

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

RODOLFO MARTINS DA ROCHA

**SELEÇÃO DE AÇOS E DE LUBRIFICAÇÃO PARA ROLAMENTOS USADOS EM
SISTEMA DE EXAUSTÃO INDUSTRIAL**

SÃO CARLOS -SP

2024

RODOLFO MARTINS DA ROCHA

**SELEÇÃO DE AÇOS E DE LUBRIFICAÇÃO PARA ROLAMENTOS USADOS EM
SISTEMA DE EXAUSTÃO INDUSTRIAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: José Eduardo Spinelli

São Carlos-SP

2024



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Rodolfo Martins da Rocha

RA: 744424

TÍTULO: Seleção de aços e de lubrificação para rolamentos usados em sistemas de exaustão industrial

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. José Eduardo Spinelli

DATA/HORÁRIO: 06/09/2024, 14h15

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. José Eduardo Spinelli	9,0	9,0
Prof. Dr. Guilherme Zepon	7,0	8,0
Média	8,0	8,5

BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. José Eduardo Spinelli

Documento assinado digitalmente
gov.br JOSE EDUARDO SPINELLI
Data: 06/09/2024 15:07:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Guilherme Zepon

Documento assinado digitalmente
gov.br GUILHERME ZEPON
Data: 06/09/2024 15:01:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Agradecimentos

Aos meus pais por todo aprendizado, confiança, apoio e suporte ao longo da vida.

Aos amigos e familiares, como um todo, pelo apoio durante a vida.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Materiais, responsáveis pelo ensinamento e aprendizado repassado ao longo da graduação.

Ao professor José Eduardo Spinelli pelo direcionamento, apoio e liberdade na orientação para a escrita deste trabalho.

A instituição UFSCar pelos recursos educacionais, financeiros e estruturais disponibilizados aos discentes, docentes, técnicos-administrativos e terceiros que compõem a universidade.

RESUMO

Os sistemas de exaustão industriais são de extrema importância para o bom funcionamento de uma indústria. Responsáveis por retirar os gases poluentes de um ambiente interno para o ambiente externo, os ventiladores exaustores industriais tem como função transportar o ar com o objetivo de controlar a temperatura, a umidade, movimentar partículas, e outras intempéries, para o meio externo através do deslocamento de ar. Para que isso seja possível, o ventilador deve estar acoplado a um sistema formado por motores, eixos, rolamentos. Para o funcionamento desse sistema é necessário que os componentes apresentem condições suficientes de operação para determinado ambiente, visto que muitos destes ambientes são considerados corrosivos e abrasivos, levando assim ao desgaste superficial dos componentes e, posteriormente, ao colapso do sistema. Um dispositivo que deve ser levado em consideração são os rolamentos, visto que são responsáveis por fazer a movimentação do eixo dos ventiladores e que devem suportar altas cargas, altas rotações e vibrações. A falta de manutenções e desalinhamento dos ventiladores são uma das causas do aparecimento de defeitos superficiais nos rolamentos e, conseqüentemente, o empenamento do dispositivo. Por ser formado por uma estrutura articulada, os rolamentos necessitam de materiais que suportam, além das cargas, grande quantidade de rotações a altas velocidades, necessitando assim de materiais com resistência a fadiga e de alta dureza. Os materiais mais utilizados para a confecção desses dispositivos são os aços. Dentre os diferentes tipos de aços na área de materiais, os mais utilizados para rolamentos são os aços alto carbono e aços ferramentas. Devido à presença do carbono e outros elementos de liga, esses materiais apresentam boa dureza e boa resistência a fadiga. Além dos aços, outro material importante para o funcionamento dos rolamentos são os lubrificantes. Responsáveis por diminuir o atrito entre as superfícies rolantes do rolamento, os lubrificantes tem como função trocar o atrito direto (metal com metal) pelo atrito fluído (metal com uma fina camada de lubrificante), aumentando assim a vida útil do rolamento e evitando danos estruturais. Com isso, o presente trabalho busca selecionar alternativas de aços e lubrificantes que sejam aplicáveis em rolamentos através do software GRANTA Edupack (para os aços apenas), e por meio do método TOPSIS classificar a melhor opção selecionada. Para os aços, foram levadas em consideração as propriedades dos aços que fossem importantes para aplicação em rolamentos em dois cenários: cenário referencial e cenário prioritário. Dentre as opções apresentadas, o aço AISI D3 trabalho a frio (C: 2,00% / Mn: 0,30% / Si: 0,25% / Cr: 11,50%) foi o aço que obteve a melhor classificação, e para o lubrificante, o lubrificante LGMT 2, cujo espessante é feito de sabão de lítio à base de óleo mineral, foi o que apresentou melhor classificação.

Palavras-chave: ventilador; rolamento; aço; lubrificante; desgaste.

ABSTRACT

Industrial exhaust systems are extremely important for the proper functioning of a industry installation. Responsible for removing polluting gases from an internal environment to the external environment, industrial exhaust fans are designed to transport air to the external environment through air displacement, in order to control temperature, humidity, move particles, and other elements. For this to be possible, the fan must be coupled to a system consisting of motors, shafts, and bearings. For this system to work, the components must have sufficient operating conditions for a given environment, since many of these environments are considered corrosive and abrasive, thus leading to surface wear of the components and, subsequently, to the collapse of the system. One device that must be taken into consideration is the bearings, since they are responsible for moving the fan shaft and must withstand high loads, high rotations, and vibrations. Lack of maintenance and misalignment of the fans are one of the causes of surface defects in the bearings and, consequently, warping of the device. Because they are made up of an articulated structure, bearings require materials that can withstand, in addition to loads, a large number of rotations at high speeds, thus requiring materials with resistance to fatigue and high hardness. The most commonly used materials for the manufacture of these devices are steels. Among the different types of steels in the materials area, the most commonly used for bearings are high carbon steels and tool steels. Due to the presence of carbon and other alloying elements, these materials have good hardness and good resistance to fatigue. In addition to steels, another important material for the operation of bearings are lubricants. Responsible for reducing friction between the rolling surfaces of the bearing, lubricants have the function of replacing direct friction (metal with metal) with fluid friction (metal with a thin layer of lubricant), thus increasing the useful life of the bearing and preventing structural damage. Therefore, this study seeks to select alternatives for steels and lubricants that are applicable to bearings using the GRANTA Edupack software (only used in the case of steels), and, through the TOPSIS method, classify the best selected option. For the steels, the properties of the materials that were important for application in bearings were taken into consideration in two scenarios: reference scenario and priority scenario. Among the options presented, AISI D3 cold work steel was the steel that obtained the best classification and for the lubricant, LGMT 2 lubricant was the one that presented the best classification.

Keywords: fan; bearing; steel; lubricant; wear.

Sumário

1. Introdução	7
1.1 Objetivo	7
2. Revisão da literatura	8
2.1 Sistema de ventilação industrial.....	8
2.2 Ventiladores industriais	8
2.3 Rolamentos	10
2.4 Tipos de rolamentos.....	11
2.4.1 Rolamentos radiais e axiais	11
2.4.2 Gaiolas	12
2.4.3 Lubrificação	14
2.5 - Tipos de lubrificação	14
2.5.1. Lubrificação a graxa.....	14
2.5.2 Lubrificação a óleo	15
2.6 Tipos de aços usados em rolamentos (microestruturas) e tratamento térmico ..	16
2.6.1 Aço temperado	17
2.6.2 Aço cementado	18
2.6.3 Aço SAE 4320	18
2.6.4 Aço SAE 8620	19
2.7.5 Aços Inoxidáveis	21
2.6. Principais falhas em rolamentos	22
3. Materiais e métodos	24
3.1. Apresentação da situação problema	24
3.2. Métodos.....	27
3.2.1 Propriedades importantes para a seleção do aço para rolamentos	27
3.2.3 Propriedades importantes para a determinação do lubrificante para rolamentos.....	29
3.2.4 Determinação dos resultados	29
4. Resultados	31
4.1 Propriedades dos aços	32
5. Discussão dos resultados	38
5.1 Cenário referencial para a escolha do melhor aço	38

5.2 Cenário para dureza e tenacidade como propriedades prioritárias para a escolha do aço.....	38
5.3 Cenário para a escolha da graxa.....	42
6. Conclusões	45
Referências	46

1. Introdução

Nas diversas etapas relacionadas à produção de ligas metálicas na fundição de uma indústria são produzidos gases que são captados, tratados e emitidos para a atmosfera. Esses gases são captados por meio de um sistema de exaustão cujo objetivo é minimizar o impacto ao meio ambiente causado pela emissão de gases compostos por dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, monóxido de carbono, dentre outros.

Os sistemas de exaustão são processos de renovação do ar de um ambiente fechado por meio mecânico, cujo objetivo é controlar a pureza, temperatura, umidade, distribuição, movimentação e odor do ar ou é um processo de ventilação mecânica que remove o ar contaminado do ambiente, fazendo com que a pressão interior do recinto seja menor que a exterior. Na indústria, o sistema de exaustão é formado por um conjunto de equipamentos, sendo estes um ventilador externo, dutos para a condução dos gases e um captador instalado no local da fonte poluidora. Logo, os agentes poluidores são removidos do ambiente antes que eles se dissipem (1).

Os ventiladores de exaustão são formados por um eixo, um conjunto de rolamentos e um motor elétrico, transformando assim a energia mecânica em energia cinética capaz de deslocar o ar. Esses ventiladores, por sua vez, sofrem problemas relacionados ao rolamento do eixo. Esses rolamentos são responsáveis por fazerem o sistema girar com o mínimo de atrito, ou seja, eles transmitem uma ação de rotação entre um eixo e os outros elementos do conjunto. Quando determinado tipo de rolamento que não é para determinada aplicação, como em sistema de exaustão, o sistema de ventilação é afetado, ocorrendo assim o travamento do sistema (2).

1.1 Objetivo

O presente trabalho busca selecionar, por meio da revisão bibliográfica e de uma situação problema, a melhor opção de aços para rolamentos e lubrificantes aplicados em sistemas de exaustão, através dos aços e graxas utilizados pelos fabricantes, cujas propriedades físicas, químicas, mecânicas e de Engenharia dos materiais apresentadas serão levadas em consideração para a comparação e classificação, buscando sistemas mais apropriados. Com a utilização do software

GRANTA Edupack e do método TOPSIS, os aços e as graxas foram selecionados e classificados como alternativas para serem aplicados em dispositivos rolantes.

2. Revisão da literatura

2.1 Sistema de ventilação industrial

Os sistemas de ventilação aplicados na indústria são considerados conjuntos eletromecânicos aplicados para controle de temperatura, distribuição de ar, remoção de gases e partículas poluidoras de determinado ambiente, proporcionando conforto e condições adequadas para a realização do trabalho (1).

São consideradas duas classificações de ventilação industrial: geral diluidora e local exaustiva. A ventilação diluidora é aplicada em setores onde não se identifica uma fonte específica dos agentes poluidores do ambiente de trabalho, com isso utiliza-se o ventilador para transferir ar limpo para o interior do ambiente e assim renovar o ambiente. Com relação a ventilação exaustiva, é realizada através de um conjunto de equipamentos, sendo formado por um ventilador alocado do lado externo ao ambiente, dutos para a condução dos gases transportados e um captador no local do ambiente poluído. Com isso, os agentes poluidores são removidos do local antes de ocorrer a dissipação pelo ambiente.

2.2 Ventiladores industriais

Os ventiladores industriais podem ser definidos como turbo máquinas que transformam energia mecânica transmitida por um motor elétrico em energia cinética. Portanto, são capazes de deslocar gases, fluídos e partículas sólidas. Sua função básica é mover uma quantidade de ar através de um sistema de ventilação a ele conectado. Com isso, o ventilador deve gerar pressão necessária para vencer as perdas do sistema e uma pressão dinâmica para manter o ar em movimento. Esses ventiladores são constituídos por pás, ou hélices fixadas a um eixo central, que giram dentro de uma superfície cilíndrica. Esse tipo de ventilador (figura 1) é conhecido como ventilador axial e uma das desvantagens desse modelo é que ele possui alto nível de ruído e exposição de componentes mecânicos como rolamentos, mancais e correias

aos gases transportados, limitando assim sua aplicação em ambientes de atmosfera com poluentes agressivos (3). Para a determinação dos torques de partida aplicados em rolamentos, é levado em consideração o momento de atrito deslizante e o momento de atrito de vedações. Logo, o torque de partida é definido como o momento de atrito que deve ser vencido para que o rolamento comece a girar a temperatura ambiente, entre 25 e 20°C (8). O cálculo desse torque é constituído pela seguinte fórmula:

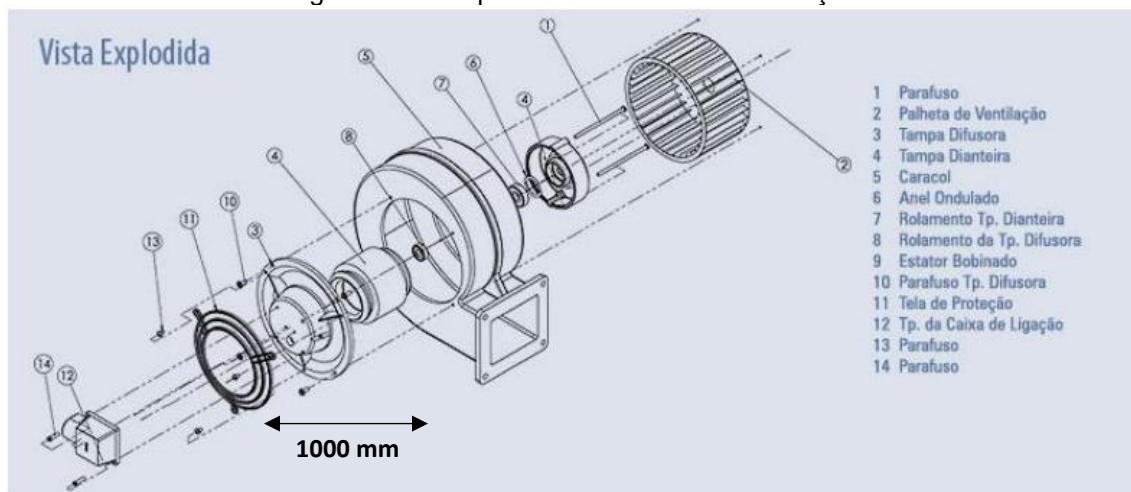
$$M_{partida} = M_{sl} + M_{vedação}$$

onde:

$M_{partida}$	momento inicial de fricção [N·mm]
M_{sl}	momento de atrito deslizante [N·mm]
$M_{vedação}$	momento de atrito das vedações [N·mm]

Para cada rolamento existem valores específicos para a obtenção do torque de partida.

Figura 1 - Exemplo de um sistema de ventilação



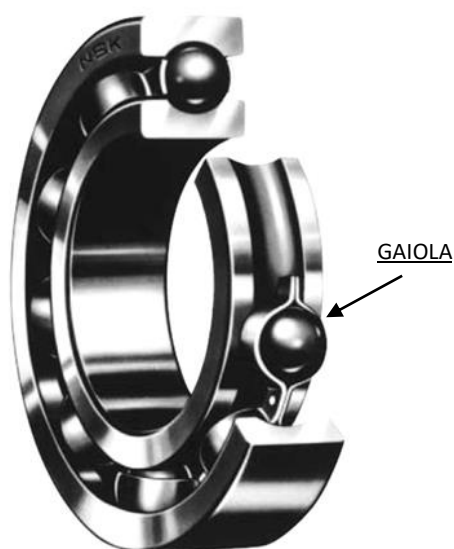
Fonte: Renovar (2016).

Os tipos de rolamentos mais indicados para sistemas de exaustão são os rolamentos do tipo autocompensadores. Eles são os mais indicados devido o sistema de ventilação ser um equipamento vibratório e que está em condições ambientais severas. A ação da vibração dos equipamentos exaustivos expões os rolamentos a altas cargas e a altas velocidades por longos períodos (6).

2.3 Rolamentos

Segundo Santos (2007, p.33) os dispositivos conhecidos como rolamentos (figura 2) são definidos como componentes destinados a suportar cargas dinâmicas e transmitir movimento de rotação. São formados por anéis externos e internos, esferas ou rolos distribuídos de maneira equidistantes entre os anéis e mantidos separados por um acessório chamado gaiola (4).

Figura 2 - Vista em corte de um rolamento fixo de uma carreira de esferas



Fonte: NSK

A classificação dos rolamentos é baseada na direção de carga aplicada em sentido radial, axial e mistas. Os de cargas radiais são aplicados para suportar forças perpendiculares em relação ao eixo, os de cargas axiais são, principalmente, aplicados para suportar forças ao longo do eixo e, os de cargas mistas suportam tanto na direção radial quanto na direção axial.

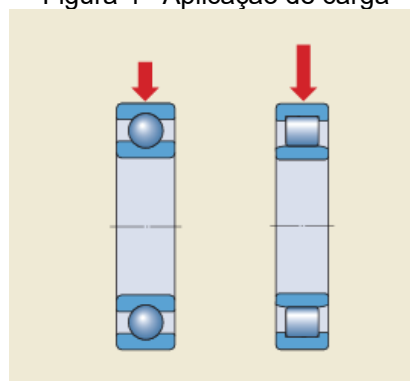
Figura 3 - Cargas aplicadas sobre os rolamentos



Fonte: SKF

Os rolamentos de rolos, geralmente, suportam cargas superiores se comparados aos rolamentos de esferas de tamanhos semelhantes. Isso se deve a superfície de contato ser superior em rolamentos de rolos do que a superfície de rolamentos de esferas, conseqüentemente, ocorre uma maior distribuição da carga. Além disso, os rolamentos com conjunto completo de corpos rolantes podem acomodar cargas superiores que os rolamentos correspondentes com uma gaiola. Basicamente, os rolamentos de esferas são normalmente utilizados em aplicações nas quais as cargas são leves a moderadas e os rolamentos de rolos são usados em aplicações nas quais as cargas são superiores (5).

Figura 4 - Aplicação de carga



Fonte: SKF (2021).

2.4 Tipos de rolamentos

2.4.1 Rolamentos radiais e axiais

Os rolamentos radiais e axiais são classificados pelo tipo de elemento rolante e formato da pista. Como exemplo, temos:

Radiais:

- Rolamentos rígidos de esferas;
- Rolamentos Y;
- Rolamentos de esferas de contato angular;
- Rolamentos autocompensadores de esferas;
- Rolamentos de rolos cilíndricos;
- Rolamentos de rolos de agulhas;
- Rolamentos de rolos cônicos.

Axiais:

- Rolamentos axiais de esferas;
- Rolamentos axiais de esferas de contato angular;
- Rolamentos axiais de rolos cilíndricos;
- Rolamentos axiais de rolos de agulhas;
- Rolamentos axiais de rolos de esferas;
- Rolamentos axiais de rolos cônicos;

2.4.2 Gaiolas

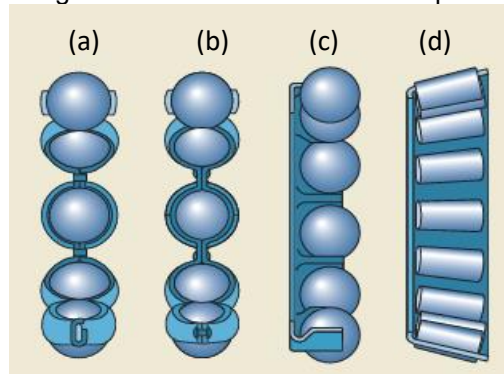
As gaiolas são dispositivos que compõem os rolamentos e tem como função manter os corpos rolantes a uma distância adequada uns dos outros, reduzindo assim o atrito e o aquecimento gerado pelo atrito dentro do rolamento. Além disso, a gaiola também mantém os corpos rolantes distribuídos uniformemente para uma distribuição mais uniforme da carga aplicada ao rolamento, favorecendo assim uma operação mais silenciosa e uniforme (5).

As gaiolas podem ser classificadas de acordo com o processo de fabricação e pelo tipo de material aplicado. Como exemplos, podem ser citadas: gaiolas em metal estampado, gaiolas em metal usinado e gaiolas em polímero.

As gaiolas de metal estampado utilizadas em rolamentos são feitas de aço laminado e, em algumas ocasiões, de latão. Dependendo do rolamento, as gaiolas de metal estampado estão disponíveis como gaiola do tipo fita (a), gaiola rebitada (b),

gaiola do tipo encaixe (c) ou como gaiola tipo janela (d). Exemplos das gaiolas são mostradas na figura 5.

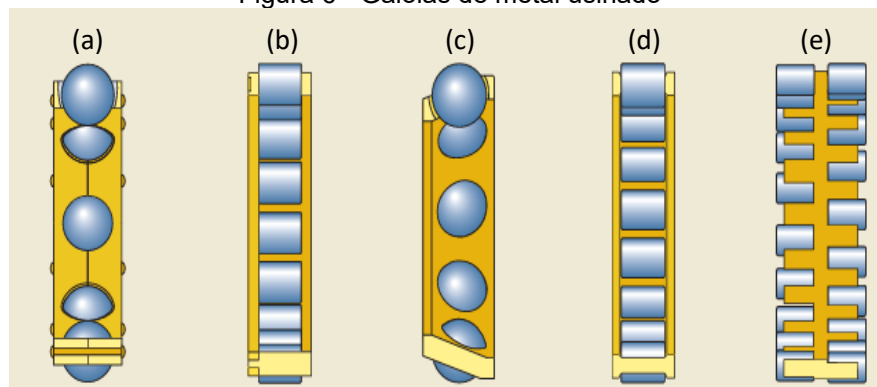
Figura 5 - Gaiolas de metal estampado



Fonte: SKF (2021).

Se tratando de gaiolas de metal usinado para rolamentos, elas são feitas de latão, aço ou liga leve. As gaiolas de latão são feitas de ligas AISI C36000 e ligas AISI C38500. Já para as gaiolas de aço, são utilizados aços de baixa liga, como o aço 25CrMo4. Considerando o tipo de rolamento, as gaiolas de metal usinado são disponíveis como gaiola rebitada usinada de duas peças (a), gaiola usinada em duas peças com rebites integrados (b), gaiola de metal do tipo janela usinada em uma peça (c), gaiola usinada em uma peça com rebites integrados (d) e gaiola de metal usinado em duas peças do tipo pente (e) (6).

Figura 6 - Gaiolas de metal usinado



Fonte: SKF (2021).

2.4.3 Lubrificação

O termo lubrificação, segundo Belmiro e Carreteiro (2006), pode ser definido como um fenômeno da redução de atrito entre duas superfícies em movimento relativo, por meio da aplicação de uma substância entre elas. Essas substâncias podem ser sólidas ou fluídas, como óleos e graxas. A função basicamente da lubrificação é permitir a substituição do atrito direto pelo atrito fluído. Com isso, a aplicação do lubrificante deverá ser feita entre duas superfícies deslizantes do material para evitar o contato direto entre as duas superfícies, evitando assim o processo de desgaste ocasionado pelo atrito. Em máquinas industriais, por exemplo, a lubrificação desempenha um papel que visa aumentar o tempo de vida útil do equipamento, redução do consumo de energia, formação de vedação e amortecimento de choques (7, 20).

Se tratando dos rolamentos de esferas, eles devem estar adequadamente lubrificados para se operar de maneira confiável e evitar o contato direto de metal com metal entre os corpos rolantes, pistas, gaiolas e outros componentes. Essa lubrificação também inibe o desgaste e protege as superfícies do rolamento contra a corrosão. Uma ampla gama de lubrificantes, óleos e graxas estão disponíveis para lubrificar os rolamentos de esferas. Porém, a escolha de um lubrificante depende principalmente das condições de operações, como faixa de temperatura, velocidade, vibração e cargas (5).

O lubrificante presente no rolamento perde gradualmente suas propriedades e isso se deve ao resultado do trabalho mecânico gerado pelo movimento do rolamento. Com isso, é necessário que a graxa ou o óleo seja recarregada ou renovada em intervalos regularmente.

2.5 Tipos de lubrificação

2.5.1. Lubrificação a graxa

Os rolamentos de esferas, em sua maioria, são lubrificados com graxa. Fazendo comparativo com o óleo, a vantagem é que a graxa tem retenção com mais facilidade no arranjo de rolamentos, principalmente onde os eixos estão inclinados ou

na vertical. Além disso, a graxa também contribui para o vedar o conjunto do rolamento contra contaminantes sólidos e líquidos, assim como contra a umidade (8).

A quantidade de graxa aplicada no rolamento está diretamente relacionada a sua aplicação. Uma quantidade pequena de graxa gera um contato de metal com metal e, assim, a falha prematura do rolamento. Para grandes quantidades de graxa, fazem com que a temperatura operacional aumente rapidamente em altas velocidades (5).

As graxas lubrificantes são compostas de óleo sintético ou mineral combinado com um espessantes (considerados sabões metálicos). No entanto, outros espessantes, como poliureia, e são usados para rolamentos em altas temperaturas. São também utilizados aditivos para melhoramento das propriedades das graxas. Para uma boa escolha de graxa, são considerados os seguintes fatores: faixa de temperatura, consistência, viscosidade, proteção contra corrosão, capacidade de carga, miscibilidade.

2.5.2 Lubrificação a óleo

A lubrificação a óleo é geralmente aplicada para rolamentos de esferas que possuem altas velocidades ou temperaturas operacionais que não são indicadas o uso de graxa; quando o excesso de calor deve ser removido da posição do rolamento; e outros componentes adjacentes, como engrenagens, são lubricados por óleos.

Os métodos de aplicação do óleo no rolamento são conhecidos como: método de lubrificação por óleo circulante, método por jato de óleo e método ar-óleo.

A seleção dos óleos lubrificantes é baseada principalmente na viscosidade necessária para gerar um filme hidrodinâmico suficientemente espesso em temperatura operacional normal. A viscosidade do óleo está diretamente relacionada a temperatura, tornando-se inferior à medida que a temperatura é aumentada. Essa relação viscosidade-temperatura de um óleo é caracterizada pelo índice de viscosidade. Para rolamentos de esferas, são recomendados óleos com índice de viscosidade de pelo menos 95, ou seja, que possua baixa alteração na temperatura (5, 8).

Rolamentos autocompensadores de rolos, rolamentos de rolos cônicos e rolamentos axiais autocompensadores de rolos, normalmente possuem temperatura

operacional mais alta do que outros tipos de rolamentos, como os rolamentos rígidos de esferas e rolamentos de rolos cilíndricos, em condições operacionais comparáveis.

A troca de óleo depende diretamente principalmente das condições operacionais e da quantidade de óleo aplicado. Para o método de lubrificação banho de óleo, é necessário a troca do óleo uma vez por ano desde que a temperatura não exceda 50°C e que possua pouco risco de contaminação. Para temperatura mais altas, por exemplo 100°C, é recomendado a troca do óleo a cada três meses. Já para o método de lubrificação por óleo circulante, a troca do óleo é determinado pela frequência com que a quantidade de óleo total é circulada e se o óleo é ou não resfriado. Por meio de testes e inspeção regular para análise do óleo está contaminado ou oxidado. E isso é aplicado para os métodos de lubrificação com jato de óleo. Com o método de lubrificação ar-óleo só passa pelo rolamento uma vez e não é circulado novamente.

2.6 Tipos de aços usados em rolamentos (microestruturas) e tratamento térmico

Os rolamentos são feitos de materiais que determinam, em grande parte, o desempenho e a confiabilidade do conjunto. Para os anéis e corpos rolantes do rolamento, devem ser considerados a dureza para a capacidade de carga, resistência à fadiga na área de contato rolante, sob condições de lubrificação limpa ou contaminada e a estabilidade dimensional dos componentes do rolamento. Para a gaiola, as considerações abrangem atrito, esforços compressivos, forças de inercia e, em alguns casos, a ação química de determinados aditivos lubrificantes e solventes. Outros parâmetros operacionais também devem ser levados em consideração, como umidade, temperaturas elevadas e as cargas aplicadas.

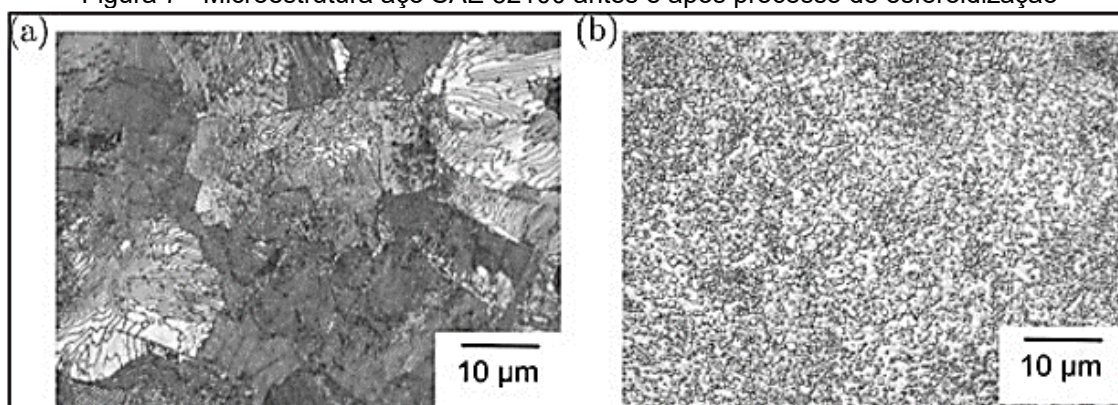
Os materiais para os anéis de rolamento e corpos rolantes são de diversos tipos de ligas metálicas. Dentre elas, temos as ligas de aços ferramenta temperados e revenidos, aços cementados, aços inoxidáveis e aços aplicados em alta temperatura. Esses aços além de apresentar uma microestrutura adequada a partir da composição química e tratamento térmico, devem apresentar uma baixa relação de inclusões metálicas para uma boa durabilidade do rolamento. As inclusões metálicas atuam como facilitadores de nucleação de trincas e por isso devem ser evitadas ou mantidas em baixos níveis (9).

2.6.1 Aço temperado

Os aços temperados são um dos aços mais utilizados para a fabricação dos anéis e corpos rolantes dos rolamentos. O tratamento que esses aços são submetidos é conhecido como têmpera. Esse tratamento tem como formação a partir de uma microestrutura metaestável decorrente do resfriamento acelerado com transformação da fase austenítica em martensítica. Considerando a produção em escala industrial, o tratamento térmico têmpera seguido de revenimento é utilizado amplamente logo após uma etapa de conformação mecânica dos componentes (9, 10).

Dentre os aços temperados mais utilizados para a produção de rolamentos é o aço SAE 52100. Esse tipo de aço é considerado de alto carbono, cuja composição é 0,98 -1,03% de carbono (C), 0,38 – 0,41% de manganês (Mn), 0,16 - 0,32% de silício (Si), 1,39 -1,43% de cromo (Cr), 0,07% de níquel (Ni), 0,02% de molibdênio (Mo), 0,12% de cobre (Cu), 0,017 – 0,06% de estanho (Sn), 0,019 – 0,12% de fósforo (P). Esse aço normalmente é fornecido na condição laminada a quente, cuja microestrutura é a perlítica incluindo a presença de carbonetos, oriundos dos contornos de grãos da austenita. A presença de cementita pró eutetóide nos contornos de grão da austenita afeta negativamente a vida em fadiga dos rolamentos quando submetidos a testes com tensões superiores a 5 GPa. Para minimizar o impacto da cementita pró-eutetóide, é necessário um recozimento para que ocorra a esferoidização da cementita (11). A microestrutura de um aço SAE 52100 é apresentada a seguir, cuja a imagem (a) é da microestrutura após o processo de laminação e a imagem (b), da microestrutura após a esferoidização.

Figura 7 - Microestrutura aço SAE 52100 antes e após processo de esferoidização



Fonte: Bhadeshia (2001) (20).

Após os tratamentos térmicos, a microestrutura típica do aço SAE 52100 passa a ser de matriz martensita revenida com carbonetos primários e austenita retida entre 5 e 15%. A dureza ao longo da seção é normalmente de 60 a 64 HRC (11).

2.6.2 Aço cementado

Alguns tipos de rolamentos, como os cônicos de rolos, são fabricados com aços para cementação tais como aços SAE 4320 e 8620. Esses aços possuem baixos teores de carbono, em torno de 0,20%, e são submetidos ao processo de cementação para que a camada superficial tenha resistência e o núcleo tenha deformabilidade e tenacidade. A microestrutura dos aços de baixo carbono é composta de martensita de alto carbono, com austenita retida na faixa de 15 a 40% e possuem dureza superficial em torno de 58 a 64 HRC (12).

A cementação tem como objetivo, produzir uma camada de alta dureza e alta resistência ao desgaste através do aumento do teor de carbono na superfície da peça. Após aplicação dessa camada, a superfície pode suportar cargas elevadas e resistir à fadiga provenientes do contato por rolamento, cujo o núcleo permanece tenaz. Além disso, as tensões residuais geradas pelo processo de cementação podem aumentar a vida em fadiga do rolamento, uma vez que a camada superficial permanece em compressão.

Os aços cementados, assim como os aços temperados, podem operar continuamente em temperaturas de até 125°C e, em casos de aplicações consideradas não críticas, o mesmo pode ser usado a 200°C. As temperaturas de trabalho dos rolamentos de esferas, segundo Böhmer et al, foram medidas em diversas condições e chegaram a um limite de 80°C (para tensões de Hertz = 1500 MPa e 2000 rpm) e 265°C (para tensões de Hertz = 3000 MPa e 14000 rpm).

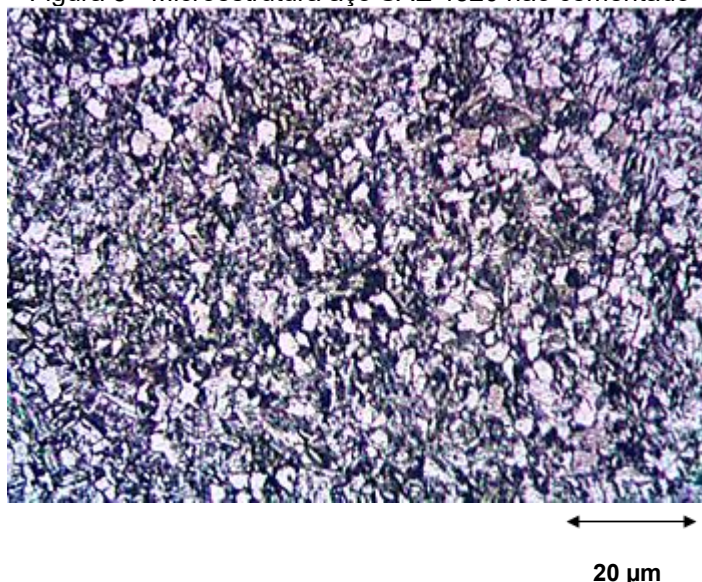
2.6.3 Aço SAE 4320

O aço SAE 4320 é classificado como baixa liga e com valores de 0,20% de carbono em peso. Sua composição química é composta por 0,4 – 0,6% de Cromo (Cr), 1,65 – 2,0% de Níquel (Ni) e 0,2 – 0,3% de Molibdênio (Mo). Esse aço possui

boa tenacidade, boa forjabilidade, boa soldabilidade e elevada resistência mecânica após tratamentos térmicos, como a cementação. Além disso, esse aço possui baixa usinabilidade e boa soldabilidade, tanto por fusão quanto por resistência elétrica.

A microestrutura, em geral, do aço SAE 4320 é formada pela presença de grãos de ferrita e perlita, incluindo, também, a presença de carbonetos, carbonetos de cromo e molibdênio, devido à presença destes elementos de liga na composição química do material (figura 8). Após a cementação, o aço SAE 4320 pode apresentar dureza de 62,5 HRC (21). Diversos elementos de liga têm elevada afinidade pelo carbono e podem formar carbonetos estáveis no aço, tais como: cromo, tungstênio, vanádio, titânio, nióbio e molibdênio (13).

Figura 8 - Microestrutura aço SAE 4320 não cementado



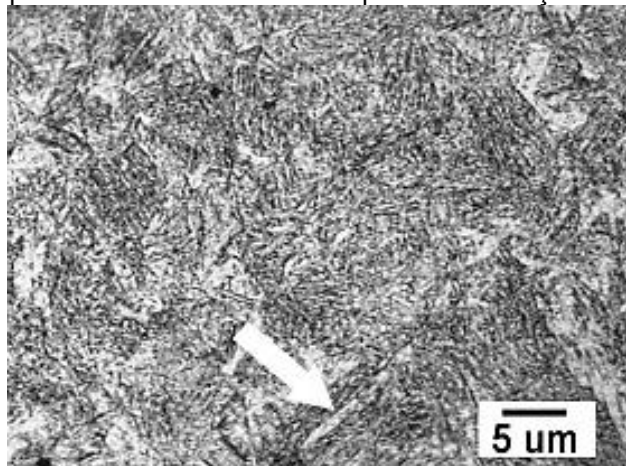
Fonte: Garcia (2017) (22).

2.6.4 Aço SAE 8620

O aço SAE 8620 é um aço de baixa liga, cujo tratamento térmico mais utilizado é a têmpera e, posteriormente, a cementação. Após esse tratamento térmico, a liga apresenta elevada dureza superficial que confere uma maior resistência ao desgaste e resistência a fadiga. Além disso, após o processo de cementação, o grau de deformação provenientes de tensões residuais aumenta e sua composição é alterada em função do carbono adicionado. O tratamento térmico de têmpera é realizado na faixa de 840 a 900°C com exposição a atmosfera cementante; o resfriamento pode

ser feito em água ou óleo com uma dureza entre 55 e 62 HRC (14). Após os tratamentos térmicos aplicados, observa-se a formação de finas ripas de martensita, como pode ser observado na figura a seguir.

Figura 9 - Ripas de martensita formadas após a cementação – Aço SAE 8620

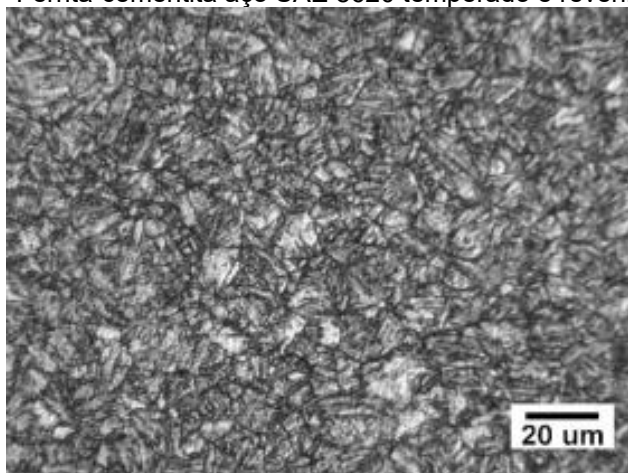


Fonte: Leitão (2013)

A martensita formada possui resistência, porém apresenta determinada fragilidade, necessitando assim de outro tratamento térmico, mais conhecido como revenimento para que ocorra na melhora das propriedades mecânicas do aço em questão. Em suma, a martensita é uma fase metaestável que tende a reverter para uma fase estável por meio da difusão do carbono através de um processo que depende da temperatura e do tempo.

O processo de revenimento é dividido em quatro estágios. No primeiro estágio, o aço carbono é aquecido até 250°C, onde ocorre a precipitação de carbonetos e a perda da tetragonalidade da martensita. O segundo estágio, que ocorre entre 200 e 300°C, ocorre a decomposição da austenita retida. O terceiro estágio ocorre entre 200 e 350°C, consistindo na transformação do carboneto pela cementita e nenhuma presença da tetragonalidade da martensita. Por fim, o quarto estágio, que ocorre acima de 350°C, tem-se a formação da cementita esferoidizada e na recristalização da ferrita. Na figura 10, a imagem configura o resultado final após o processo de revenimento aplicado ao aço SAE 8620 (13).

Figura 10 - Ferrita-cementita aço SAE 8620 temperado e revenido a 530°C



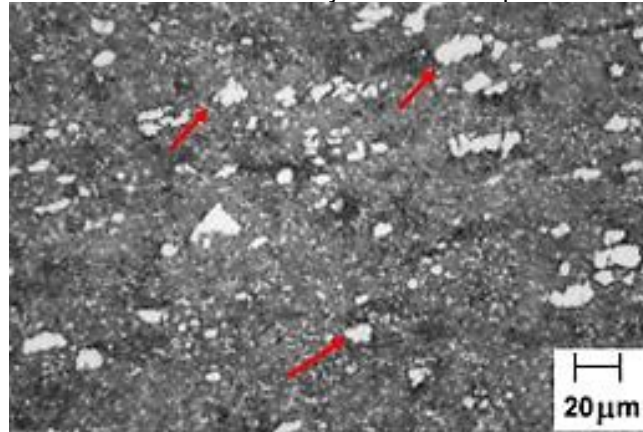
Fonte: Colpaert (2008).

2.6.5 Aços Inoxidáveis

De maneira geral, os aços inoxidáveis são ligas metálicas comumente compostas de ferro e cromo, podendo conter outros elementos de liga, como níquel e molibdênio. São ligas que possuem grande resistência à oxidação e corrosão devido ao fenômeno de passivação, ou seja, a formação de uma camada de óxido e a dissolução dessa camada no meio corrosivo (15).

Os aços inoxidáveis mais utilizados para a fabricação de rolamentos são os aços de alto teor de cromo, como os aço AISI 440C. É um aço inoxidável martensítico cuja composição possui alto teor de carbono e cromo, o que permite que seja tratada termicamente a fim de se obter boas propriedades mecânicas. Sua composição basicamente é formada por 0,95 – 1,20% de carbono (C), 0 – 1% de silício (Si), 0 – 1% de manganês (Mn), 13 – 18% de cromo (Cr), 0 – 0,75 de molibdênio (Mo), 0 – 0,04% de fósforo (P) e 0 – 0,03% de enxofre (S). A presença de uma quantidade suficiente de carbono faz com que ocorra a transformação da microestrutura com a formação de carbonetos na matriz martensítica, após o tratamento térmico de recozimento. Esse tratamento térmico de recozimento consiste em fornecer calor suficiente para que seja possível a uniformização da microestrutura (16). A figura abaixo demonstra a presença de carbonetos (setas vermelhas) na microestrutura da liga AISI 440C após o recozimento.

Figura 11 - Microestrutura do aço AISI 440C após recozimento



Fonte: Puli, Ram (2012).

O aço AISI 440C possui elevada dureza (57 HRC), elevada resistência ao desgaste e pode ser submetido aos tratamentos térmicos como o recozimento, têmpera seguida de revenimento, havendo assim o alívio de tensões.

2.7 Principais falhas em rolamentos

As principais falhas em rolamentos podem ser resultantes de vários mecanismos operando simultaneamente, com uma combinação complexa de parâmetros influenciadores, que, frequentemente, causam dificuldades no que diz respeito à estabilização de causa primária de dano. A categorização dos danos encontrados em rolamentos é baseada na norma ISO 15243:2004, que define, classifica e descreve as características das causas das falhas de rolamentos (18).

Dentre os danos encontrados em rolamentos, temos:

- Fadiga

A fadiga é definida como a alteração na estrutura do material causada pelas tensões cíclicas desenvolvidas nas áreas de contato entre os elementos rolantes e as pistas.

Em componentes que trabalham com alternância de tração e compressão, carregamentos cíclicos ou combinados a flexão, é comum observar a ocorrência de trincas após um determinado tempo em serviço, seguindo e gerando com a fratura do material. Essa fratura inicia através de trincas microscópicas na região de maior incidência do carregamento. E, com o decorrer da alternância de esforços é que

ocorre a propagação destas pequenas trincas e a consequente redução da seção do componente que resiste ao carregamento aplicado.

O risco de falhas por fadiga pode ser reduzido através do refinamento do projeto e aplicação de boas técnicas de fabricação e reparo, onde pontos do componente com possível acúmulo de tensões deve ser eliminados. O refinamento superficial por meio de tratamentos térmicos como cementação, endurecimento por encruamento, nitretação e cromagem também produzem resultados favoráveis (18).

- Corrosão

A corrosão é um processo eletroquímico de desgaste dos componentes rotativos quando expostos no meio em operação. O início de desgaste ocorre na superfície do componente, acarretando na redução da massa e alteração na forma e dimensões dos componentes de maneira gradativa (17).

O processo ocorre independente do regime de operação em que os componentes do equipamento estão submetidos. Para os rolamentos que trabalham sob condições corrosivas, eles devem possuir ligas metálicas resistentes (presença de níquel e cromo na composição química), ou pela aplicação de revestimentos de proteção que podem ser metálicos (níquel, cromo, cobre e zinco) ou não metálicos (pintura, plásticos e cerâmicas).

- Fratura (Trinca)

As trincas tem como principais causas problemas introduzidos durante o processo de montagem, no qual, estão diretamente relacionados a queda por descuido no manejo, batidas no processo de montagem do equipamento, deficiência geométrica do eixo ou da caixa de mancal, raio de concordância no ressalto do eixo muito grande, funcionamento sob temperatura elevada em decorrência de fricção, corrosão por contato, descascamento e deficiência de lubrificação. Por sua vez, as fraturas são as quebras localizadas que ocorrem em componentes de rolamentos. Constituem os estágios posteriores a fadiga, corrosão e trincas, possuindo dimensões consideravelmente superiores e essas fraturas podem ser encontradas em todos os componentes do rolamento (18).

3. Materiais e métodos

3.1. Apresentação da situação problema

A situação problema apresentada é baseada em uma análise de falha no rolamento dos mancais de um ventilador de exaustão (figura 12). Esse ventilador é utilizado em um ambiente contendo um forno de fusão de ligas de alumínio, no qual houve o empenamento do conjunto rotativo do sistema de exaustão, registrado após uma manutenção do equipamento. O sistema de exaustão apresentava temperatura excessiva de funcionamento desde julho de 2023, no qual, o status de alerta foi apresentado em setembro do mesmo ano (32). Logo, o sistema apresentava sinais de irregularidade dois meses antes do empenamento do eixo.

Figura 12 - Ventilador do sistema de exaustão de uma sala de fornos de uma indústria

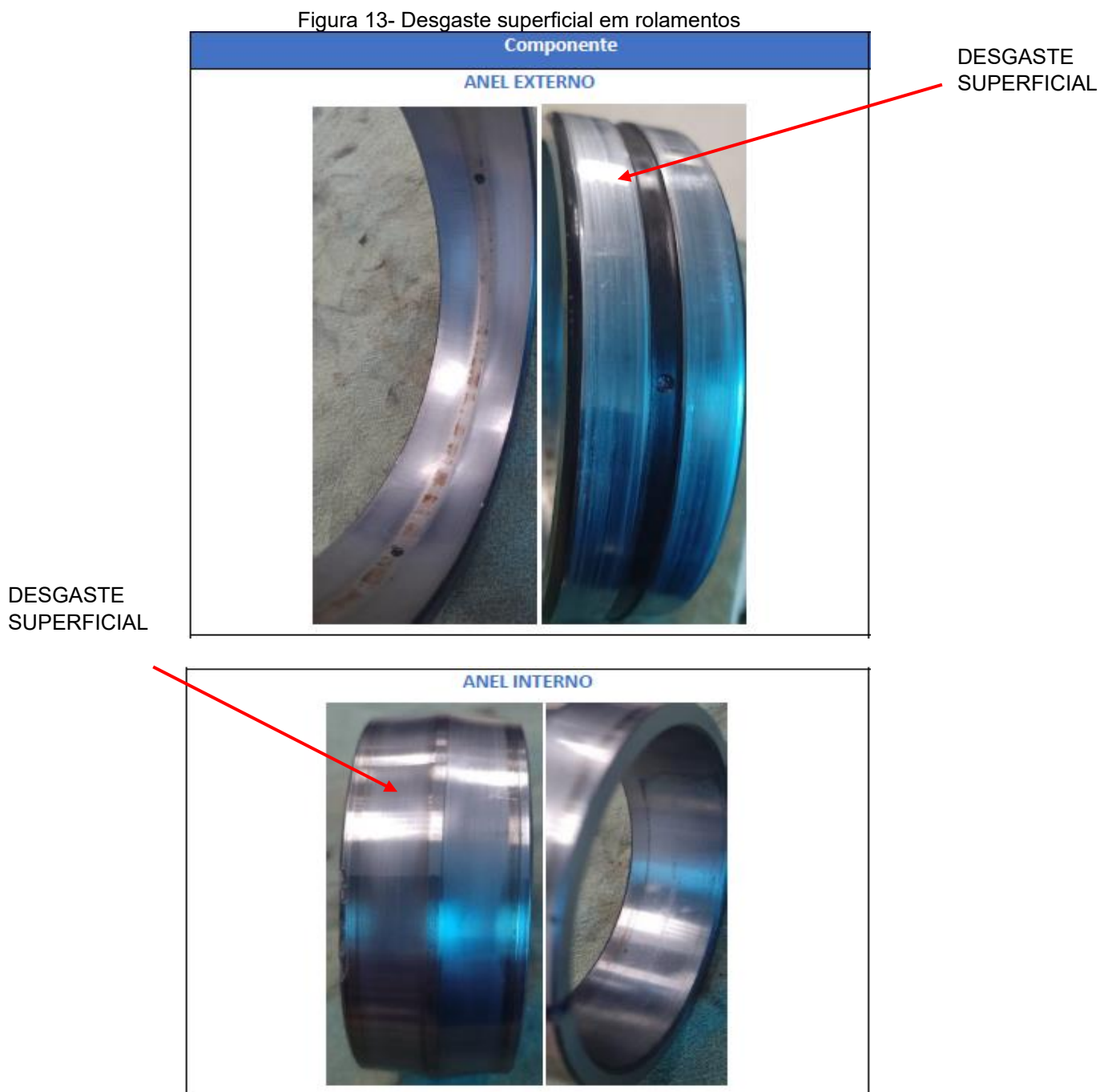


Fonte: Adaptado de CBA (2023) (32).

Os rolamentos presentes no sistema são do tipo autocompensador de furo cônico, do modelo 22216 EK/C3, da marca SKF, com rotação de 1800 rpm e temperatura de operação de até 70°C. Esse modelo de rolamento é feito de aço laminado e suporta altas cargas em diferentes direções (29). A lubrificação aplicada ao sistema é do tipo graxa, cuja troca é realizada a cada dois meses e a marca do lubrificante é Mobilith SHC 100. A graxa Mobilith SHC 100 é constituída de uma base

sintética de complexo de lítio com grau NLGI 2 (grau NLGI mede a rigidez da graxa) (28) e, que neste caso, para valor 2, a graxa é considerada macia, e sua faixa operacional varia de -40 a 150°C (30).

Algumas fotografias dos componentes dos rolamentos são apresentadas a seguir com evidências físicas dos modos de falhas dos rolamentos de modelo 22216 EK/C3, baseado na norma ISO 15243:2017 (31).

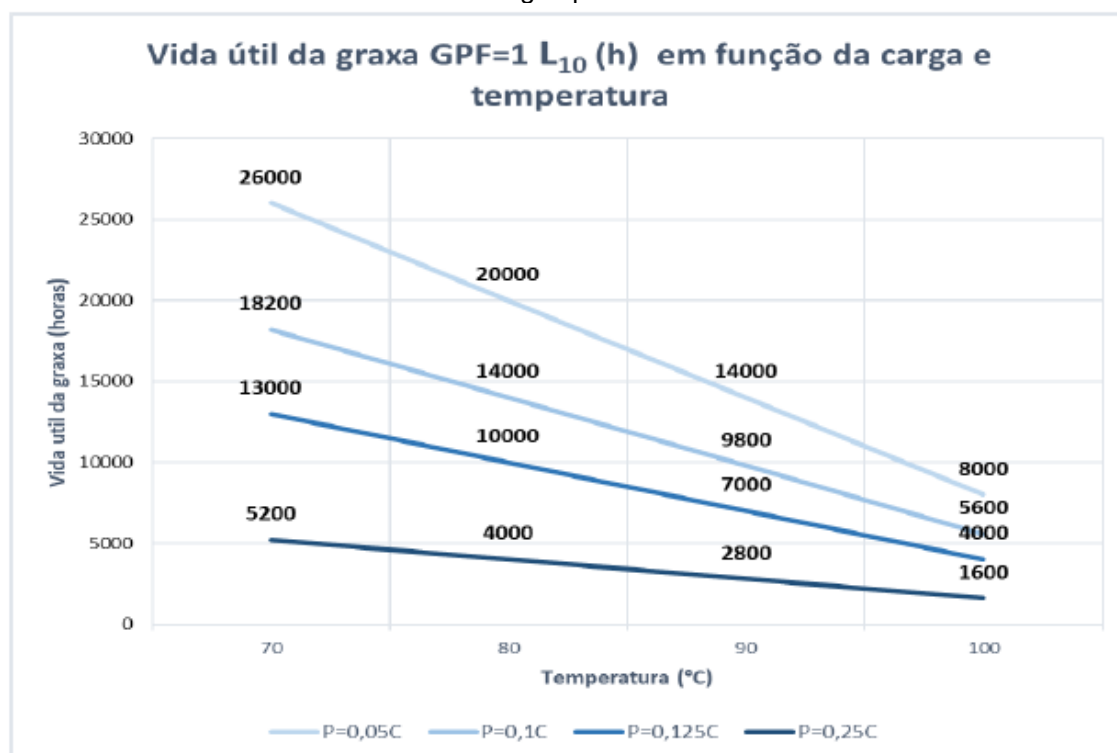


Fonte: Adaptado de CBA (2023) (32).

Como apresentado nas imagens, os modos de falha encontrados nos rolamentos são, predominantemente, o desgaste abrasivo e as deformações plásticas com igual espaçamento entre os elementos rolantes devido à sobrecarga no sistema. Ambos os defeitos estão presentes de maneira uniforme nas pistas dos rolamentos. O desgaste abrasivo, por sua vez, está relacionado à lubrificação insuficiente, condições operacionais, contaminação e erros de montagem.

As falhas apresentadas, por mais que sejam causadas por situações diferentes, possuem certo envolvimento de forma que uma falha crie outra falha, em que neste caso, uma correia muito tensionada ou polias desalinhadas geram sobrecarga nos rolamentos e no conjunto rotativo. Dessa forma, a vida útil da graxa é reduzida conforme pode ser observado no gráfico da figura abaixo.

Figura 14 - Tempo de vida útil da graxa com óleo de base sintética em função da temperatura e da carga aplicada



Fonte: CBA (2023) (32).

Como pode ser observado no gráfico acima, conforme há o aumento da temperatura e da carga aplicada, menor é a vida útil da graxa e mais suscetível estão os rolamentos em apresentar falhas em sua superfície.

O que se pode concluir com a situação problema apresentada, é que o sistema de exaustão apresentou um desalinhamento ou desbalanceamento em sua estrutura, gerando assim uma sobrecarga ao eixo do ventilador, que apresentou desgaste abrasivo e deformações plásticas na superfície dos rolamentos, diminuindo assim a vida útil do conjunto aplicado no sistema de exaustão.

Esse trabalho de TCC foca na seleção de aços e de graxas mais adequados para aumentar a vida útil desses componentes, além auxiliar na manutenção, caso específico da graxa empregada

Portanto, com o problema apresentado, o presente trabalho com foco na seleção de materiais buscou com auxílio do software GRANTA Edupack e pelo método TOPSIS, trazer novas alternativas de tipos de aços e lubrificantes para serem aplicados aos materiais que compõem os rolamentos e as graxas apresentadas no problema acima.

3.2. Métodos

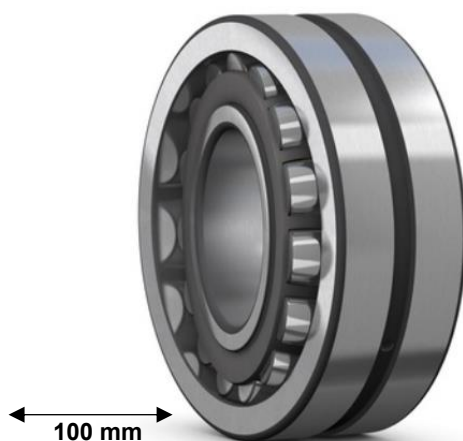
3.2.1 Propriedades importantes para a seleção do aço para rolamentos

Ao determinar os materiais que serão comparados para serem aplicados em uma área específica, é necessário obter as principais propriedades que serão analisadas. Com isso, é importante observar as solicitações e o ambiente em que esse dispositivo está operando.

Considerando que o rolamento utilizado seja do tipo autocompensador (figura 15) e que esteja instalado em um sistema de exaustão industrial, o material do dispositivo deve suportar altas cargas axiais, altas cargas radiais, vibrações, desalinhamento do sistema e longos períodos de operação. Portanto, devem ser consideradas as propriedades como alta dureza, alta resistência a fadiga, alta tenacidade, alto limite de escoamento e alto módulo elástico, e que seja viável a produção. Logo, o custo deve ser levado em consideração. A vida útil de um rolamento acaba se limitando por desgaste e fadiga. Ambas as propriedades são compensadas com a utilização de materiais duros com boa tenacidade após tratamentos térmicos (24). Dito isto, para a tomada de decisão, deve-se considerar que o material seja de

aço alta liga ou aço ferramenta, em que ambos os aços possuem alta dureza após sujeitos a tratamentos superficiais (24).

Figura 15 - Rolamento autocompensador



Fonte: SKF (2021).

Seguindo o processo de triagem e definição de qual material a ser selecionado, o quadro a seguir demonstra a função, as restrições, o objetivo e variáveis livres que foram utilizadas para a determinação do aço.

Quadro 1 - Características do aço para aplicação em rolamentos

Função	O Rolamento deve suportar altas cargas e elevada resistência a fadiga cíclica
Restrições funcionais	Elevada dureza Elevado limite de escoamento Boa Tenacidade Adaptação à temperatura de trabalho
Restrições absolutas	Dureza (HV) > 575 HV
Objetivo	Diminuir o desgaste superficial
Variável livre	Escolha do material

Fonte: SKF (2021) (8).

3.2.2 Propriedades importantes para a determinação do lubrificante para rolamentos

Os lubrificantes, seja ele graxa ou óleo, são substâncias usadas para reduzir o atrito e o desgaste em superfícies metálicas em movimento. Neste trabalho, por ser tratar de um sistema rotativo como o rolamento, será examinada a graxa como lubrificante. A graxa é considerada uma mistura de um lubrificante base e um espessante (sabão metálico ou polímero). A combinação dessa mistura gera uma substância viscosa que pode ser aplicada sobre a superfície de forma mais precisa e com menor risco de vazamento. Além disso, esse tipo de lubrificação é amplamente utilizado em superfícies de contato que estão sujeitas a altas cargas e a altas velocidades, como os rolamentos (7).

As propriedades do lubrificante para aplicação em rolamentos devem possuir boa viscosidade, boa estabilidade mecânica, resistência a pressão, resistência a água e estar apta a ser aplicada na faixa de temperatura adequada. Com isso, para o presente trabalho foram selecionados 5 tipos de graxas da marca SKF, por meio do catálogo da SKF (28), no qual, todas apresentavam condições necessárias para aplicação em rolamentos. E, os critérios para a seleção foram baseados na composição da graxa, consistência, viscosidade do óleo-base, faixa de temperatura de operação e estabilidade mecânica. E, com o auxílio do método TOPSIS foi determinada a melhor opção.

3.2.4 Levantamento das propriedades

Para o caso dos aços as seguintes propriedades mecânicas foram obtidas com base no software GRANTA Edupack: limite de escoamento, dureza, tenacidade e resistência à fadiga.

As propriedades dos aços obtidas foram reunidas em tabelas para a realização comparativa em dois cenários: o primeiro cenário, considerado um cenário referencial, em que os pesos foram distribuídos de maneira mais homogênea para as propriedades de limite de escoamento, dureza, tenacidade e resistência a fadiga. E para o segundo cenário, considerado cenário prioritário, onde as propriedades de dureza e tenacidade foram relacionadas com maior peso, de acordo com a tabela 1.

Com isso, foi utilizado o método TOPSIS para a classificação de cada um dos tipos de aços candidatos.

Tabela 1 - Propriedades dos aços com as ponderações nos dois cenários

Ponderação	Limite de escoamento (MPa)	Dureza (HV)	Tenacidade (KJ/m ²)	Resistência a fadiga (MPa)	Custo (R\$/Kg)	Temperatura máxima de trabalho (°C)
Cenário 1	2,25	2,25	2,25	2,25	0,5	0,5
Cenário 2	1,5	3	3	1,5	0,5	0,5

Fonte: Autoria Própria (2024)

Já para os lubrificantes foi considerada a composição, e, no caso, os espessantes, a propriedade reológica, propriedade térmica e para isso foi aplicado uma ponderação (peso) em cada propriedade abordada, conforme tabela 2 a seguir. As propriedades de menor importância ficaram com pesos próximo de 0 e as propriedades de maior importância ficaram com pesos de no máximo a 3. No qual, a soma de pesos totais é igual a 10.

Tabela 2 - Propriedades dos lubrificantes e sua respectiva ponderação

	Consistência NLGI	Viscosidade (40°C)	HTPL – limite de desempenho sob alta Temp.	Estabilidade mecânica 50 h a 80°C
Ponderação	3	3	2	2

Fonte: Autoria Própria (2024)

3.2.5. Método TOPSIS

O método por tomada de decisão com múltiplos atributos é um método de decisão multicritério para a escolha da alternativa mais próxima da ideal necessária para determinada aplicação. Ou seja, o TOPSIS é uma maneira de identificar uma alternativa que está mais próxima da solução ideal e mais distante da solução não ideal. A palavra TOPSIS significa Técnica de ordem de preferência por similaridade para a solução ideal, podendo ser descrito como uma comparação de um conjunto de

alternativas com pesos para cada critério, seguido de normalização dos pesos e, posteriormente, calcula-se a similaridade entre cada alternativa. A alternativa que possuir maior pontuação é a solução mais próxima da ideal e a de menor pontuação é a solução mais distante da ideal. (38)

4. Resultados

Primeiramente foi realizada uma filtragem dos materiais metálicos ofertados pelo software Granta Edupack. Como apresentado na literatura, os rolamentos são, em sua maioria, produzidos com emprego de aços alto carbono, ou seja, possuem alto teor de carbono, e de aços ferramenta com inserção de elementos de liga. Foram geradas 26 opções de aços (figura 16) e seus valores de dureza Vickers, selecionados entre 1861 materiais metálicos apresentados pelo software.

Figura 16 - Candidatos à seleção do aço para o presente projeto – GRANTA Edupack

3. Results: 26 of 1861 pass	
Show:	Pass all Stages
Rank by:	Stage 3: Hardness - Vickers (HV)
Name	Hardness - Vickers (HV)
Carbon steel, AISI 1080, annealed	160 - 200
Carbon steel, AISI 1095, annealed	180 - 220
Carbon steel, AISI 1095, water quenched & tempered at 650°C	220 - 260
Carbon steel, AISI 1080, oil quenched & tempered at 650°C	240 - 280
Carbon steel, AISI 1095, oil quenched & tempered at 650°C	250 - 300
Carbon steel, AISI 1095, water quenched & tempered at 540°C	265 - 325
Carbon steel, AISI 1080, normalized	270 - 330
Carbon steel, AISI 1095, normalized	270 - 330
Carbon steel, AISI 1080, as rolled	270 - 330
Carbon steel, AISI 1095, as rolled	270 - 330
Carbon steel, AISI 1095, oil quenched & tempered at 540°C	300 - 350
Carbon steel, AISI 1080, oil quenched & tempered at 540°C	300 - 350
Carbon steel, AISI 1095, oil quenched & tempered at 425°C	335 - 395
Carbon steel, AISI 1095, oil quenched & tempered at 315°C	350 - 410
Carbon steel, AISI 1080, oil quenched & tempered at 425°C	350 - 410
Carbon steel, AISI 1080, oil quenched & tempered at 315°C	360 - 420
Carbon steel, AISI 1080, oil quenched & tempered at 205°C	360 - 420
Carbon steel, AISI 1095, water quenched & tempered at 425°C	360 - 430
Carbon steel, AISI 1095, oil quenched & tempered at 205°C	370 - 430
Carbon steel, AISI 1095, water quenched & tempered at 315°C	490 - 580
Carbon steel, AISI 1095, water quenched & tempered at 205°C	550 - 650
Tool steel, chromium alloy high carbon, AISI D5 (cold work)	580 - 630
Tool steel, chromium alloy high carbon, AISI D2 (cold work)	580 - 640
Tool steel, chromium alloy high carbon, AISI D4 (cold work)	580 - 640
Tool steel, chromium alloy high carbon, AISI D3 (cold work)	580 - 640
Tool steel, chromium alloy high carbon, AISI D7 (cold work)	580 - 660

Fonte: Granta Edupack (2019)

Tendo como ponto de partida os valores das propriedades do aço SAE 52100 revenido, este foi considerado como sendo a referência para a tomada de decisão. Como o objetivo do rolamento é suportar altas cargas, parece importante que o aço escolhido para a aplicação já descrita possua valores de dureza e de limite de escoamento superiores ao aço SAE 52100 revenido, já que este apresentou defeitos superficiais durante sua aplicação como apresentado na situação problema anteriormente. O aço 52100 é um dos aços mais largamente empregados na fabricação de rolamentos (37). Com isso, aplicando como valor mínimo de dureza igual a 575 HV (35), dos aços apresentados, restaram como opções apenas 6 dos 26 selecionados, como observado na figura 17.

Figura 17 - Aços alto carbono e Aços ferramentas selecionados acima de 575 HV - GRANTA Edupack

3. Results: 6 of 1861 pass

Show:

Rank by:

Name	Hardness - Vickers (HV)
Tool steel, chromium alloy high carbon, AISI D7 (cold work)	580 - 660
Carbon steel, AISI 1095, water quenched & tempered at 205°C	550 - 650
Tool steel, chromium alloy high carbon, AISI D4 (cold work)	580 - 640
Tool steel, chromium alloy high carbon, AISI D2 (cold work)	580 - 640
Tool steel, chromium alloy high carbon, AISI D3 (cold work)	580 - 640
Tool steel, chromium alloy high carbon, AISI D5 (cold work)	580 - 630

Fonte: Granta Edupack (2019)

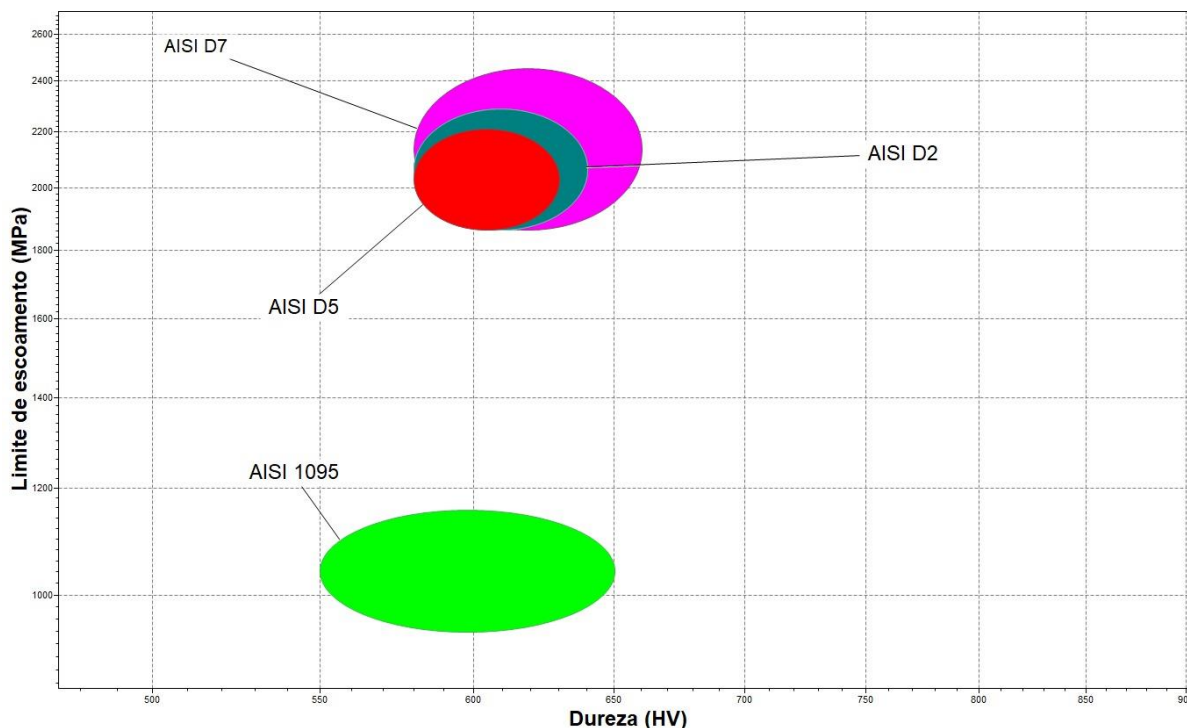
Portanto, como possíveis candidatos à seleção do melhor aço para aplicação em rolamentos (na condição de emprego descrita para exaustores industriais) ficaram o aço carbono AISI 1095 temperado e revenido a 205°C e os aços ferramenta para trabalho a frio da série D (D2, D3, D4, D5 e D7). Foi ainda adicionado o aço AISI 1340 no sentido de observar seu desempenho na comparação com os demais aços, uma vez que custo inferior e propriedades distintas.

4.1 – Propriedades dos aços

Os rolamentos são dispositivos que necessitam de alta resistência à fadiga, alta dureza e alto limite de escoamento devido estarem propensos à degradação estrutural

resultante de mecanismos de fadiga. Esses mecanismos produzem falhas nos rolamentos oriundos de uma complexa interação de efeitos de tensões. Necessitando

Figura 18 - Limite de escoamento x dureza HV dos aços 1095, D2, D3, D4, D5 e D7 – GRANTA Edupack



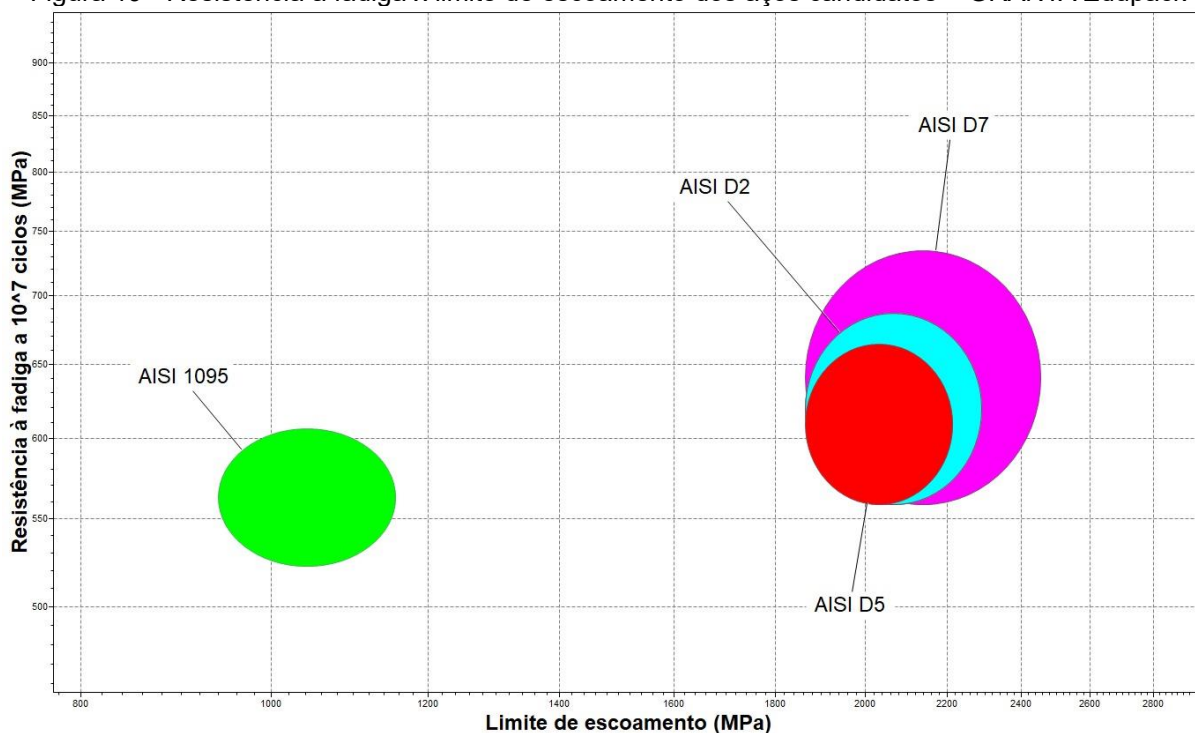
assim, de propriedades mecânicas dos aços que favoreçam o bom funcionamento do dispositivo em condições adversas, como desalinhamento do sistema e ambientes severos. Com isso, diversos mapas de propriedades dos aços foram obtidos por meio do software GRANTA Edupack como mostrado nas figuras 18 a 20.

Fonte: Granta Edupack (2019)

Como pode ser observado no mapa acima, os aços ferramentas possuem limites de escoamentos superiores quando comparado com o aço 1095, mesmo que o intervalo de dureza seja relativamente próximo. Isso se deve à presença do alto teor de cromo e também de outros elementos de liga, como molibdênio, vanádio, manganês, os quais quando combinados com o carbono, geram os carbonetos de liga. A presença desse carboneto na microestrutura gera uma elevada resistência ao desgaste e baixa distorção na estrutura do material durante o tratamento térmico, elevando assim a capacidade do aço se deformar elasticamente e, portanto, apresentado elevado limite de escoamento (25).

Devido à necessidade de suportar a altas cargas e, conseqüentemente, possuir alta dureza, outra característica que o aço escolhido deve apresentar é alta resistência a fadiga. O rolamento deve suportar muitos ciclos ou horas de trabalho, e para análise dessa característica foi obtido o mapa a seguir (figura 19), onde se relacionam resistência a fadiga e limite de escoamento.

Figura 19 - Resistência a fadiga x limite de escoamento dos aços candidatos – GRANTA Edupack

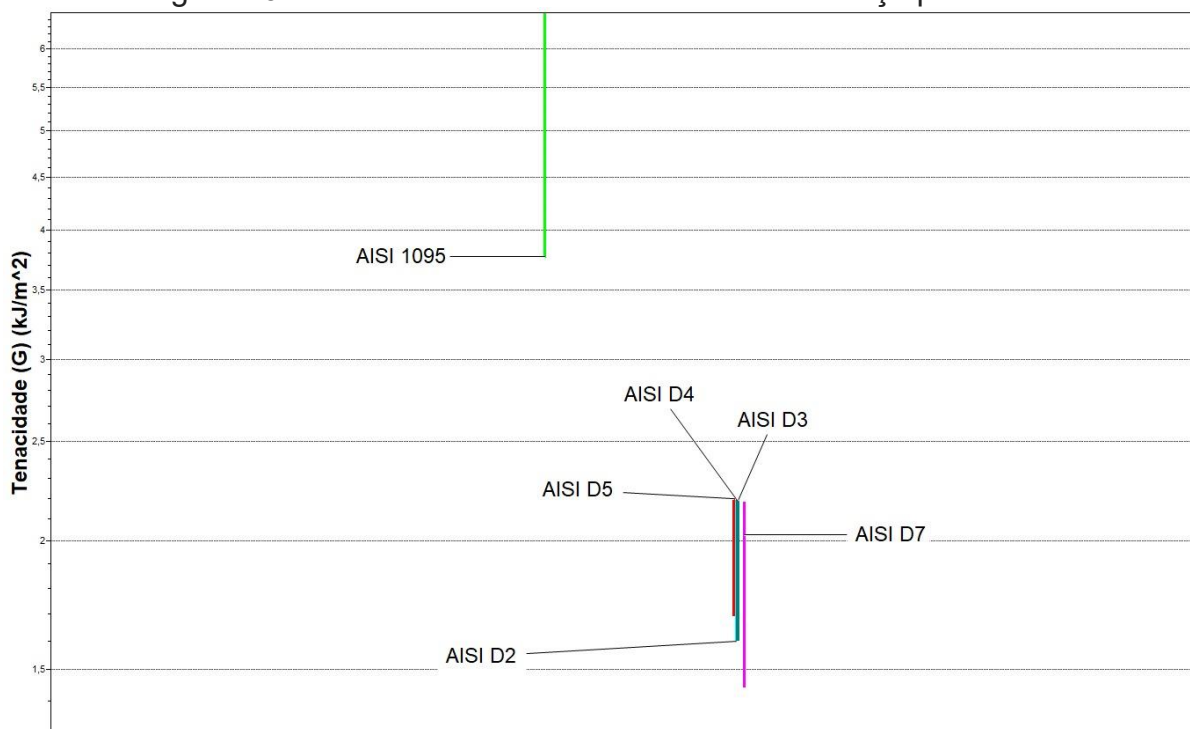


Fonte: Granta Edupack (2019)

Na figura 19, os aços ferramentas trabalhados a frio possuem resistência à fadiga superior quando comparados com o aço alto carbono AISI 1095 temperado e revenido. Como visto no mapa anterior, os aços ferramentas tendem a possuir maior resistência à fadiga conforme possuem maiores valores de limite de escoamento. Além disso, uma que eles possuem maior dureza superficial, suportam mais esforços cíclicos sobre a superfície. Um fator que pode ser levantado é o fato de os aços ferramentas possuírem elevado teor de cromo e, isso, faz com que ocorra maior fração de carbonetos presentes na matriz do aço, aumentando assim a resistência do material.

Os rolamentos, por serem dispositivos capazes de suportar altas cargas, que estão em ambientes vibratórios, tornam-se propensos à propagação de trincas e posteriormente a sofrerem fraturas. Com isso, uma propriedade que aborda essa

capacidade de resistir a essas condições é a tenacidade. Logo, os aços para rolamentos devem possuir uma boa tenacidade para que sua estrutura não seja afetada. A figura 20 mostra a tenacidade dos candidatos do aço para o rolamento.



Fonte: Granta Edupack (2019)

Os intervalos apresentados tem limites diferentes quando comparados entre si. Para o aço SAE 1095, o valor de intervalo varia entre 3,8 a 10,5 KJ/m² enquanto que os aços ferramentas variam entre 1,4 a 2,3 KJ/m². A tabela 3 abaixo mostra os valores da tenacidade de cada candidato.

Tabela 3 - Valores da tenacidade de cada aço candidato – Granta Edupack

Aço candidato	Tenacidade (KJ/m ²)
AISI 1095	3,76 – 10,8
AISI D2	1,6 – 2,19
AISI D3	1,6 – 2,19
AISI D4	1,6 – 2,19
AISI D5	1,69 – 2,2
AISI D7	1,44 – 2,18

Fonte: Granta Edupack (2019)

Como abordado anteriormente, os aços ferramentas possuem mais elementos de liga do que o aço AISI 1095, em que conforme temos maiores teores de elementos

de liga, maior é a dureza do aço. Os aços ferramentas da classe D são os aços trabalhados a frio possuem maiores teores de carbonetos distribuídos em sua estrutura, aumentando assim a resistência ao desgaste e a dureza e, conseqüentemente, menores serão os valores da tenacidade, já que essa é uma propriedade em que está relacionada na absorção de energia durante uma deformação plástica (26). Porém, o seu aumento ocorre após tratamento térmico aplicado para tal finalidade.

Determinados rolamentos operam em ambientes extremas, com ambientes corrosivos, necessitando assim uma boa resistência a corrosão. Logo, a tabela 4 apresenta as características qualitativas dos aços candidatos a aplicação em rolamentos. Essa característica qualitativa é apresentada pelo Granta Edupack em 4 escalas: excelente, aceitável, uso limitado e inaceitável. Na escala excelente, o material não apresenta nenhuma (ou pouca) deterioração. Na escala aceitável, o material possui determinada resistência, mas corrosão ao longo do tempo. Na escala uso limitado, o material não é aplicável ao ambiente corrosivo para longos períodos. E na escala inaceitável, o material não deve ser aplicado ao ambiente corrosivo. Na tabela 4, os aços foram comparados em diferentes meios corrosivos, e se são aplicáveis ou não para determinado meio.

Tabela 4 - Características dos aços candidatos em diferentes ambientes corrosivos – Granta Edupack

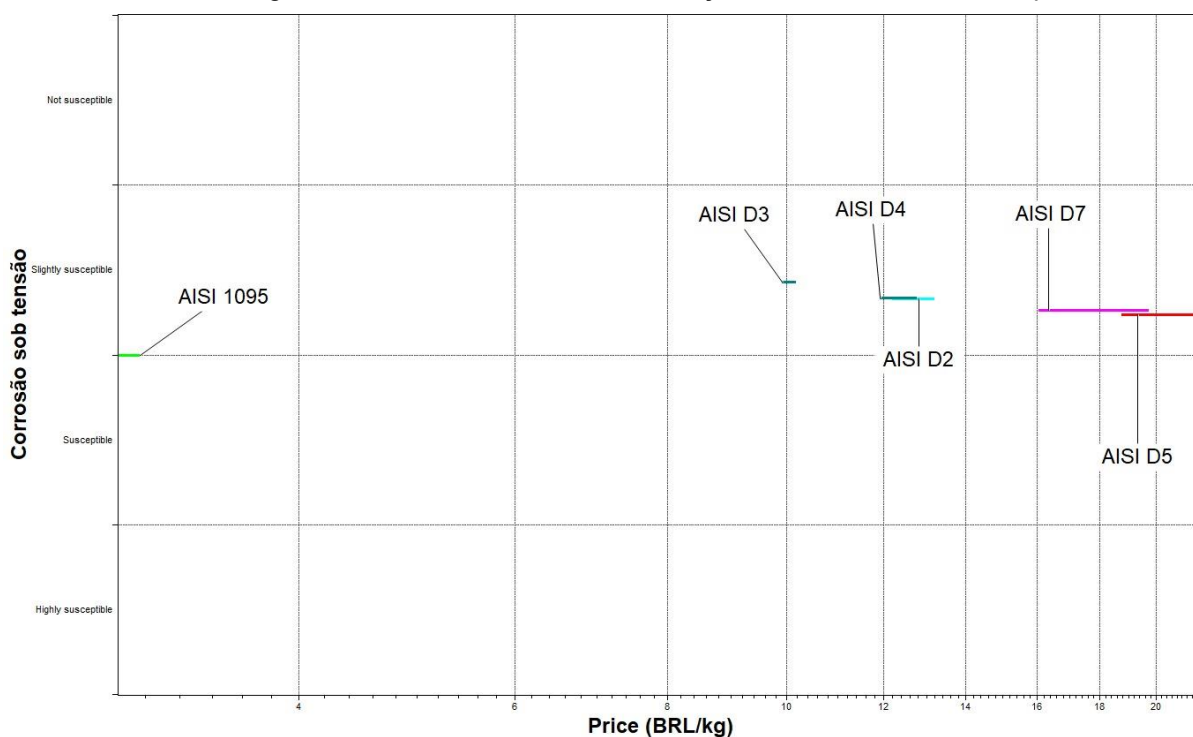
Meios corrosivos				
Aço	Água fresca	Água salgada	Ácido forte	Solventes orgânicos
AISI 1095	Aceitável	Uso limitado	Inviável	Excelente
AISI D2	Aceitável	Uso limitado	Inviável	Excelente
AISI D3	Aceitável	Uso limitado	Inviável	Excelente
AISI D4	Aceitável	Uso limitado	Inviável	Excelente
AISI D5	Aceitável	Uso limitado	Inviável	Excelente
AISI D7	Aceitável	Uso limitado	Inviável	Excelente

Fonte: Granta Edupack (2019)

A tabela 4 com as características dos aços apresenta que todos os candidatos possuem as mesmas qualidades e, portanto, não possuem vantagem e nem desvantagem entre eles. Os aços, com exceção dos aços inoxidáveis, apresentam, de modo geral, baixa resistência à corrosão em ambientes em que ele possa reagir

com o meio. Por exemplo, em ambientes úmidos ou ácidos, o aço reage sofrendo o processo de oxidação, onde o oxigênio do meio reage com a superfície do aço, gerando assim uma camada de óxido. Com isso, ao longo do tempo, ocorre a corrosão do material, com a formação de manchas e mudanças de cores sobre a superfície do aço (34). Na figura 21 é apresentada a relação entre resistência do aço a corrosão sob tensão. Devido à propagação de trincas serem causadas por meio de uma combinação entre cargas cíclicas e ambientes corrosivos, sabe-se que os aços sofrem alguma reação quando expostos ao ambiente agressivo. A classificação da corrosão sob tensão é qualitativa e apresentada como muito suscetível, suscetível, pouco suscetível e não suscetível.

Figura 21 - Corrosão sob tensão dos aços candidato – Granta Edupack



Fonte: Granta Edupack (2019)

Conforme mostrado na figura 21 todos os aços apresentam a característica de pouco suscetível quando colocados em ambientes corrosivos. Além disso, o aço AISI 1095 (cor verde claro) está mais próximo da escala suscetível do que os aços ferramentas, demonstrando assim que o aço AISI 1095 é mais propenso a sofrer danos corrosivos do que os aços ferramentas da série D.

5. Discussão dos resultados

Após a obtenção das informações e propriedades por meio do software GRANTA Edupack, os dados foram tratados e comparados para a determinação da melhor escolha por meio de uma classificação entre as diversas alternativas, tanto de aços como de graxas.

Existem diversos métodos multicritérios que auxiliam nas tomadas de decisões, e o método escolhido foi o TOPSIS. Esse método é baseado na técnica de avaliação multicritérios e que neste caso será baseado nas propriedades dos materiais, cujos resultados são classificados como resultado ideal e resultado não-ideal. Logo, essa técnica foi aplicada tanto para os aços quanto para as graxas.

A tabela 5 contém as médias das propriedades dos aços candidatos, visto que algumas propriedades apresentadas pelo software GRANTA Edupack são dados em intervalos de valores. Para se ter uma comparação mais precisa, a condição de melhor desempenho (propriedade máxima) foi levada em consideração para os aços examinados.

Tabela 5 - Propriedades e seus valores máximos dos aços candidatos obtidos pelo GRANTA Edupack

Propriedades dos Aços						
Aços	Limite de escoamento (Mpa)	Dureza (HV)	Tenacidade (KJ/m ²)	Resistência a fadiga (Mpa)	Custo por quilograma (R\$/Kg)	Temperatura máxima de trabalho (°C)
AISI 1095	1050	600	7,28	564,5	2,91	180
AISI D2	2075	610	1,9	623	12,7	220
AISI D3	2075	610	1,9	623	10,06	220
AISI D4	2075	610	1,9	623	12,35	220
AISI D5	2035	605	1,94	611,5	20,35	220
AISI D7	2155	620	1,81	647	17,9	165
AISI 1340	1595	555	1,95	647	2,99	180

Fonte: Autoria Própria (2024)

5.1 Cenário referencial para a escolha do melhor aço

O cenário referencial foi determinado por uma distribuição de pesos de maneira mais igualitária entre as propriedades de dureza, limite de escoamento,

resistência a fadiga. Seguindo os múltiplos critérios para a melhor escolha dos aços, foi realizada uma ponderação para as características apresentadas. A ponderação foi realizada numa escala de 0 a 3, onde uma ponderação 0 representa a pior possível e uma pontuação 3 representa a melhor possível, cuja soma da ponderação é 10.

Tabela 6 - Pesos atribuídos as características dos aços para os cálculos TOPSIS conforme cenário referencial 1

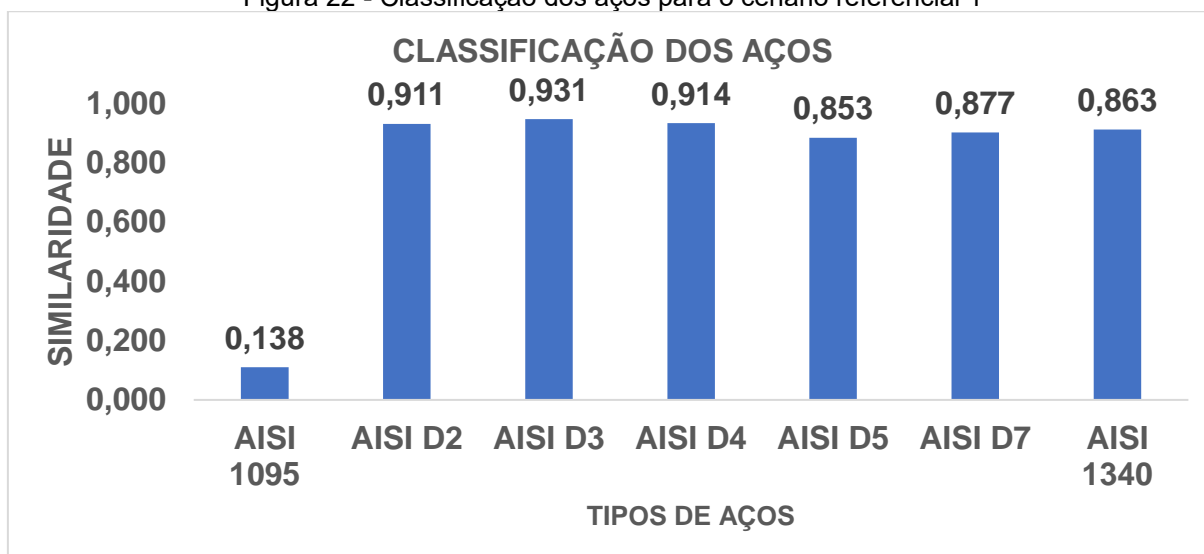
	Limite de escoamento (Mpa)	Dureza (HV)	Tenacidade (KJ/m ²)	Resistência a fadiga (Mpa)	Custo (R\$/Kg)	Temperatura máxima de trabalho (°C)
Ponderação	2,25	2,25	2,25	2,25	0,5	0,5

Fonte: Autoria Própria (2024)

A tabela 6 mostra os pesos que foram atribuídos a cada propriedade. O critério referencial foi baseado no desempenho do rolamento quando aplicado ao sistema de exaustão. Como é necessário um rolamento com bom limite de escoamento, alta dureza e boa resistência a fadiga, essas propriedades foram as que receberam maiores pesos, ou seja, possuem uma análise de maior importância, enquanto que custo e temperatura de trabalho receberam menores pesos, logo tem uma análise de menor importância.

A classificação dos aços foi realizada a partir dos valores que constituem a tabela 6 e, posteriormente, foram realizados os cálculos e o gráfico da Figura 22 onde foi possível classificar os aços candidatos a aplicação em rolamentos.

Figura 22 - Classificação dos aços para o cenário referencial 1



Fonte: Aatoria Própria (2024)

Após a obtenção do gráfico acima, os aços foram classificados e a seguinte tabela foi elaborada.

Tabela 7 - Classificação dos aços candidatos – Cenário referencial 1

Aço	Classificação
AISI D3	1º
AISI D4	2º
AISI D2	3º
AISI D7	4º
AISI 1340	5º
AISI D5	6º
AISI 1095	7º

Fonte: Aatoria Própria (2024)

Observando a tabela 7, o aço ferramenta AISI D3 ficou em primeiro lugar na classificação para aplicação em rolamentos. Apesar de possuir propriedades mecânicas muito próximas dos aços ferramentas D4 e D2, o custo por quilograma é relativamente mais baixo quando comparado com esses dois aços, devido ao aço D3 possuir menores teores, em porcentagem, de elementos de liga (36). Por se tratar de uma aplicação para produção em larga escala de rolamentos, o custo é um critério que deve ser maximizado para a escolha da melhor alternativa.

5.2 Cenário para dureza e tenacidade como propriedades prioritárias para a escolha do aço

No segundo cenário, o cenário prioritário foi determinado por uma distribuição de pesos de maneira heterogênea, no qual, as propriedades de dureza e tenacidade foram consideradas de maior prioridade, recebendo assim maiores valores dos pesos, uma vez que são as propriedades mais importantes relacionadas ao desgaste

superficial. Assim como no cenário anterior, foi realizado uma ponderação para as características apresentadas. A ponderação foi realizada numa escala de 0 a 3, onde uma ponderação 0 representa a pior possível e uma pontuação 3 representa a melhor possível, cuja soma da ponderação é 10.

Tabela 8 - Ponderação das propriedades para o cenário prioritário 2

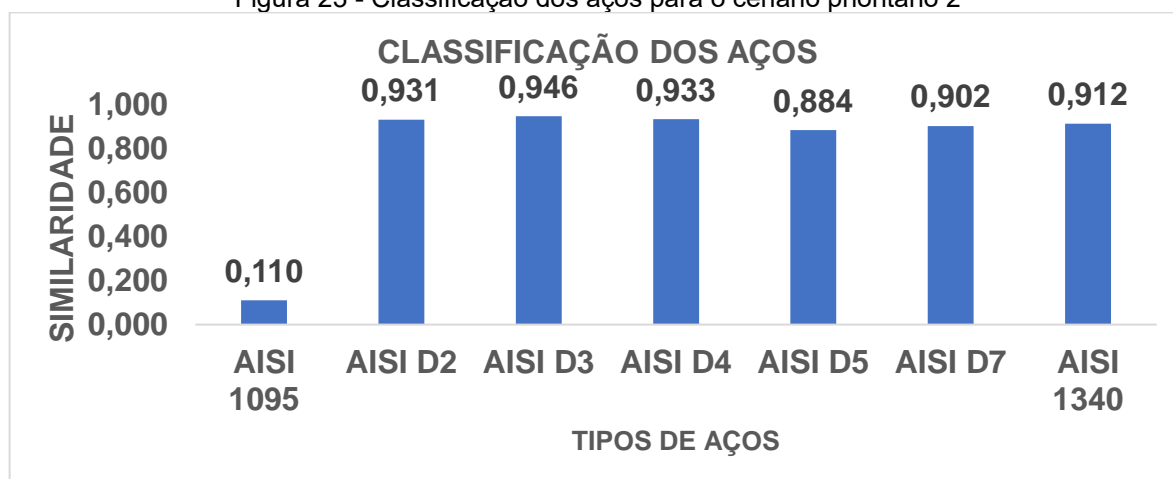
	Limite de escoamento (Mpa)	Dureza (HV)	Tenacidade (KJ/m ²)	Resistência a fadiga (Mpa)	Custo (R\$/Kg)	Temperatura máxima de trabalho (°C)
Ponderação	1,5	3	3	1,5	0,5	0,5

Fonte: Autoria Própria (2024)

Como apresentado anteriormente na situação problema, o rolamento deve suportar altas cargas para que não ocorra o empenamento e nem desgaste superficial, porém ele também deve apresentar uma capacidade de absorção de energia para não ocorrência de propagação de trincas e, posteriormente, sua fratura. No caso do desgaste, uma matriz mais tenaz garante maior aderência dos carbonetos, os quais permanecerão acoplados por mais tempo, aumentando a resistência ao desgaste. Logo, as propriedades dureza e tenacidade receberam os maiores pesos da ponderação, sendo assim considerados os critérios mais importantes em relação às outras propriedades.

A classificação dos aços para o segundo cenário foi realizada a partir dos valores que constituem a tabela 8 e, em seguida, foram realizados os cálculos e o gráfico da Figura 23 com a classificação dos aços candidatos.

Figura 23 - Classificação dos aços para o cenário prioritário 2



Fonte: Autoria Própria (2024)

Após a obtenção do gráfico acima, os aços foram classificados e a seguinte tabela foi elaborada.

Tabela 9 - Classificação dos aços candidatos – Cenário prioritário 2

Aço	Classificação
AISI D3	1º
AISI D4	2º
AISI D2	3º
AISI 1340	4º
AISI D7	5º
AISI D5	6º
AISI 1095	7º

Fonte: Autoria Própria (2024)

Observando a tabela 9, assim como no cenário referencial 1, o aço ferramenta AISI D3 ficou em primeiro lugar na classificação, porém o aço AISI 1340 foi para 4º e o aço D7 foi para 5º. Isso se deve ao fato de que o aço AISI 1340 possui relativa maior tenacidade e menor custo por quilograma.

5.3 Cenário para a escolha da graxa

Para a escolha dos lubrificantes, é necessário observar que a lubrificação possui como principal função o controle do atrito entre os componentes, reduzir o desgaste, controlar a temperatura a altas rotações e amortecer choques. Logo, para uma aplicação ideal da graxa é necessário que seja levado em consideração a temperatura de rotação do rolamento em decorrência do atrito, nível de desgaste das peças em movimento, corrosão superficial do rolamento devido ao ambiente hostil e a carga aplicada à qual o rolamento é submetido (27).

Como critério para determinação da melhor escolha da graxa, foi analisada a composição da graxa, consistência, viscosidade do óleo-base, faixa de temperatura

de operação e estabilidade mecânica. O espessante em graxas atua como uma esponja liberando óleo lubrificantes e aditivos. Já os sabões determinam muitas características das graxas, como temperatura limite, viscosidade aparente, estabilidade mecânica e resistência a lavagem por água. As graxas que foram analisadas neste caso são a base de lítio e cálcio. A seguir segue a tabela 10 com os valores das propriedades analisadas.

Tabela 10 - Propriedades dos lubrificantes candidatos

Lubrificante	Espessante	Consistência NLGI	Viscosidade (40°C)	HTPL – limite de desempenho sob alta Temp.	Estabilidade mecânica 50 h a 80°C
LGMT 2	Lítio	2	110	120	50
LGMT 3	Lítio	3	125	120	295
LGEP 2	Lítio	2	200	110	50
LGWA 2	Lítio	2	185	140	50
LGGB 2	Lítio – Cálcio	2	110	90	70

Fonte: SKF Lubrificantes (28).

Assim como realizado para os aços, foi feita uma ponderação para cada propriedade dos lubrificantes. A ponderação foi realizada numa escala de 0 a 3, onde uma ponderação 0 representa a pior possível e a ponderação 3 representa a melhor possível, cuja soma da ponderação é 10. A tabela 11 mostra cada ponderação aplicada.

Tabela 11 - Ponderação das propriedades do lubrificante para os candidatos pré-selecionados

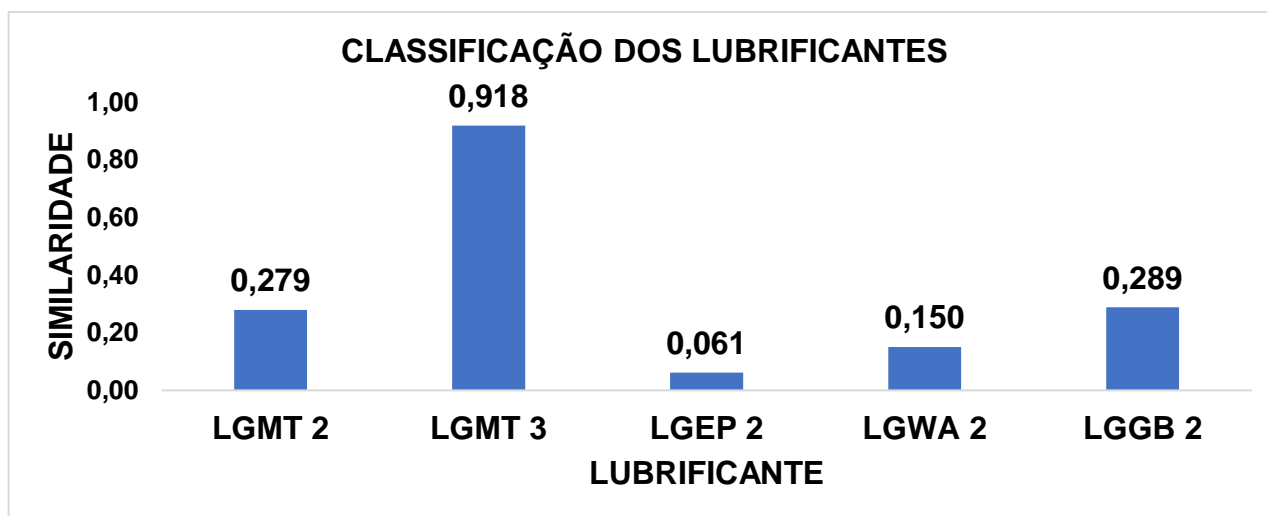
	Consistência NLGI	Viscosidade (40°C)	HTPL – limite de desempenho sob alta Temp.	Estabilidade mecânica 50 h a 80°C
Ponderação	3	3	2	2

Fonte: Autoria Própria (2024)

Com a ponderação das propriedades do lubrificante, foi submetido à classificação pelo método TOPSIS e, posteriormente, feita a escolha da melhor alternativa para a aplicação no rolamento.

A classificação dos lubrificantes foi realizada a partir dos valores que constituem a tabela 10 e, posteriormente, foi realizado os cálculos e o gráfico da Figura 24, onde foi possível escolher a melhor alternativa para a lubrificação.

Figura 24 - Classificação dos lubrificantes para rolamentos de acordo com metodologia TOPSIS



Fonte: Autoria Própria (2024)

A tabela 12 representa a classificação de cada lubrificante apresentado no gráfico acima.

Tabela 12 - Classificação dos lubrificantes candidatos – método TOPSIS

Lubrificante	Classificação
LGMT 3	1º
LGGB 2	2º
LGMT 2	3º
LGWA 2	4º
LGEP 2	5º

Fonte: Autoria Própria (2024)

Conforme apresentado na tabela 12, o lubrificante LGMT 3 ficou em primeiro lugar na aplicação em rolamentos. O diferencial desse lubrificante dos outros se deve a sua alta estabilidade mecânica quando comparado com os outros. O lubrificante SKF LGMT 3 é uma graxa espessa de sabão de lítio, no qual, apresenta excelentes propriedades que inibem a corrosão e possui alta estabilidade à oxidação dentro da faixa de temperatura de operação recomendada.

6. Conclusões

A partir do estudo e das classificações dos aços e lubrificantes, via EduPack e TOPSIS, foi encontrado que o melhor aço para os dois cenários (referencial e prioritário) foi o aço AISI D3 revenido, obtendo assim uma boa dureza e boa tenacidade [15]. Este é um aço ferramenta com alta dureza e boa resistência ao desgaste. Devido a sua grande dureza e resistência mecânica, uma possibilidade seria aplica-lo na produção de rolamentos, o que necessita de estudos futuros referente a sua processabilidade por laminação e tratamentos térmicos. Diferentemente do aço SAE 52100 (C: 1.1% / Cr: 1.5% / Mn: 0.45% / Si: 0.3%, o aço AISI D3 possui elevado teor de elementos de liga (C: 2,00% / Mn: 0,30% / Si: 0,25% / Cr: 11,50%), sendo que os altos teores de carbono e de cromo fazem com que ocorra a uma grande presença de carbonetos em sua microestrutura, elevando assim o seu potencial para aplicações que requerem alta resistência ao desgaste, e alta dureza. Por outro lado, como observado nos resultados, o custo para se produzir com o aço AISI D3 é mais elevado do que aquele associado aos aços com alto teor de carbono. Seria interessante buscar novos meios de produção que reduzissem o custo de processamento para que você viável a produção de rolamentos em larga escala.

Assim como para os aços para os rolamentos, os lubrificantes são determinantes para o bom funcionamento dos rolamentos. Uma escolha equivocada de lubrificante pode acarretar em dano precoce na estrutura do dispositivo rolante, levando – o ao seu empenamento. Com isso, a graxa LGMT 3, da marca SKF, se torna uma alternativa substituta do lubrificante Mobilith SHC 100, devido à graxa LGMT 3 possuir ótimas propriedades reológicas e mecânicas para aplicações em sistemas rolantes, possui excelente estabilidade de rodagem e elevada resistência à corrosão.

Referências

¹MACINTYRE, A. J. **Equipamentos industriais e de processo**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

² Ventiladores e Exaustores: guia básico. Eletrobrás. Brasília:IEL:NC, 2008

³ PROCEL; ELETROBRÁS. VENTILADORES E EXAUSTORES - GUIA BÁSICO. [s.l.: s.n.].

⁴Santos, V. A. **Manual prático da manutenção industrial**. São Paulo: Ícone, 2007.

⁵SKF. **Rolamentos de esferas**. 2015. Disponível em: <https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d19680416a2b/pdf_preview_medium/0901d19680416a2b_pdf_preview_medium.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2024.

⁶CATÁLOGO NSK. 2013. Disponível em: < <https://www.nsk.com.br/catalogo-geral.htm>>. Acesso em: 14 abr. 2024.

⁷Carreiro, R. P.; Belmiro, P. N. A. **Lubrificantes e Lubrificação Industrial**, São Paulo, 2006.

⁸SKF GROUP HEADQUARTERS. **Produtos SKF para manutenção e lubrificação**. 2024. Disponível em: < <https://www.skf.com/br/products/maintenance-products> >. Acesso em: 20 ago. 2024.

⁹MARTINS, C. O. D. et al. Comparação entre Técnicas de Análise de Tensões Residuais em Anéis de Rolamento do Aço ABNT 52100. **Revista Matéria**, v. 09, n. 1, p. 20 – 28, 2004.

¹⁰BESWICK, J. Effect of prior cold work on the martensite transformation in SAE 52100. **Metallurgical Transactions A**, v. 15, p. 299-306, 1984.

¹¹GEMBALOVA, P. et al. Hot forming parameters research of bearing steel. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 7, n. 2, p. 21-28, 2007.

¹²CAPPEL, J.; WEINBERG, M.; FLENDER, R. The metallurgy of roller-bearing steels. **Steel Grips**, v. 2, n. 4, 2004.

¹³COLPAERT, Hubertus et al. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Editora Blucher, 2008.

¹⁴LEITÃO, C. J.; MEI, P. R.; LIBARDI, R. Efeitos da cementação e da nitretação no custo e na qualidade de engrenagens produzidas com aços ABNT 4140 e 8620. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 9, n. 3, p. 257-263, 2013.

¹⁵SILVA, A. LUIZ V. DA C. E; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 2ª ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2006.

¹⁶PULI, R.; RAM, G. D J.i. Microstructures and properties of friction surfaced coatings in AISI 440C martensitic stainless steel. **Surface and coatings Technology**, v. 207, p. 310-318, 2012.

¹⁷CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. 8ª ed. Rio de Janeiro: KTC, 2013.

¹⁸SILVA, P. R. T. **Análise do comportamento em fadiga do aço 51200 sob condições microestruturais**. 2001. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

¹⁹PARISE, K. **Estudo do comportamento tribológico de líquidos iônicos como fluidos lubrificantes em processos de estampagem**. 2015. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Metalúrgia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

²⁰BHADESHIA, H. **Bainite in Steels**. The Institute of Metals Communications, 2001.

²¹AISI. SAE: GERDAU AÇOS ESPECIAIS. São Paulo, 2022.

²²GARCIA, N. G. **Estudo da cementação sólida em engrenagens cilíndricas de dentes retos de AÇO SAE 4320**. 2017. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Fabricação Mecânica) - Instituto Federal de Santa Catarina, Jaraguá do Sul, 2017.

²³HWANG, C. L.; YOON, K. **Multiple attribute decision making: methods and applications**. Berlin: Springer-Verlag, 1981.

²⁴ASHBY, Michael. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. Elsevier Brasil, 2013.

²⁵KRAUSS, G. **Steels: Processing, Structure, and Performance**. 2ª ed., ASM, 2015.

²⁶DIETER, G.E. **Metalurgia mecânica**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

²⁷CAVALCANTI, E. J. C., MORA, N. D., SERRA, T. Z., **Estudo do desempenho do óleo lubrificante em pontos diferentes da turbina**. 2007. Disponível em: <<http://foz.unioeste.br/~lamat/publicoleolub/oleolubc3n2007.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2024

²⁸SKF CATÁLOGO: Lubrificantes. *In*: PRODUTOS SKF para Manutenção e Lubrificação, 2019.

²⁹PRODUTOS SKF. *In*: PRODUTOS SKF: 22216 EK/C3 Rolamento autocompensador de rolos com furo cônico e recursos de relubrificação, 2020.

³⁰MOBIL: Mobilith SHC Série. *In*: MOBILITH SHC 100, 2016.

³¹International Standard 15243. **Rolling bearings — Damage and failures — Terms, characteristics and causes**. Suíça, 2017.

³²SKF. Análise de falha de rolamentos. CBA, 2023. 14 p.

³³COZZA, R. C. **Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo**. 2006. 217 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

³⁴GENTIL, V. **Corrosão**. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC. 341p. 2003.

³⁵GERDAU. **Catálogo - Aços especiais para construção mecânica**. 2019.

³⁶SUPPORT for materials education. Ansys, c2022. Disponível em:.. Acesso em: 02 de ago. de 2024.

³⁷FURTADO, AE et al. **AÇOS HIPEREUTETÓIDES PARA FABRICAÇÃO DE ROLAMENTOS AUTOMOTIVOS: ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DO AÇO SAE 52100** . Disponível em: <<https://pdf.blucher.com.br/engineeringproceedings/simea2018/PAP28.pdf>>.

³⁸GOMES, Luiz Flávio Austran Monteiro; GOMES, Carlos Francisco Simões. Tomada de decisão gerencial: 4ª edição 2012