



Avaliação do lubrificante para operação de mancais em máquinas elétricas girantes

Gabriel Chagas Storti
WEG - Energia
Brasil
storti@weg.net

Aleksander Kokot
WEG - Motores
Brasil
aleksander@weg.net

Resumo - A lubrificação deficiente é uma das maiores causas de falhas de mancais, incluindo mancais de máquinas elétricas girantes. Este artigo descreve boas práticas e recomendações para a definição do lubrificante a fim de maximizar a vida do mancal além das expectativas previstas em cálculo. Alguns fatores são determinantes na escolha do lubrificante apropriado para cada tipo de mancal e sua aplicação.

1 INTRODUÇÃO

Máquinas elétricas girantes possuem um rotor o qual é responsável por agrupar as chapas laminadas montadas em um eixo. Os mancais permitem a rotação do eixo mantendo a correta folga entre as chapas do rotor e do estator com o menor atrito possível. A grande quantidade de particularidades da máquina elétrica, como a posição de montagem, velocidade de rotação, diâmetros de eixo e diferentes carregamentos radiais e axiais, é a justificativa para entender a grande variação de tipos de mancais e diferentes lubrificantes e formas de lubrificação. Este artigo considera os principais tipos de mancais utilizados na WEG, os quais são mancais hidrodinâmicos lubrificados a óleo, e mancais de rolamentos que podem ser lubrificados a graxa ou a óleo.

Uma correta lubrificação é necessária para prevenir falhas prematuras e em alguns casos maximizar a vida do mancal além das expectativas calculadas. Falhas de mancais são consideradas as maiores responsáveis das falhas observadas em motores elétricos (41%), conforme um estudo de confiabilidade em motores de grande porte acima de 200 HP [1].

2 MANCAIS HIDRODINÂMICOS

O estado da arte da lubrificação hidrodinâmica atesta um plano inclinado com um ângulo " α " relativo a um plano horizontal, sob a ação de uma carga " F " e com uma velocidade horizontal " U ", relativa a um plano horizontal estacionário. Se o contato entre as superfícies é seco, resultaria em significativo atrito e desgaste, porém quando é fornecido uma quantidade suficiente de lubrificante e a velocidade de deslizamento é suficientemente alta, as superfícies são completamente separadas por um filme de óleo espesso. Nesse caso uma condição de lubrificação hidrodinâmica completa é alcançada.

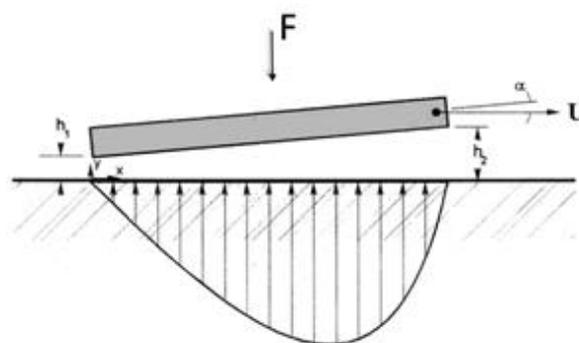


Figura 1: Plano deslizante na lubrificação hidrodinâmica. Figura adaptada do livro "Bearing Design in Machinery - Engineering Tribology and Lubrication" [2]

Na lubrificação hidrodinâmica, a viscosidade " μ " é uma característica do fluido extremamente importante uma vez que esta é responsável pela sustentação da carga aplicada ao mancal nas condições de rotações desejadas.

A viscosidade é sensível a temperatura, sendo que para ambos os óleos de base mineral e/ou sintética, a viscosidade diminui (óleo fica mais fluido) à medida que a temperatura aumenta. No entanto, óleo sintético possui menor sensibilidade a variação de temperatura quando comparado com óleo mineral. Óleos sintéticos possuem maior índice de viscosidade (IV).

A tribologia é uma ciência bastante complexa, a qual gera uma grande preocupação durante o projeto de um mancal hidrodinâmico. O problema tribológico possui as variáveis fundamentais acopladas, ou seja, para uma específica carga rotação e viscosidade de óleo, a temperatura do filme de óleo aumenta e conseqüentemente a viscosidade decresce, bem como a espessura do filme de óleo que afeta a forma da distribuição de pressão e novamente interfere na temperatura do filme hidrodinâmico. Em uma análise de lubrificação termo-elástica-hidrodinâmica (TEHD), considera-se também as variáveis de deformação



térmica e elástica do mancal durante o cálculo e dimensionamento. O processo de cálculo geralmente é iterativo até a convergência do resultado.

2.1 ÓLEO LUBRIFICANTE PARA MANCAIS HIDRODINÂMICOS

A viscosidade " μ " é o coeficiente de proporcionalidade em um fluido viscoso. Óleo de mancal é um fluido Newtoniano, onde a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento é linear conforme a equação abaixo:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

τ : tensão de cisalhamento

μ : viscosidade absoluta

du/dy : gradiente de velocidade

A Figura 2 mostra o movimento relativo entre duas partículas no fluido e a existência da tensão de cisalhamento.

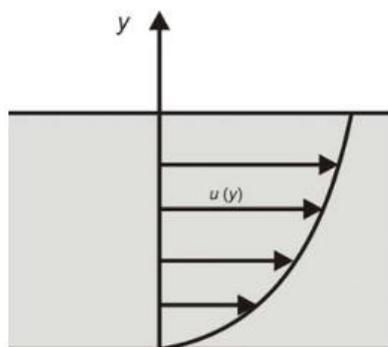


Figura 2: Tensão de cisalhamento devido ao movimento do fluido

Óleos são fluidos praticamente incompressíveis, esta propriedade simplifica algumas equações, pois a massa específica " ρ " pode ser considerada constante. Muitas das equações da mecânica dos fluidos, como a equação de Reynolds, incluem a razão da viscosidade absoluta com a massa específica do fluido. Esta razão é denominada viscosidade cinemática " ν ":

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Eq. 2}$$

A viscosidade cinemática possui no sistema universal (SI) a unidade em m^2/s , porém é muito comum encontrá-la em cm^2/s ou Stokes (St). Adicionalmente uma unidade ainda menor

utilizada é o centi-Stokes (cSt), equivalente a mm^2/s .

A fim de organizar essas informações, alguns membros da organização de óleos lubrificantes decidiram criar o sistema ISO VG.

O objetivo deste sistema de classificação é estabelecer uma série de níveis de viscosidade cinemática predefinidas, assim os fornecedores de lubrificantes, usuários de lubrificantes e projetistas de equipamentos terão uma base uniforme e comum para designar ou selecionar lubrificantes líquidos industriais de acordo com a viscosidade cinemática exigida em um aplicação particular.

Esta classificação de viscosidade utiliza-se do valor da viscosidade cinemática a 40°C, e limita a variação em 10% para cada lado do valor nominal conforme ISO 3448 [3].

Outra característica relevante para uma especificação correta do óleo lubrificante é o IV. O qual representa uma medida empírica comum do nível de variação da viscosidade com a temperatura. O IV de qualquer tipo de óleo é determinado pela seguinte equação:

$$IV = 100 \times \frac{L - U}{L - H} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

L: viscosidade cinemática a 100°F do IV = 0

H: viscosidade cinemática a 100°F do IV = 100

U: viscosidade cinemática a 100°F do óleo testado

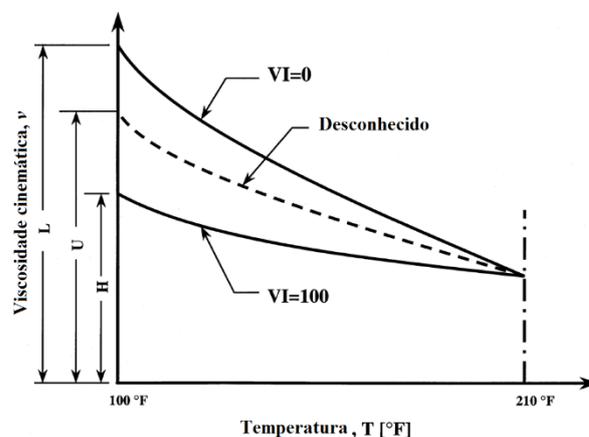


Figura 3: Ilustração do índice de viscosidade (IV). Figura traduzida do livro "Bearing Design in Machinery - Engineering Tribology and Lubrication" [2]

Assim, torna-se óbvio que um óleo com índice de viscosidade mais alto é desejável em mancais hidrodinâmicos, uma vez que não há alteração significativa da viscosidade durante a operação. Os óleos sintéticos possuem IV superior aos óleos minerais, o que os tornam indispensáveis quando



a estabilidade da viscosidade em alta temperatura é necessária.

De acordo com Harnoy [2], algumas das vantagens dos óleos sintéticos são:

- A viscosidade é menos sensível com variação de temperatura (alto IV);
- Ponto de fluidez relativamente baixo;
- Boa resistência à oxidação e ao envelhecimento;
- Possuem a desejada baixa volatilidade.

Em contrapartida, os óleos lubrificantes sintéticos possuem maior custo e devem ser utilizados quando possam ser financeiramente justificados.

A WEG recomenda para lubrificação de mancais hidrodinâmicos, óleos minerais e sintéticos em acordo com as normas DIN 51524-1 HL [4] e/ou DIN 51517-2 CL [5], as quais especificam lubrificantes com presença de aditivos protetivos contra corrosão e oxidação, e são utilizados em sistemas hidráulicas de baixa pressão. Óleos em conformidade com as normas DIN 51524-2 HLP [6] e/ou DIN 51517-3 CLP [7] também são permitidos, porém aditivos antidesgaste (AW) devem ser isentos de zinco.

Outra relevante informação relacionada aos óleos lubrificantes de mancais hidrodinâmicos utilizados em máquinas da WEG é a presença de aditivos de extrema pressão (EP), o qual é proibido devido a existência de componentes sólidos que podem danificar o metal patente (*Babbitt*). Esses aditivos também são irrelevantes neste tipo de mancal uma vez que não há contato entre eixo e mancal sob alta pressão o qual geraria sua ativação.

3 MANCAIS DE ROLAMENTO

Mancais de rolamento possuem significativamente menor perda por atrito do que mancais hidrodinâmicos. Existem diversos tipos de rolamentos a fim de suportar os variados tipos de carregamentos radiais e axiais em diferentes condições operacionais. Os tipos de rolamentos mais comuns utilizados na WEG são rolamentos rígidos de esferas (DGBB); rolamentos de esferas de contato angular (ACBB); rolamentos de rolos cilíndricos (CRB), rolamentos axiais autocompensadores de rolos (SRTB); rolamentos autocompensadores de rolos (SRB); e rolamentos de rolos cônicos (TRB).

Adicionalmente ao menor atrito, a ação de rolagem deste tipo de mancal causa menos desgaste quando comparado com mancais hidrodinâmicos aplicados em máquinas elétricas girantes submetidas a constantes períodos de partida e parada, ou seja, em condições que o mancal

hidrodinâmico não possui rotação suficiente para uma formação completa do filme de óleo lubrificante, mesmo quando sujeito a uma baixa pressão específica.

A maior desvantagem do mancal de rolamento é o limite de vida a fadiga causado por elevadas tensões cíclicas de contato. Todo rolamento possui um tempo de vida calculado conforme a norma internacional ISO 281 [8], que especifica métodos de cálculo da carga dinâmica básica e métodos de cálculo de vida a fadiga (L10), que representa a vida associada a 90% de confiabilidade, com comum utilização de material com alta qualidade, bem como boa qualidade de fabricação e com condições de operação convencionais.

Na última versão da ISO, foram adicionados métodos para calcular a vida nominal modificada, incluindo fatores de confiabilidade, condição de lubrificação, contaminação, e carga de fadiga do rolamento. Os fatores de modificação podem aumentar ou reduzir em mais de 10 vezes a vida útil básica do rolamento

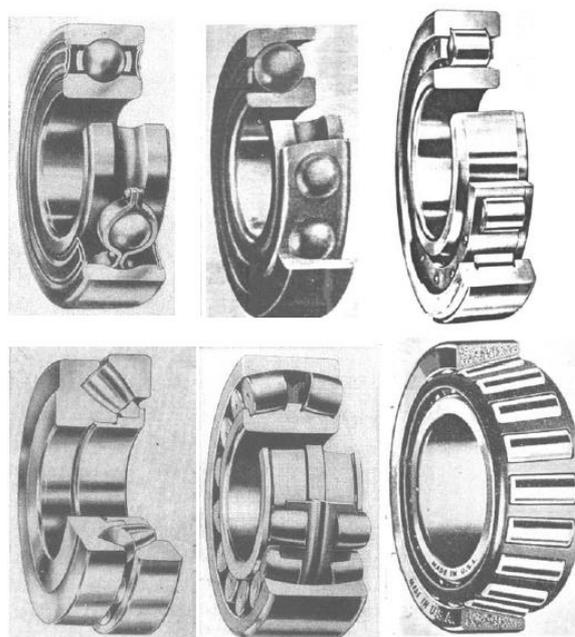


Figura 4: Tipos de rolamentos padrões utilizados pela WEG. Da esquerda para direita e de cima para baixo: DGBB; ACBB; CRB, SRTB, SRB, e TRB. Figuras reimpressas do livro "Bearing Design in Machinery - Engineering Tribology and Lubrication" [2]

3.1 LUBRIFICAÇÃO DE MANCAIS DE ROLAMENTO

Como em mancais hidrodinâmicos, os mancais de rolamentos requerem um filme de lubrificação mínimo na área de contato para uma completa lubrificação elastohidrodinâmica (EHD), resultando significativamente na redução do desgaste.



Consequentemente espera-se uma vida útil do rolamento muito maior quando comparado com um rolamento com contato a seco ou lubrificação insuficiente.

De acordo com Tallian [9], a fadiga de superfície que pode ser seguida por um início prematuro de fragmentação, significa lubrificação deficiente, ou seja, que os parâmetros EHD e/ou de lubrificação limite são inadequados para as condições operacionais e para a superfície geométrica selecionada. Alguns testes indicaram que a vida a fadiga é significativamente melhorada para rolamentos operando com um filme EHD completo. A teoria das tensões de contato de Hertz considera a deformação elástica e a distribuição de tensão próximo ao contato entre o elemento rolante e as pistas do rolamento. A ISO 281 [8] menciona o limite de carga estática (C_0) do rolamento, e alguns fabricantes incluem este parâmetro em catálogos de produto. É importante verificar qualquer sobrecarga transitória no rolamento durante a partida de operação ou em regime permanente. O contato de Hertz e a distribuição de pressão do filme EHD são semelhantes sob altas cargas e baixas velocidades devido a influência da deformação elástica. Por outro lado, em alta velocidade o efeito hidrodinâmico é superado, fornecendo uma completa lubrificação EHD. Algumas soluções numéricas para o problema de lubrificação EHD utilizando-se de fluido newtoniano foram estudadas por B.J.Hamrock [10] e os resultados são exibidos abaixo:

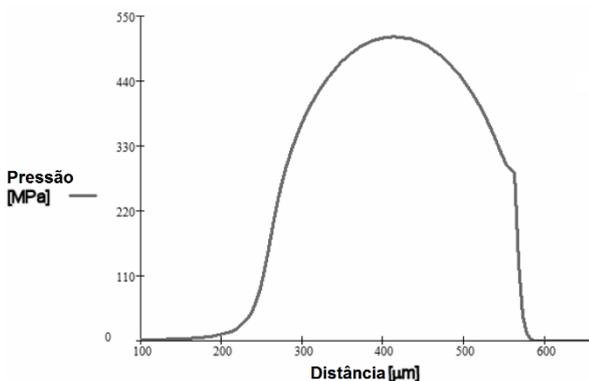


Figura 5: Perfil de distribuição de pressão. Figura traduzida do livro "Fundamentals of Fluid Film Lubrication" [10]

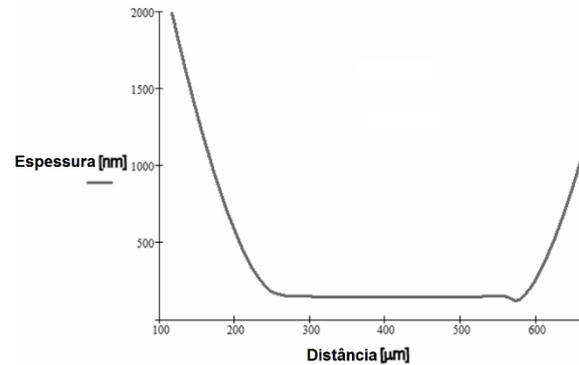


Figura 6: Espessura do filme de óleo na lubrificação EHD. Figura traduzida do livro "Fundamentals of Fluid Film Lubrication" [10]

Com o objetivo de atingir uma completa lubrificação elastohidrodinâmica é importante controlar alguns parâmetros relevantes, como o fator λ e o fator k .

O fator λ é a razão entre a espessura mínima do filme de óleo (h_{min}) e a rugosidade da superfície (R_s), obtida da raiz do valor quadrático médio das superfícies individuais em contato (RMS), a equação abaixo apresenta o fator λ :

$$\lambda = \frac{h_{min}}{R_s} \quad \text{Eq. 4}$$

O fator k é a relação de viscosidade definida pela equação abaixo:

$$k = \frac{\nu}{\nu_1} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

ν : viscosidade cinemática do lubrificante na temperatura de operação;

ν_1 : mínima viscosidade do lubrificante requerida;

A mínima viscosidade requerida é função do diâmetro médio do rolamento $d_m = 0,5(d + D)$ [mm], e da rotação do mancal " n " [rpm].

De acordo com o catálogo da SKF [11], em um eixo com rotação de 500 rpm utilizando um rolamento rígido de esfera 6352 M ($d_m = 400$ mm), a mínima viscosidade cinemática requerida é 11 mm²/s (cSt).

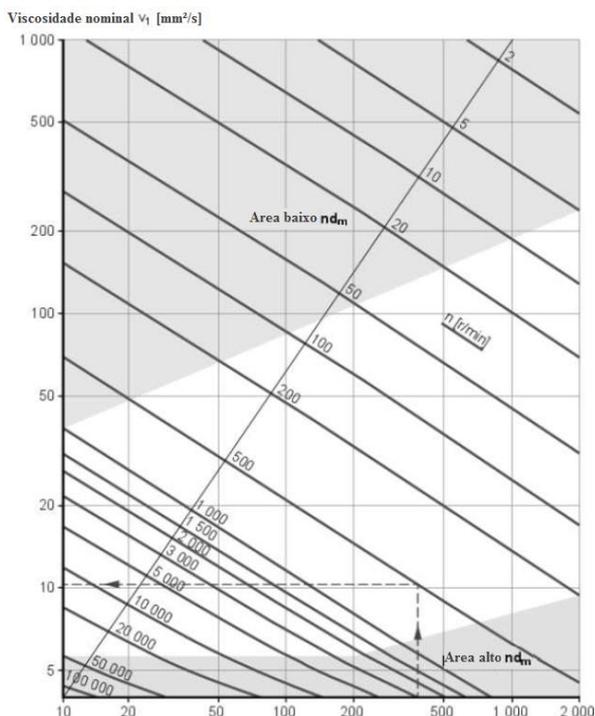


Figura 7: Viscosidade do lubrificante mínima requerida

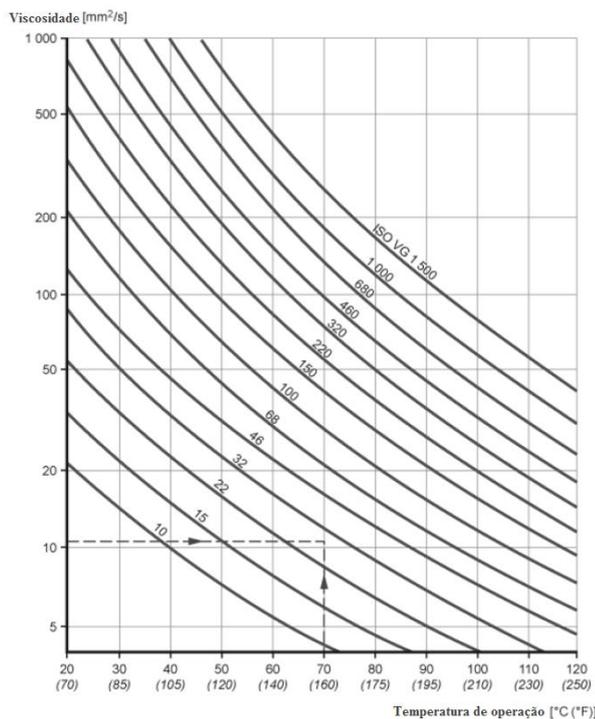


Figura 8: Diagrama viscosidade-temperatura para óleo ISO VG (Óleo mineral com índice de viscosidade 95)

A fim de alcançar um fator $kappa > 1$, a viscosidade cinemática do fluido lubrificante deve ser maior que 11 cSt. A Figura 8 indica que o grau de viscosidade ISO do lubrificante precisar ser ISO VG 32 ou maior.

Conforme a ISO 281 [8], o fator de vida ajustada aumenta a vida a fadiga em rolamentos devido a melhoria da lubrificação EHD com uma maior viscosidade. Entretanto há um limite nos benefícios obtidos a partir do aumento da viscosidade. Geralmente, recomenda-se o fator $kappa$ abaixo de 4.0, esse limite é válido para ambos os tipos de lubrificação, graxa e óleo [12], sendo que para cada incremento do fator, há um aumento nas tensões de cisalhamento do lubrificante, resultando no aumento da perda por atrito e conseqüentemente maior elevação de temperatura do mancal. Em algumas aplicações, o fator $kappa$ pode estar fora dos limites gerais recomendados, neste tipo de equipamento sugere-se utilizar lubrificantes com aditivos ou avaliar a combinação de espessante e óleo base para melhorar as condições de lubrificação.

3.2 SELEÇÃO DE LUBRIFICANTES PARA MANCAIS DE ROLAMENTO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS GIRANTES

No caso de mancais de rolamento é essencial a correta escolha do tipo de lubrificante considerando o desempenho do mancal, custos, manutenção, sistema de selamento, aspectos ambientais, e obviamente a exigência do cliente. No entanto, o fabricante da máquina elétrica deve alertar possíveis problemas técnicos ou de performance relacionados a escolha do lubrificante realizada pelo cliente.

Geralmente a lubrificação a graxa é preferida em relação a lubrificação a óleo devido alguns benefícios, sendo estes: menor custo da solução completa do mancal, menor nível de risco de vazamento do lubrificante, melhor proteção total contra corrosão, menor desgaste na condição de partida e parada de máquina, fácil manutenção, possibilidade de utilizar maior quantidade de aditivos complexos, e sistema de selamento sem contato, o qual elimina ou reduz as perdas por atrito, ruído e desgaste.

A contaminação do ambiente e o fator de rotação do mancal são características críticas para a lubrificação a graxa. O fator de rotação dmN é função da rotação combinada com o diâmetro médio do rolamento, ressalta-se que quanto maior seu valor, maior é a geração de calor no lubrificante e no mancal. Novas tecnologias de graxas lubrificantes permitem altas velocidades, porém é necessário uma atenção especial devido ao risco de superaquecimento. No caso de requisitos de aumento de velocidade, uma análise completa de vibração e temperatura é recomendada. O projeto do mancal pode ser alterado para suportar níveis de temperatura mais



elevados ou aumentar a capacidade de troca de calor do rolamento.

A lubrificação a óleo é preferida em aplicações de máquinas de grande porte e/ou utilização em altas rotações, a qual necessita de um sistema de resfriamento auxiliar com circulação de óleo externa e presença de filtro de partículas que auxilia na remoção de contaminantes e fornece óleo frio diretamente no rolamento maximizando a condição de boa lubrificação. A lubrificação a óleo tem como desvantagens o potencial risco de vazamento e o aumento das perdas causadas pelo cisalhamento do fluido devido a agitação do lubrificante dentro do reservatório do mancal.

3.3 MANCAIS DE ROLAMENTO LUBRIFICADOS A GRAXA

A seleção de graxa para máquinas elétricas deve ser realizada com base nos requisitos gerais de desempenho, análise de formulação de graxa e ampla validação experimental. As principais características recomendadas são o tipo de espessante e a formulação geral da graxa, avaliadas por meio das propriedades contidas na folha de dados do fabricante. Os aditivos presentes na composição, tipo de óleo base, viscosidade cinemática, consistência, limites de temperatura e IV são parâmetros importantes utilizados na definição inicial da graxa.

A WEG define a graxa mais adequada para cada aplicação considerando os requisitos do projeto e recomenda enfaticamente nunca misturar graxas diferentes ou alterar o lubrificante especificado sem análise prévia. Pode-se alegar que todos os lubrificantes possuem comportamentos diferentes, e o desempenho da lubrificação final será uma combinação de muitas características, resultando em condições de lubrificação apropriadas ou não. A aplicação incorreta do lubrificante pode afetar significativamente a vida útil do rolamento e causar falha prematura.

3.4 AVALIAÇÃO GERAL DAS PROPRIEDADES DAS GRAXAS LUBRIFICANTES

Uma comparação entre as folhas de dados de diferentes graxas lubrificantes deve ser o ponto de partida para selecionar uma graxa alternativa. Impactos imediatos e relevantes decorrentes da troca da graxa podem ser avaliados por meio da análise completa das folhas de dados. A Tabela 1 pode ser utilizada como referência para conhecimento das principais propriedades e das normas usualmente empregadas para a obtenção dos resultados. Grande parte das características

típicas apresentadas, são geralmente para avaliação de qualidade e referem-se a condições estáticas, desta forma, não necessariamente refletem o desempenho quando aplicada nos rolamentos em condições nominais de rotação e trabalho, no entanto, para uma análise mais abrangente, condições de armazenamento e transporte também devem ser consideradas. Diferentes normas, tais como DIN, ASTM, ISO, e outras, são utilizadas pelo fabricante da graxa, o que torna ocasionalmente a avaliação mais complexa, dado que as condições de contorno dos testes podem alterar significativamente, não permitindo a comparação direta dos resultados.

Tabela 1: Resumo das propriedades principais de graxas lubrificantes

Características típicas	
Descrição	Reference standard
Tipo de óleo básico	-
Tipo de espessante	-
Grau NGLI (Consistência)	DIN 51818
Viscosidade (ISO VG)	ISO3448
Densidade a 20°C	-
Penetração trabalhada	ASTM D 217 / DIN 51825
Alteração na penetração após ciclos	ASTM D 217
Índice de Viscosidade (VI)	ASTM D2270
Viscosidade aparente	ASTM D 1092
Viscosidade cinemática do óleo básico	ASTM D 445
Temperatura admissível	DIN 51825
Pressão de escoamento	DIN 51805
Torque em baixa temperatura (Partida / operação)	ASTM D 1478
Ponta de gota	DIN ISO 2176
Ponto de fluidez	ASTM D 97 (óleo)
Separação do óleo	FED-STD-791. 321
Lavagem por água	ASTM D 1264
Ponto de solda, 4 esferas - kg	ASTM D 2596
Resistência à corrosão do cobre	ASTM D 4048
Proteção contra oxidação/ferrugem	ASTM D 1743-73
Evaporação em 22hours	ASTM D 2595
Performance em rolamento	ASTM D 3336
Vida da graxa em alta temperatura	ASTM D 3336
Marca de desgaste 4 esferas	DIN 51350



3.5 ÓLEO BÁSICO

A eficiência de lubrificação de uma graxa é primariamente determinada pelo grau de separação entre as superfícies de rolamento e contato, permitida pela viscosidade do óleo básico. Para uma lubrificação adequada deve-se considerar sempre que possível os limites da aplicação. O atendimento da viscosidade mínima requerida pelo rolamento quando em rotação e temperaturas extremas é essencial para garantir a vida dos mancais. Contudo, deve-se sempre priorizar a melhor condição de lubrificação em condições normais de operação. A avaliação desta condição por meio do fator de viscosidade $kappa$ (k) é uma forma bastante segura para esta análise. Uma discussão mais detalhada sobre o fator $kappa$ é apresentada no item 3.1 deste documento.

O índice de viscosidade (IV) e viscosidade aparente também são propriedades que devem ser consideradas para determinação da performance, principalmente em aplicações com muitas partidas, grandes ranges de velocidade e temperaturas ambientes de elevada amplitude térmica ou mais extremas.

O tipo de óleo é definido de acordo com a sua origem, e que pode ser mineral, éster, Polialphaoleofinas (PAO) e outros. Em resumo, graxas lubrificantes com óleos básicos sintéticos são em geral mais caras, mas possuem vida superior quando comparada com lubrificantes com base de óleo mineral.

O impacto de alguns fatores como, vibração, carga e temperatura, e que afetam diretamente na taxa de liberação de óleo devem ser considerados.

Limites de temperatura são em geral definidos por parâmetros como ponto de gota, torque de partida, torque em operação, consistência e sua alteração após trabalho, e pressão de escoamento. A comparação de resultados normalizados pode ser executada para estimar melhorias ou prejuízos na performance.

- Torque de partida e torque em operação de acordo com ASTM D 1478 [13] são seguros quando são menores ou iguais a 10000g.cm e 1000g.cm respectivamente, sendo que, deve-se considerar a mínima temperatura de partida e trabalho;
- Pressão de escoamento em acordo com a norma DIN 51805-2 [14] pode ser considerada segura quando menor ou igual a 1400hPa na mínima temperatura;
- Mínima penetração do cone em baixa temperatura conforme ISO 13737 [15].

3.6 CONSISTÊNCIA DA GRAXA

Graxas são lubrificantes fabricados com aditivos e óleos minerais, sintéticos ou com misturas entre óleos sintéticos e minerais, incorporados numa formulação com espessantes (sabão).

O produto final deve ter consistência bastante uniforme. Diferente de mancais lubrificadas por óleo, que em geral apresentam circulação do fluido, graxas devem possuir uma formulação capaz de suprir aditivos e óleos na área de contato. Portanto, outros parâmetros da graxa devem ser considerados como relevantes além da viscosidade do óleo básico afim de garantir uma lubrificação apropriada entre cada intervalo de lubrificação.

O grau de consistência NLGI (National Lubricating Grease Institute) pode ser correlacionado e classificado conforme os resultados do teste de penetração trabalhada ou não. Estes resultados são importantes para avaliação do espessante e da formulação da graxa.

O óleo básico utilizado na formulação da graxa determina a classe de viscosidade apresentada na folha de dados, mas não está correlacionada com a consistência. Assim, duas graxas podem ter o mesmo grau NLGI, mas viscosidades totalmente diferentes.

O grau NLGI que classifica a consistência da graxa pode variar de 0 (00 e 000) para graxas muito macias, até 6 para graxas extremamente consistentes ou duras. Quanto mais dura maior será a resistência a fluidez quando imposta uma dada pressão. E ainda, quanto menor a consistência, mais facilmente a graxa fluirá dada a pressão imposta, o que indica que a consistência da graxa, ou grau NLGI, é importante para estimar ou comparar pressão de escoamento ou a capacidade de bombeamento que a graxa terá quando estática ou quando aplicada ao rolamento, sendo esta uma das características mais importantes para a performance da lubrificação.

A consistência da graxa não deve ser alterada significativamente quando em operação, principalmente quando aplicada em altas rotações ou aplicações com elevada vibração. Máquinas elétricas verticais operando com graxas de baixa consistência podem ter a graxa expelida do rolamento com facilidade, implicando em redução na performance de lubrificação e vazamento através das vedações, atingindo partes internas da máquina.



3.7 AVALIAÇÃO DO ESPESSANTE

O espessante da graxa atua como uma esponja, liberando o óleo lubrificante e aditivos.

Adicionalmente, o sabão utilizado na formulação determina muitas das características das graxas, tais como: temperaturas limite, viscosidade aparente, estabilidade mecânica e resistência a lavagem por água, dentre outras.

O espessante utilizado nas graxas mais amplamente conhecidas podem ser inorgânicos, tais como sílica gel ou bentonita, ou orgânicos, tais como fluorocarbonetos, uréia, di-uréia e poliuréias, podem ainda ser sabões metálicos simples ou complexos, tais como lítio ou complexo de lítio. Sendo que algumas das principais propriedades dos diferentes espessantes que podem ser destacadas são:

- Bário é um sabão metálico simples que possui ponto de gota acima de 176°C, no entanto, não é recomendado para operação contínua em alta temperatura dada a sua taxa de degradação, apesar de que usualmente possui boa performance em condições de variação de temperatura. Utilizado nas mais diversas aplicações, não é recomendado para aplicações de muito baixa temperatura ou altas rotações em sua forma simples. Compatível com a maioria dos espessantes existentes, como é composto por metais pesados, deve ser administrado com cuidados adicionais e por apresentar certa toxicidade e implicar em riscos à saúde, segurança e ao meio ambiente, é proibido em algumas regiões. Graxas com espessantes complexos de bário podem ter suas propriedades alteradas significativamente, e assim atingir propriedades específicas, tal como excelente performance em altas rotações.

- Lítio é um dos compostos mais utilizado para lubrificação em geral. Este espessante resiste a temperaturas baixas e altas mais extremas de acordo com sua formulação. Como possui baixa resistência a fluidez, confere boas propriedades em baixa temperatura. O uso deste tipo de sabão em altas temperaturas requer modificações em sua formulação, portanto, o uso da mesma graxa em aplicações com condições extremas ou amplas de temperatura requer uma avaliação detalhada. Em geral, espessantes de lítio possuem boa estabilidade mecânica, resistência a lavagem por água, adesão em superfícies metálicas e bombeabilidade. Graxas com sabões complexos de lítio são opções que em geral mantêm as propriedades do lítio simples e possuem melhorias

em características mais específicas, mantendo alguma limitação para aplicações em ranges muito extremos, mas sendo uma opção bastante econômica.

- Poliuréia é um espessante produzido com a reação entre isocianetos e aminas. A natureza tóxica dos compostos brutos ainda limita a produção de graxas com este sabão. Graxas de poliuréia possuem boas propriedades de proteção contra oxidação e desgaste e muito boa resistência a lavagem por água. No entanto, suas propriedades lubrificantes em temperaturas ambiente extremamente baixas são inferiores quando comparados com vários outros espessantes. Por fim, espessantes de poliuréia são amplamente utilizados em máquinas elétricas girantes dadas suas excelentes propriedades de estabilidade mecânica e resistência em temperaturas de operação médias e altas, garantindo lubrificação adequada por longos períodos.

- PTFE: perfluopoliéteres são usados como lubrificantes em ambientes agressivos e geralmente requerem espessantes também inertes como o PTFE, ou politetrafluoretileno. Aplicações para graxas desta composição incluem contato com solventes agressivos ou extremas altas temperaturas. Graxas inertes desta natureza são também utilizadas em bombas de oxigênio e óxidos nitrosos em ambientes bastante específicos em que não possam existir riscos de explosão ou incêndio. Pelas suas características, componentes com polímeros, borrachas ou cerâmicas mais sensíveis ou reativos podem ter contato com estes tipos de lubrificantes.

Este resumo apresenta uma visão geral sobre as performance dos mais diversos tipos de espessantes, mas é importante considerar que a maioria dos fabricantes de graxa usam sabões complexos, por exemplo, complexo de bário ou complexo de lítio, e desta forma, as propriedades das graxas podem mudar significativamente quando comparadas aos resultados de sabões simples.

3.8 MISCIBILIDADE DE GRAXAS

Em geral, os fabricantes de rolamento e lubrificantes não recomendam a mistura de graxas, e principalmente quando o óleo básico possui formulação diferente ou os espessantes são diferentes. A incompatibilidade pode reduzir a performance da graxa devido à diversas alterações possíveis na estrutura do lubrificante, dentre as



quais pode-se citar a consistência e no ponto de gota, indicando impactos nas propriedades de liberação de óleo.

Em casos especiais em que existe uma extrema dificuldade para remover a graxa original, sugere-se considerar algumas análises para mitigar o risco de uma falha de lubrificação causada pela mistura. A análise de miscibilidade deve cumprir ainda que a variação dos resultados da mistura seja menor do que a variação de cada graxa individualmente. Em geral são recomendados no mínimo duas avaliações da mistura antes de depois do teste conhecido com *Roll Stability* (ASTM D1831 [16]).

- Penetração trabalhada de acordo com ASTM D217 [17];
- Ponto de gota de acordo ASTM D2265 [18].

Obviamente, para garantia de performance, recomenda-se o desenvolvimento de um plano de transição para aplicações mais críticas. Temperatura e vibração devem ser avaliados criteriosamente após alteração para evitar futuros problemas ocorridos por deficiência de lubrificação. Adicionalmente, recomenda-se testes com misturas em diferentes proporções, tais como 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 e 0/100, em bancadas para avaliar desgaste por quatro esferas de acordo com DIN 51350 [19].

3.9 INTERVALO DE LUBRIFICAÇÃO

A WEG utiliza um método próprio para cálculo do intervalo de lubrificação e destaca três principais fatores com igual importância para que a condição de lubrificação esteja adequada: projeto do mancal, condição de serviço e manutenção adequada.

Com mais detalhes, os dados relevantes considerados no projeto do mancal são: temperatura e rotação de trabalho, tipo e dimensão do rolamento, cargas aplicadas, posição ou orientação do eixo da máquina, e por fim, a seleção do lubrificante em acordo com seus parâmetros de performance.

A operação possui impacto de acordo com o regime de serviço, incluindo ciclos de partida/parada, paradas ou tempos fora de serviço muito prolongados, instalação em ambientes ativos, e ainda, condição ou tempo de armazenamento.

O intervalo de lubrificação é frequentemente apontado como causa raiz em falhas de mancais de rolamento, principalmente em aplicações incorretas ou severas, em que não é aplicado nenhuma correção ou ajuste nos intervalos especificados para aplicações gerais. Motores alimentados por inversores de frequência, operando em temperatura ambiente elevada

(>50°C), ou ainda, operando em ambientes com contaminação, umidade ou vibração excessiva necessitam de análise mais específica.

Motores armazenados por longos períodos ou com regimes de serviço diferente de operação contínua, deve-se definir o intervalo de lubrificação em função da vida da graxa, que pode alterar conforme a condição de armazenamento e instalação. Adicionalmente, um erro comum praticado é a lubrificação excessiva dos rolamentos, e que pode causar aquecimento e perdas excessivas.

De forma geral, a performance de cada graxa recomendada pela WEG é determinada por meio de inúmeros testes em rolamentos em laboratório e também por extensiva validação em protótipos. Assim, alterações requeridas que impliquem em alterar a condição especificada para cada equipamento devem ser avaliadas, bem como, o uso de graxas diferentes da recomendada podem incorrer em redução significativa da confiabilidade, dada a imprecisão dos parâmetros de referência. Finalmente, o procedimento de lubrificação com uso de materiais apropriados e boas práticas completam os requisitos para garantir a segurança e confiabilidade dos equipamentos.

3.10 ROLAMENTOS COM LUBRIFICAÇÃO A ÓLEO

Todos os tipos de rolamento descritos no item 3 podem ser lubrificados por óleo, o qual possui o propósito de garantir um filme fluido entre as faces de contato e remover o calor gerado na zona de carga. Para alguns tipos de rolamento sob condições específicas é preferível lubrificação a óleo, tais como rolamentos axiais autocompensadores de rolos, usualmente aplicados em motores verticais com mancal de escora para altos níveis de empuxo axial proveniente da bomba ou turbina hidráulica acionada / acionadora. Neste caso específico o rolamento possui um projeto característico que proporciona um efeito de bombeamento do óleo, o qual possibilita o escoamento do óleo através do rolamento aumentando a capacidade de lubrificação e de troca térmica.

Complementarmente, a lubrificação a óleo é indicada em casos de rolamentos aplicados em alta rotação, e da mesma forma que para mancais hidrodinâmicos, diferentes métodos auxiliares podem ser utilizados, tais como banho de óleo, lubrificação forçada e injeção de jato ou névoa de óleo. As vantagens ou desvantagens da lubrificação a óleo são apresentadas no item 3.2.

A especificação do óleo deve ser da mesma forma considerada para mancais hidrodinâmicos,



indicada no item 2.1, exceto pela informação sobre aditivos de extrema pressão, que podem eventualmente ser utilizados em condições de baixa rotação e/ou alta carga. Geralmente, a aplicação de aditivos EP está relacionada ao fator de viscosidade (k) menor que 1, condição em que a alta temperatura da região de contato, e a rugosidade da superfície ativarão o aditivo formando uma camada protetiva, aumentando a vida dos rolamentos em condições de deficiência de lubrificação.

4 CONCLUSÃO

A condição da lubrificação contribui diretamente na performance do mancal nos aspectos mais relevantes, por exemplo, na vida do mancal, temperatura de operação, vibração e desgaste. A correta lubrificação do mancal é responsável pela confiabilidade da máquina elétrica girante. Por meio deste artigo é possível compreender os princípios básicos de lubrificação de mancal e algumas boas práticas para avaliação do lubrificante em busca da melhor condição de lubrificação para cada aplicação, mesmo quando os mancais estão submetidos as condições especiais de temperatura ambiente, rotações, cargas, umidade, vibrações e contaminantes.

5 REFERENCES

- [1] IEEE Motor Reliability Working Group, "Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-21, no. 4, pp. 853–872, Jul. 1986.
- [2] A. Harnoy, Bearing Design in Machinery - Engineering Tribology and Lubrication, New York, Marcel Dekker, Inc. 2003.
- [3] ISO 3448:1992 - Industrial liquid lubricants - ISO viscosity classification.
- [4] DIN 51524-1:2017-06 Pressure fluids - Hydraulic oils - Part 1: HL hydraulic oils, Minimum requirements.
- [5] DIN 51517-2:2018-09 Lubricants - Lubricating oils - Part 2: Lubricating oils CL, Minimum requirements.
- [6] DIN 51524-2:2017-06 Pressure fluids - Hydraulic oils - Part 2: HLP hydraulic oils, Minimum requirements.
- [7] DIN 51517-3:2018-09 Lubricants - Lubricating oils - Part 3: Lubricating oils CLP, Minimum requirements.
- [8] ISO 281:2007 Rolling bearings - Dynamic load rating and rating life.
- [9] Tallian, T. E. (1967). Paper 14: Rolling Contact Failure Control through Lubrication. Proceedings of

the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings, 182(1), 205–236.

[10] B.J.Hamrock, Fundamentals of Fluid Film Lubrication, New York, McGraw-Hill, Inc. 1994.

[11] Principles of Bearing selection and Application: Selecting lubricant viscosity; SKF General Catalog 6000, Published August 2010.

[12] The element that rolls the bearing. Tips and advice for the lubrication of rolling bearings. Klüber Lubrication. Edition 11.11.

[13] ASTM D1478 - 18 Standard Test Method for Low-Temperature Torque of Ball Bearing Grease

[14] DIN 51805-2 Testing of lubricants - Determination of flow pressure of lubricating greases according to Kesternich method - Part 2: Automatic method.

[15] ISO 13737:2004 Petroleum products and lubricants - Determination of low-temperature cone penetration of lubricating greases.

[16] ASTM D1831 Standard Test Method for Roll Stability of Lubricating Grease.

[17] ASTM D217 Standard Test Methods for Cone Penetration of Lubricating Grease.

[18] ASTM D2265 Standard Test Method for Dropping Point of Lubricating Grease Over Wide Temperature Range.

[19] DIN 51350-1:2015 Testing of lubricants - Testing in the four-ball tester - Part 1: General working principles.