor.

Com esse teste determina-se a resistência entre os condutores e a terra (massa).

Vale ressaltar que a resistência se altera com a temperatura, devido a isso, as normas estipulam que, para um motor novo limpo e seco a 40 °C, o valor mínimo aceitável para a resistência de isolamento é:

$$R_m = V_N + 1$$

R_m ⇒ Resistência de isolamento mínima em [M&];

V_N ⇒ Tensão nominal do motor em [kV].

Assim, um motor de 4 kV deverá apresentar uma resistência de isolamento mínima de 5 M&.

Caso a medida seja realizada em temperatura diferente, é necessário que seja feita uma correção para 40 °C através da seguinte expressão:

$$R_c = K_t \cdot R_t$$

R_c ⇒ Resistência de isolação corrigida para 40°C em [M&];

K_t ⇒ Coeficiente de temperatura da resistência de isolação na temperatura t

R_t ⇒ Resistência de isolação medida na temperatura t em [M&].

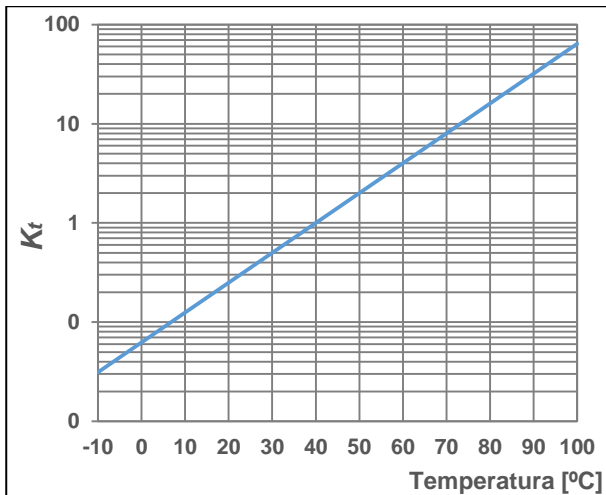


Figura 2 - Adequação de temperatura para 40 °C

Os valores de K_t podem ser obtidos através do gráfico representado na Figura 2.

Uma baixa resistência indica que o motor está contaminado ou contém umidade.

Testes periódicos de resistência de isolamento, se incluídos no programa de manutenção de rotina, podem ajudar a detectar problemas de isolamento, antes que eles causem falhas.

➤ Índice de Polarização

Em testes de grandes motores, os altos valores das capacitâncias dificultam a realização do teste de resistência de isolamento, devido ao longo tempo de carga.

O teste de índice de polarização pode ser usado para obtenção de uma indicação imediata das condições do sistema isolante do motor.

O índice de polarização é a razão entre a leitura de resistência de isolamento a um minuto e a dez minutos do início da aplicação do teste.

A resistência a dez minutos é, normalmente, significativamente maior que aquela medida a um minuto.

$$IP = \frac{R_{10}}{R_1}$$

IP ⇒ Índice de Polarização

R_{10} ⇒ Resistência de isolamento após 10 minutos

R_1 ⇒ Resistência de isolamento após 1 minuto

É importante notar que o valor do índice de polarização é independente da temperatura, por se tratar de uma razão entre duas medidas efetuadas praticamente a mesma temperatura.

Frequentemente, um valor elevado do índice de polarização indica que o sistema isolante está em boas condições, e um baixo valor sugere que a isolamento está se tornando suja e úmida.

Um valor do índice de polarização menor que “1” indica que uma ação deve ser aplicada.

Uma limpeza e/ou secagem podem restaurá-lo a valores aceitáveis.

Isso pode ser observado através da Figura 3, que mostra tendência decrescente da resistência de isolamento, a qual foi “recuperada” após limpeza e tratamento.

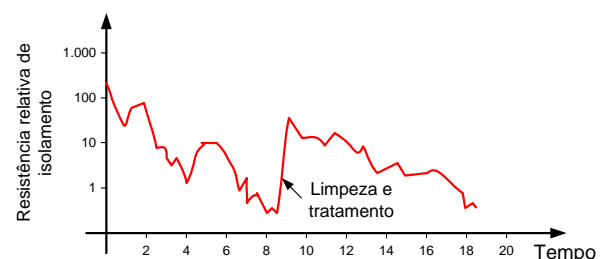


Figura 3 - Resistência de Isolamento

Os valores obtidos durante o teste podem ser classificados conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Condições de isolamento

Índice de Polarização	Condições da Isolação
< 1	Danificada
1 a 2	Questionável
2 a 4	Boa
> 4	Excelente

➤ Índice de Absorção

O índice de absorção é a razão entre a resistência de isolação, medida após a aplicação de um ensaio de tensão por um minuto, e a resistência de isolação medida após a aplicação do mesmo ensaio de tensão por meio minuto.

$$IA = \frac{R_1}{R_{1/2}}$$

IA ⇒ Índice de Absorção

R_1 ⇒ Resistência de isolação após 1 minuto

$R_{1/2}$ ⇒ Resistência de isolação após ½ minuto

A Figura 4 mostra a evolução da Resistência de Isolação e os pontos de avaliação do Índice de Absorção e de Polarização.

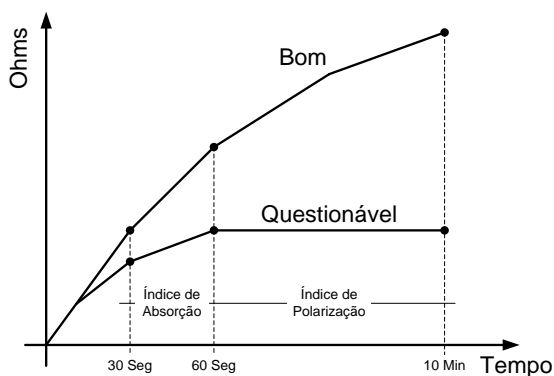


Figura 4 - Evolução das resistências de isolação

➤ Teste de Perdas no Núcleo da Armadura

As perdas no núcleo da armadura devido às correntes parasitas produzem aumento da

sua temperatura, e, conseqüentemente, aumento da temperatura das outras partes do motor, fazendo com que a vida do motor seja reduzida.

O aumento das perdas no núcleo se dá devido à alteração das características magnéticas dos grãos orientados do material das lâminas que compõem o pacote laminado.

Esta alteração ocorre principalmente em função do aquecimento excessivo da armadura e da aplicação de reversões de grande intensidade ao motor de tração, isto é, inversão de sentido de deslocamento com a locomotiva se deslocando em velocidades relativamente elevadas, o que causa circulação de correntes muito elevadas pelos circuitos do motor, originando uma brusca elevação da temperatura além de *flashover*.

O teste de perdas no núcleo (*Core Loss Test*) é realizado conforme o circuito mostrado na Figura 5.

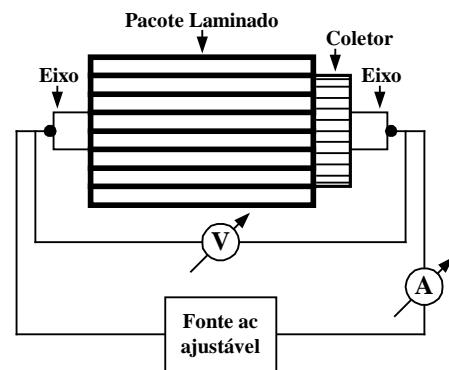


Figura 5 - Arranjo para teste de perdas no núcleo da armadura

Variando-se a corrente fornecida pela fonte ac de 60 Hz ajustável até 1.000 A, obtém-se a curva de magnetização da armadura, marcando-se em um gráfico os valores da tensão entre as pontas do eixo e da corrente

que circula pelo eixo e pelo pacote laminado da armadura.

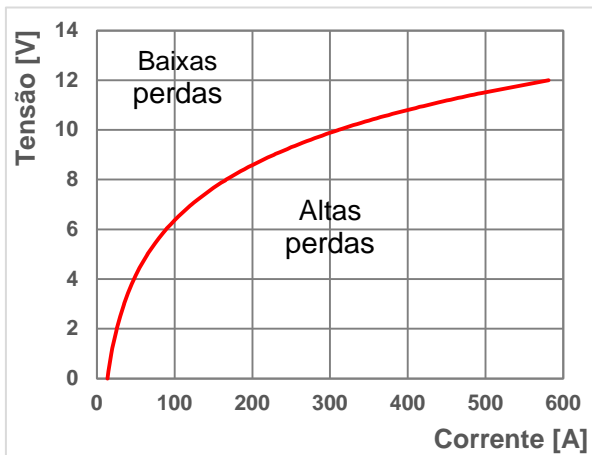


Figura 6 - Curva de magnetização padrão da armadura EMD

Podemos verificar, por comparação com uma curva de magnetização tomada como padrão, se a armadura analisada está ou não em condições de utilização.

➤ Pontos Quentes no Núcleo da Armadura

Os pontos quentes recebem essa denominação porque, na região do pacote laminado da armadura que ocupam, há uma elevação de temperatura devido à grande concentração de correntes parasitas quando do funcionamento do motor.

Esse aquecimento provoca a *queima* do isolante das bobinas próximas a região, provocando uma baixa isolamento e conseqüente curto-circuito da bobina para o pacote laminado.

Os pontos quentes podem ser causados quando a armadura estiver girando, roçar a superfície de seu pacote laminado nos núcleos das bobinas de campo ou de interpolo, devido à solda dos núcleos ou a avarias no eixo da armadura ou nos

rolamentos, causando amassamento na superfície do pacote laminado, dando origem a curto-circuito nas extremidades das lâminas que compõem o pacote.

O manuseio errado e descuidado da armadura durante sua permanência na oficina para execução de reparos pode causar danos semelhantes ao pacote laminado.

Pontos quentes também podem ocorrer devido ao aterramento das bobinas da armadura para o pacote laminado, que provoca a *soldagem* de algumas lâminas próximas ao ponto onde se dá a passagem de corrente da armadura para o pacote.

Para verificar a existência de pontos quentes ao longo da superfície do pacote laminado da armadura, monta-se a ligação mostrada na Figura 7.

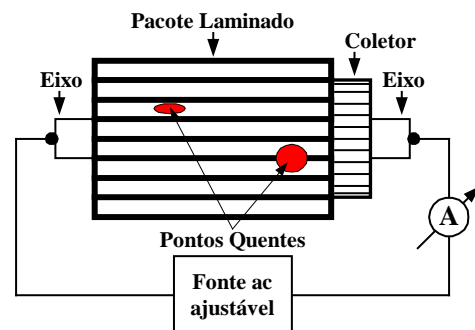


Figura 7 - Arranjo para verificação de pontos quentes no núcleo de armadura

Mantendo-se circulando pelo eixo da armadura uma corrente de aproximadamente 200 A, por um período de 20 minutos, e com o auxílio das mãos e de equipamentos de medição de temperatura à distância, observa-se à existência de pontos onde a temperatura se apresenta mais elevada do que a temperatura do restante do corpo do pacote laminado.

Somente estaremos na presença de um ponto quente se a temperatura nesse ponto for superior em 10 °C a temperatura do restante do corpo do pacote laminado.

Caso seja constatada a existência de um ponto quente, será necessário um reembalamento do pacote.

Por ser um procedimento de difícil execução e custo elevado, deve-se fazer uma avaliação da extensão da área ocupada pelo ponto quente, e tomar a decisão de manter a armadura em funcionamento para melhor aproveitamento, mesmo sabendo que sua vida está comprometida.

➤ **Perdas no Núcleo das Bobinas de Campo**

De modo semelhante com o que acontece ao pacote laminado da armadura, os núcleos laminados das bobinas de campo, denominados de sapata polar, podem apresentar perdas por correntes parasitas, que provocam aumento da temperatura das bobinas de campo e, por conseguinte, das outras partes do motor, concorrendo para a redução da sua vida útil.

O teste de perdas na sapata polar é realizado conforme o circuito mostrado na Figura 8.

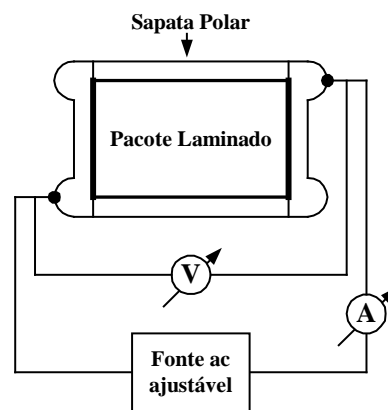


Figura 8 - Arranjo para teste de perdas no núcleo das bobinas de campo

Variando-se a corrente fornecida pela fonte ac de 60 Hz ajustável até 1.000 A, obtém-se a curva de magnetização da sapata polar, marcando-se em um gráfico os valores da tensão entre as pontas da sapata polar e da corrente que circula pela mesma.

Podemos verificar, por comparação com uma curva de magnetização tomada como padrão, se a sapata polar analisada está ou não em condições de utilização.

A utilização de sapatas polares com diferentes curvas de magnetização nos polos de um mesmo motor pode causar um desbalanceamento do fluxo magnético, que provoca a aplicação de mini torques ao eixo do motor, que causam fadigas no eixo, e com o tempo levam a sua quebra.

Mini torques também são aplicados ao conjunto engrenagem-pinhão, causando-lhes fadigas e desgastes, que com o tempo também produzem quebras dos dentes dos mesmos.

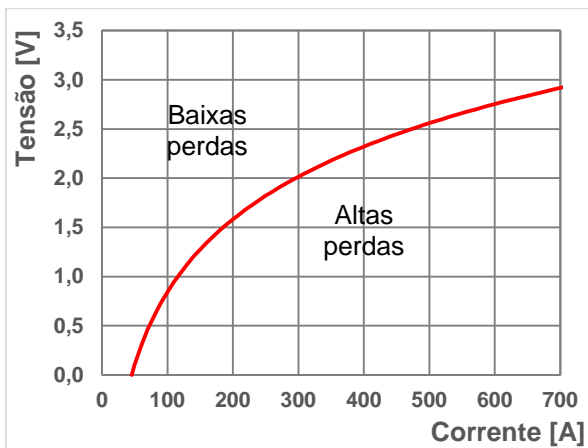


Figura 9 - Curva de magnetização padrão do núcleo da bobina de campo EMD

➤ Pontos Quentes no Núcleo das Bobinas de Campo

Os pacotes laminados dos núcleos das bobinas de campo, da mesma maneira e pelos mesmos motivos do pacote laminado da armadura, podem apresentar pontos quentes.

Os pontos quentes podem ser causados quando a armadura estiver girando, roçar a superfície de seu pacote laminado nos núcleos das bobinas de campo, devido à solda dos núcleos ou a avarias no eixo da armadura ou nos rolamentos, causando amassamento na superfície do pacote laminado das sapatas polares, dando origem a curto-circuito nas extremidades das lâminas que compõem o pacote.

Também o manuseio errado e descuidado da sapata polar durante sua permanência na oficina para execução de reparos pode causar danos semelhantes ao pacote laminado.

Para verificar a existência de pontos quentes ao longo da superfície do pacote laminado da sapata polar, monta-se a ligação mostrada na Figura 10.

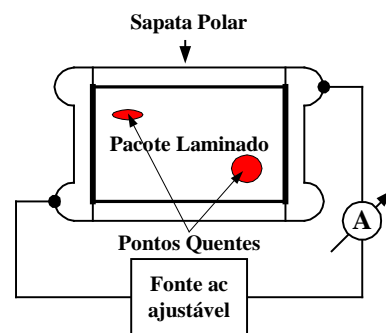


Figura 10 - Arranjo para verificação de pontos quentes no núcleo das bobinas de campo

Mantendo-se circulando pela sapata polar uma corrente de aproximadamente 200 A, por um período de 20 minutos, e com o auxílio das mãos e de equipamentos de medição de temperatura à distância, observa-se à existência de pontos onde a temperatura se apresenta mais elevada do que a temperatura do restante do corpo do pacote laminado.

Somente estaremos na presença de um ponto quente se a temperatura nesse ponto for superior em 10 °C a temperatura do restante do corpo do pacote laminado.

Caso seja constatada a existência de um ponto quente no pacote laminado deve-se descartar a utilização da sapata polar.

➤ Baixa Isolação nos Suportes de Fixação dos Porta Escovas

O material isolante dos suportes dos porta escovas sofre degradação ao longo do tempo de utilização.

Como verificar a que ponto atingiu essa degradação?

Pode-se fazê-lo por intermédio do arranjo mostrado na Figura 11.



Figura 11 - Verificação das condições do material isolante

As esferas proporcionam o envolvimento por completo da superfície do corpo do suporte, fazendo com que seja aplicada a diferença de potencial entre o corpo do porta escovas e a superfície do suporte.

A tensão do *Hypot* é elevada até um nível de 3.000 V.

Caso haja fuga de corrente pelo suporte para tensões inferiores a esse valor máximo, significa que o suporte está com baixa isolação, devendo ser substituído.

Uma baixa isolação no suporte do porta escovas provocará um baixo índice de polarização do motor, além de um aterramento do circuito de armadura.

➤ **Surge-Teste**

O equipamento denominado *Surge-Teste* é eficaz instrumento na avaliação e detecção de curto entre espiras em bobinas de motores.

Consiste basicamente de um capacitor que descarrega numa indutância (bobina ou enrolamento em teste).

O equipamento possui dois circuitos semelhantes, o que permite utilizá-lo em duas bobinas.

As formas de ondas obtidas são mostradas num osciloscópio de duplo canal.

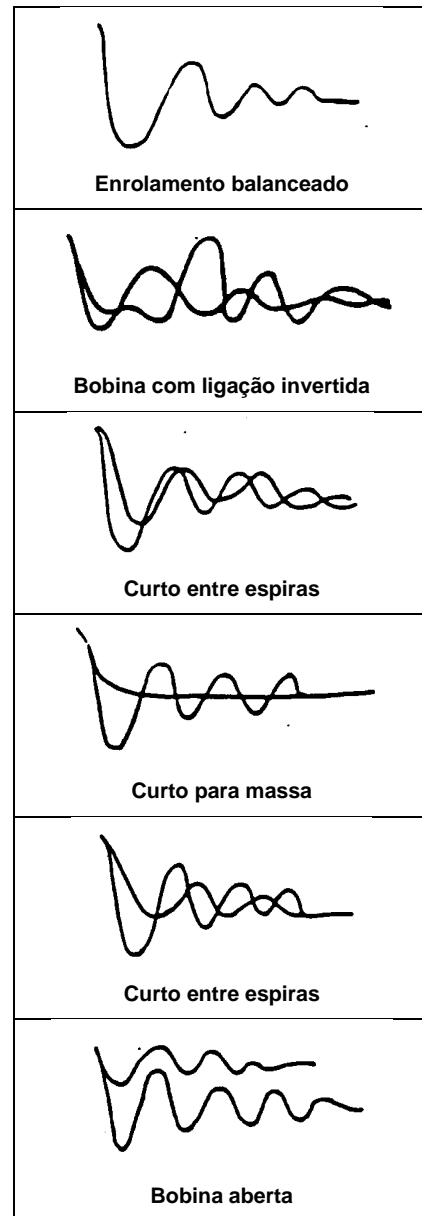


Figura 12 - Formas de onda características

A sobreposição das duas ondas permite detectar bobinas com falha de isolação entre espiras.

A Figura 12 retrata algumas formas de onda características.

Esse mesmo teste pode ser realizado na fase completa, ou seja, comparando-se duas fases.

Entretanto, para grandes máquinas, seriam necessários grandes equipamentos, o que não é viável, daí a alternativa de realizar o ensaio em cada bobina, antes da instalação.

Caso o isolamento de ambas as bobinas seja adequado para a tensão aplicada, uma forma de onda estável será observada.

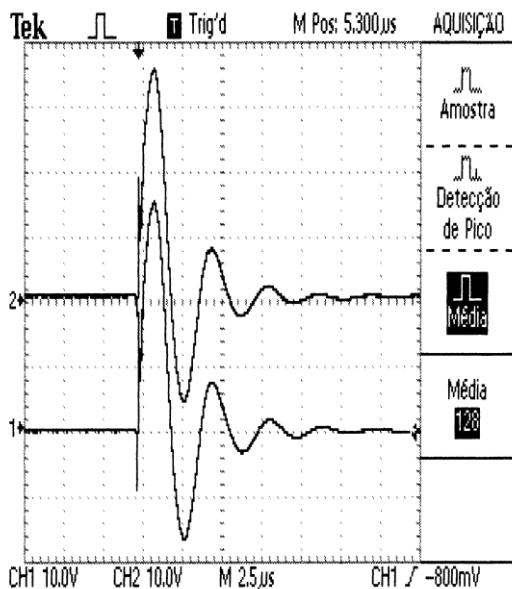


Figura 13 - Bobina com isolamento adequado

Contudo, se o isolamento de uma das bobinas sob teste não suportar mais o nível de tensão aplicada, duas formas de onda distintas serão observadas no osciloscópio. As duas formas de onda distintas poderão ser observadas mesmo em caso de um curto circuito com elevada resistência ou durante um colapso momentâneo do isolamento.

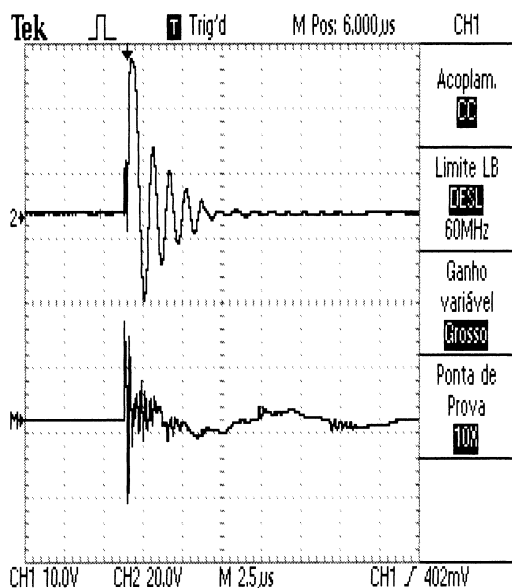


Figura 14 - Bobina curto-circuitada

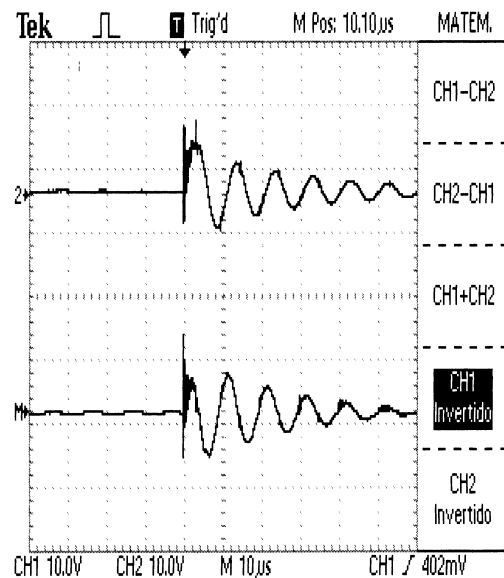


Figura 15 - Curto-circuito entre espiras

2 Conclusões

Mesmo que aparentemente os motores de tração sejam máquinas bastante simples, são necessários grandes cuidados durante a execução dos serviços de sua recuperação, uma vez que suas condições de trabalho são extremamente severas.

Quanto aos cuidados a serem tomados a fim de reduzir as falhas de isolamento podemos destacar:

- **Armazenamento dos componentes**

Devem ser respeitadas as regras básicas de armazenamento, tais como manuseio adequado, empilhamento correto (por exemplo, um máximo de quatro bobinas de campo), proteção contra poeiras e umidade, etc.

- **Condições de execução dos serviços de substituição e montagem das bobinas na carcaça**

O ambiente deve ser extremamente limpo, isento de limalhas metálicas e de poeiras abrasivas e condutoras.

O manuseio das bobinas deve ser extremamente cuidadoso, evitando choques das mesmas contra superfícies contundentes que possam causar desgastes, ou até mesmo cortes na superfície do isolante.

- **Bobinas de campo e de interpolo**

Realizar teste de isolamento de todas as bobinas de campo e de interpolo (novas ou usadas) antes de serem aplicadas no motor.

- **As superfícies da carcaça**

As superfícies da carcaça para assentamento das bobinas de campo e interpolo devem ser totalmente limpas e isentas de qualquer calosidade, rugosidade ou outra forma de saliência que possa provocar ruptura do isolante.

- **Material Isolante**

O material isolante colocado entre a superfície da carcaça e as bobinas, deve ter a espessura e as dimensões adequadas.

- **Molas e sapatas polares**

As molas e as sapatas polares não devem apresentar arestas cortantes que podem causar abrasão ou cortes no material isolante das bobinas.

- **Núcleos das bobinas de campo e de interpolo**

As bobinas de campo e de interpolo devem ser montadas com núcleos que apresentem baixa perdas, o que evita o aquecimento e a consequente *queima* do isolante das mesmas.

As bobinas de campo e de interpolo devem ser montadas com núcleos de igual curva de

magnetização, o que evita desbalanceamento dos fluxos e os consequentes mini torques no eixo, que podem causar fadigas, seguidas muitas vezes de quebra do eixo.

- **Aplicação de torque**

Garantir a aplicação do torque nominal nos parafusos de fixação das bobinas de campo e de interpolo a carcaça durante a montagem.

O torquímetro utilizado deve ser aferido regularmente.

- **Parafusos de fixação das bobinas**

Utilizar parafusos de fixação das bobinas de campo e de interpolo a carcaça conforme as especificações do fabricante.

- **Porta escovas**

Realizar teste de isolamento dos suportes de fixação de todos os porta escovas antes de serem instalados na carcaça, o que garantirá um melhor índice de polarização.

- **Bobinas de armadura**

Providenciar melhorias no sistema de isolamento das bobinas de armadura próximo as extremidades das ranhuras, principalmente nas bobinas que são posicionadas por cima.

- **Pontos quentes**

Verificar a existência de pontos quentes no pacote laminado das armaduras como forma de reduzir aterramentos e aumento da temperatura.

- **Núcleos das armaduras**

Substituir os núcleos de armaduras envelhecidas que apresentem perdas

elevadas e causam aquecimento excessivo das partes do motor, reduzindo sua vida útil.

- **Motores com grande número de defeitos**

Trazer para a oficina os motores que apresentam grande número de defeitos para realização de uma verificação dos motivos que os estão levando a ter este comportamento.

- **Manutenção preventiva**

Definir um plano de ação para cumprir o procedimento de manutenção preventiva definido pelos fabricantes, isto é, realizar o processo de rejuvenescimento no motor.

- **Truques da locomotiva**

Definir um plano de ação para recuperação dos truques das locomotivas, visando reduzir o nível da vibração aplicada aos motores por molas quebradas, estruturas desalinhadas, sistema de freio desregulado, o que produz os vários tipos de falhas de isolamento dos motores de tração.

Encarando a manutenção dos motores de tração como um ponto crítico do processo de manutenção das locomotivas, que requer uma grande quantidade de capital todos os anos, somente mantendo uma vigilância constante e permanente da qualidade dos materiais utilizados e dos serviços executados, é que se pode garantir uma longa vida útil sem interrupções de seu funcionamento.

Não existe uma receita que possa resolver definitivamente todos os problemas da manutenção dos motores de tração.

No entanto, o somatório de algumas medidas poderá trazer resultados significativos.

Convém ressaltar que é de extrema importância o aprofundamento do estudo e busca constante de melhorias através de pesquisas, treinamento e conscientização de todos.

3 Referências Bibliográficas

- [1] **Traction Motors - Recommended Practices** - General Motors Corporation - Electro Motive Division - 1994
- [2] **Grandes Motores e Geradores Horizontais de Corrente Contínua** - General Electric do Brasil
- [3] **Manutenção de Motores e Geradores** - ABB - Asea Brown Boveri
- [4] CAVAZZONI, Fernando A. - **Motor Elétrico de Tração de Corrente Contínua** - 1ª ed - Editora o Lutador - 2008.
- [5] KOSOW, Irwin L. - **Máquinas Elétricas e Transformadores** - 15ª ed - Editora Globo - 1996.
- [6] Alfonso Martignoni - **Máquinas Elétricas de Corrente Contínua** - Editora Globo
- [7] Gritlet, Irineu - **Estudo Sobre Falhas em Motores de Tração de Locomotivas Diesel-elétricas da RFFSA - SR 5** - Curso de Pós-Graduação em Gerência da Manutenção - CEFET-PR. Curitiba - 1995