



Federação das Indústrias do Estado da Bahia

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS E MECÂNICA

**ANÁLISE SISTEMÁTICA DA TROCA DO MATERIAL DE UMA BUCHA DE
MANCAL DA BOMBA DE RECIRCULAÇÃO DE GAA (GLOBAL
ACRYLIC ACID)**

**FILIFE BRASILEIRO DA FONSECA
IGOR DOS SANTOS REIS
RODRIGO CASTRO DOWNS**

**FILIFE BRASILEIRO
IGOR DOS SANTOS REIS
RODRIGO CASTRO DOWNS**

**ANÁLISE SISTEMÁTICA DA TROCA DO MATERIAL DE UMA BUCHA DE
MANCAL DA BOMBA DE RECIRCULAÇÃO DE GAA (GLOBAL
ACRYLIC ACID)**

**Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia
Mecânica e Materiais, como pré-requisito para
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
do Senai CIMATEC.**

Orientador: Prof. Paulo Rêgo

Salvador

2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaríamos de agradecer a Deus, pois tudo foi possível através dele. Em seguida a nossos pais e parentes: Por todo apoio e por sempre nos amarem e serem nossos exemplos, ensinando-nos o quão importante é seguir na vida com o coração cheio de amor, determinação e bravura.

O ponto chave da nossa formação profissional e acadêmica se deve ao Senai CIMATEC, dessa forma gostaríamos de agradecer a todos colegas e professores que tivemos o prazer de conhecer ao longo desses anos, em especial ao Prof. Lucas Nao e aos nossos coordenadores Prof. Danilo Hansen e Prof. Guilherme Souza.

Por fim, um profundo agradecimento ao nosso saudoso orientador Prof. Paulo Rêgo, por toda paciência, amizade, ensinamentos e atenção.

“...Tu deviens responsable pour toujours de ce que tu as apprivoisé.” - Le Petit Prince

RESUMO

O presente trabalho propõe apresentar uma análise sistemática acerca da substituição do material de confecção da bucha de mancal de uma bomba de recirculação de ácido acrílico em uma empresa de polímero superabsorvente.

Iniciando-se com o processo de análise prévia da falha, seguindo para definição das suas possíveis causas e assim realizando a análise da substituição do material de um componente da bomba onde ocorreu a falha. O trabalho apresenta a resultante de ações realizadas, a partir de dados analisados, para garantia da confiabilidade de funcionamento de uma bomba de recirculação de ácido acrílico, através da Análise de Causa Raiz (ACR), da unidade industrial produtora de polímero superabsorvente. Para análise de dados, foi utilizada o diagrama de Ishikawa que serve de suporte para a ACR, sendo que para isso foram utilizados relatos técnicos sobre a falha, dados históricos da unidade industrial e de seus equipamentos. O método de índice de mérito desenvolvido pelo Prof. e Eng. Ashby, amplamente utilizado nos processos de seleção de materiais nas mais diversas aplicações. Os métodos de análise de causa raiz de Ishikawa e de seleção de materiais de Ashby junto aos seus princípios de aplicação são o cerne do trabalho, de forma a conduzirem todo o processo de análise até a apresentação das ações e de seus resultados. Ao final, os resultados apresentados foram positivos, uma vez que o material selecionado para a confecção da bucha de mancal apresentou boa performance no equipamento, que está até o presente momento sem falhas, contudo foi constatado pelas metodologias utilizadas que embora o PEEK atenda aos requisitos necessários para aplicação, o Policarbonato possui melhor custo/benefício tornando-se assim a melhor opção de material para confecção da bucha. Com isto, foi possível comprovar a eficácia dos métodos de análise funcional e de causa raiz, assim como o de seleção de materiais, corroborando com resultados positivos e satisfatórios para o cliente.

Palavras-chave: Bomba de recirculação, Análise de Causa Raiz, Policarbonato
Seleção de materiais, diagrama de Ishikawa, Ashby.

ABSTRACT

The present assignment proposes to present a systematic analysis about the replacement of the material of the bearing bushing of an acrylic acid recirculation pump in a superabsorbent polymer company. Starting with the process of prior analysis of the failure, following to define its likely causes and thus carrying out the analysis of the replacement of the pump material. The work presents the result of actions taken, based on analyzed data, to improve the reliability of an acrylic acid recirculation pump through the Root Cause Analysis (ACR) of the industrial unit producing superabsorbent polymer. For the analysis, the Ishikawa diagram was used, which supports the ACR, and technical reports about the failure, historical data of the industrial unit and its equipment were used. The merit index method developed by Professor and Engineer Ashby, being widely used in material selection processes in the most diverse applications. Ishikawa's root cause analysis and Ashby's material selection methods along with its application principles are at the heart of the work, in order to lead the entire analysis process up to the presentation of actions and their results. In the end, the results presented were positive, since the material selected for the construction of the bearing bushing performed well on the equipment, which is still flawless up to the present moment, however it was verified by the methodologies used that although PEEK meets the requirements needed for application the Polycarbonate has a better cost / benefit ratio making it the best material option for making the bushing. With this, it was possible to prove the effectiveness of the root cause analysis and material selection methods, corroborating with positive and satisfactory results for the client.

Keywords: Recirculation pump, Root Cause Analysis,
Material selection, Ishikawa diagram, Ashby, Polycarbonate, Bucha, Mancal

Salvador

2020

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1 - Exemplo de diagrama de Ishikawa	13
Figura 2 - Classificação dos principais tipos de bomba	16
Figura 3 - Representação de bomba centrífuga de acoplamento magnético do modelo SLM NV	17
Figura 4 - Classificação quanto à carga nos mancais	19
Figura 5 - Modelo de bucha de mancal.....	20
Figura 6 - Diagrama do índice de mérito desenvolvido por Ashby	22
Figura 7 - Especificações técnicas da bomba P6170	25
Figura 8 - Bomba de acoplamento magnético, como funciona	26
Figura 9 - Montagem da Bomba P6170.....	29
Figura 10 - Diagrama de Ishikawa	30
Figura 11 - Representação 2D da bomba P6170	32
Figura 12 - Desmontagem da Bomba P6170	32
Figura 13 - Componentes danificados Bomba P6170	33
Figura 14 - Princípios de causa e efeito	35
Figura 15 - Principal relação causal do ACR	37
Figura 16 - Causas de “Falha P6170”	39
Figura 17 - Princípio de operação do acoplamento magnético.	40
Figura 18 - Desenho de cotas bucha em PEEK.....	41
Figura 19 - Definição de viscosidade.....	43
Figura 20 - Tensões de cisalhamento.....	44
Figura 21 - Condição de lubrificação.....	45
Figura 22 - Esforços sobre o eixo de atuação do impelidor.....	46
Figura 23 - Equação da tensão de cisalhamento.....	47
Figura 24 - Mancal e elementos de força.....	47
Figura 25 - Equação para a força de cisalhamento.....	48
Figura 26 - Equação para torque sem carga no filme.....	48
Figura 27 - Mancais radiais excentricidades e intervalo h.....	49
Figura 28 - Equação de excentricidade.....	49

Figura 29 - Equação da espessura do filme.....	50
Figura 30 - Solicitações solução de Ocvirk.....	50
Figura 31 - Pressão no mancal solução de Ocvirk.....	51
Figura 32 - Bucha do mancal em PEEK.	53
Figura 33 - Desenho representativo de um componente semelhante à bucha de mancal.....	54
Figura 34 - Modelo do gráfico de materiais de Ashby	57
Figura 35 - Modelo do gráfico de materiais de Ashby com a reta traçada do índice de mérito	58
Figura 36 - Materiais elegíveis para a confecção da bucha de mancal, sugeridos pelo índice de mérito.....	59
Figura 37 - Materiais elegíveis para a confecção da bucha de mancal, sugeridos pelo índice de mérito 2.....	60
Figura 38 - Gráfico de ashby relacionando máxima temperatura de serviço com o módulo de Young dos materiais poliméricos	61
Figura 39 - Gráfico de ashby relacionando máxima temperatura de serviço com a dureza Vickers dos materiais poliméricos	62
Figura 40 - Gráfico de ashby relacionando custo dos materiais poliméricos com os respectivos módulos de Young.....	63
Tabela 1 - Resumo histórico de falhas (Anterior a quebra).	27

LISTA DE SÍMBOLOS

ACR: Análise de Causa Raiz

GAA: Global Acrylic Acid

PEEK: Polietereetercetona

A: Área

cd , cr: Folga radial e diametral

F: Força

f: Força de atrito

h: Espessura do filme de lubrificante

K ϵ : Parâmetro adimensional

L: Comprimento

n': Velocidade angular

On: Número de Ocvirk

P: Força ou carga

p: Pressão

r: Raio

R' Raio efetivo

T: Torque

U: velocidade linear

α :Expoente pressão-viscosidade

ϵ : Razão de excentricidade

η : viscosidade absoluta

1: Λ espessura específica de filme

μ : coeficiente de atrito

θ_{max} : Ângulo de pressão máxima

ρ : Densidade de massa

τ : Tensão de cisalhamento

u: Viscosidade cinemática

ω : Velocidade angular

g: Constante de gravidade

Salvador

2020

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. Análise da causa raiz (ACR)	12
2.1.1 Diagrama de Ishikawa	13
2.2. Método Apollo e o Reality Chart	14
2.3. Bombas industriais	15
2.3.1 Tipos de bombas	16
2.3.2 Bomba de acoplamento magnético	17
2.3.3 Mancais	18
2.4. GAA (Global Acrylic Acid)	20
2.5. Seleção de materiais	21
3. ANÁLISES E RESULTADOS	23
3.1. Bomba P6170	23
3.1.1 Histórico de falhas	25
3.2. Análise de falha	28
3.2.1 Análise por Ishikawa	28
3.2.2 Análise de causa raiz	33
3.2.3 Funcionamento do método reality charting	36
3.2.4 Definição do problema e principais relações causais	37
3.2.5 Reality Charting – Sete Passos para Solução de Problemas	38
3.2.6 Demais modos de falha	39
3.3. Análise funcional da bucha de mancal da bomba P6170	40
3.3.1 Comportamento e modelo.	40
3.3.2 Lubrificação	42
3.3.3 Solicitações na bucha	46
3.3.3.1. Lei de Petroff	47
3.3.3.2. Equação de Reynolds para mancais radiais.	48
3.4. Seleção de materiais para bucha de mancal	51
3.4.1 Bucha de PEEK	51
3.4.2 Aplicação do método de Ashby da seleção de materiais	53
3.4.2.1. Aplicando o índice de mérito no diagrama de materiais de Ashby	56
3.4.2.2. Aplicando as demais restrições nos gráficos de Ashby para polímeros	60
3.4.2.3 Informações sobre o PEEK utilizado	64
3.4.2.4 Informações sobre o Policarbonato (PC)	65
4. CONCLUSÃO	66
5. SUGESTÕES	67
6. REFERÊNCIAS	68
7. ANEXO I	71

INTRODUÇÃO

Atualmente na indústria, faz-se cada vez mais necessário que haja uma maior confiabilidade nos equipamentos produtivos, principalmente aqueles que são críticos no processo. Devido à crescente competitividade em todos setores é preciso que haja uma redução de custo associado à manutenção, e que os equipamentos apresentem alta performance.

O conceito definido como “operação bem-sucedida de um produto ou sistema, na ausência de falhas ou quebras” que pode também ser complementado pela explicação do matemático Leemis (apud FOGLIATO e RIBEIRO,2011,p.2) que afirma que “a confiabilidade de um item corresponde à sua probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas”, explanam a necessidade de exercitar um pensamento pautado na análise e evolução dos componentes que movem a construção e a transformação de um produto ou sistema. Nesse contexto torna-se oportuno a aplicação da análise de falhas e seleção de materiais através da qual é possível conhecer causas raízes, defeitos e utilizar os melhores materiais nos equipamentos, trabalhando-se assim para mitigar ao máximo as quebras e oferecer maior disponibilidade dos ativos (CYRINO, 2016).

No tocante a disponibilidade de equipamentos, a análise de falhas se apresenta como uma valiosa ferramenta, devido também aos resultados apresentados e a sua conexão com a seleção de materiais. Nesse sentido é notável a contribuição para a diminuição dos erros humanos, uma vez que, o uso de uma metodologia de análise causal, provém uma gama de causas que são utilizadas para um considerável “*brainstorming*” de soluções, que por sua vez é empregado para encontrar as melhores soluções (SOLOGIC, 2010).

Equipamentos rotativos com bastante aplicabilidade na indústria como bombas, motores e compressores desempenham papel fundamental à boa

Salvador

2020

disponibilidade da unidade produtiva. Dando destaque às bombas industriais e de forma específica as bombas dinâmicas, há uma grande importância e utilização destas, pois elas se apresentam com grande importância e utilização, quando parâmetros como alta vazão a processo contínuo são requeridos como prioridade.

Portanto, em uma unidade produtiva do nosso cliente, que apresenta uma bomba rotativa de recirculação de ácido acrílico localizada na etapa anterior ao reator principal, a criticidade dessa bomba no processo a torna ainda mais significativa, ou seja, os pontos principais de análise da falha, assim como a correta seleção de material para a substituição dos componentes cujo o não funcionamento pleno comprometem a performance deste ativo, é um dos pontos chave para um satisfatório funcionamento da unidade produtiva.

1.1 Objetivo geral

O objetivo desse trabalho é tratar da análise sistemática, acerca da substituição da bucha de mancal de uma bomba de recirculação de ácido acrílico, que opera em uma indústria de produção de polímero superabsorvente. A análise será feita através de ferramentas para avaliar a causa raiz da falha, ocorrente na bucha de mancal e o método de seleção de materiais para avaliar as melhores opções de materiais para a confecção de uma nova bucha de mancal.

A análise será realizada criteriosamente, devido à importância operacional desse equipamento na unidade produtiva em questão, de forma que o objetivo central do emprego da análise é auxiliar na mitigação de falhas crônicas nesse equipamento, que por sua vez impactam negativamente à unidade e o negócio. Não obstante, o trabalho também busca correlacionar o tipo de análise com os resultados de confiabilidade apresentados e assim evidenciar a eficácia do método através da experimentação, uma vez que analiticamente será previamente comprovado. Por fim, também será apresentada toda a sistemática de escolha do material para este de componente crítico por parte da companhia.

Salvador

2020

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica disposta neste capítulo tem como objetivo oferecer o aporte teórico utilizado no desenvolvimento deste trabalho. Neste capítulo será apresentado um aprofundamento acerca dos conteúdos brevemente tratados na introdução. A revisão terá inclusive, uma explanação do funcionamento do método utilizado na condução da análise de falha, que apresenta em seu entendimento, a chave para a condução de toda a análise sistemática de forma eficiente.

Também se apresenta, de uma forma sintetizada, o princípio de funcionamento e características do equipamento tratado (bomba de recirculação), e por fim, será compartilhado o modelo utilizado para a escolha do material, para confecção do componente comprometido da bomba.

2.1. Análise da causa raiz (ACR)

A análise de falha é comumente usada como uma excelente ferramenta de melhoria contínua referente a performance dos equipamentos de uma unidade produtiva. Desta forma Kececioglu (2002) concluiu que as falhas ocorrentes em um equipamento, quando não minimizadas de forma contínua e assim sendo eliminadas, acabam convergindo em falhas problemáticas e custosas.

Como parte do estudo sobre a falha, a análise da causa raiz é uma ferramenta primordial para detecção, e correção em rápida resposta na resolução dos problemas, impactando no equipamento em termos de performance. Desse modo, é de extrema importância o uso de um método de ACR eficiente que relaciona causas e efeitos com os ativos humanos, físicos e técnicos da organização minimizando a recorrência dos problemas (ECKERT, 2005).

2.1.1 Diagrama de Ishikawa

O diagrama de Ishikawa ou, como é conhecido, espinha de peixe, é utilizado para representar a relação entre o "efeito" e todas as possibilidades de "causa", que podem contribuir para esse efeito. Um efeito pode ter diversas causas em várias categorias, porém são divididas entre os 6M: Método, mão-de-obra, material, meio ambiente, medida e máquina.

A partir de uma definida lista de possíveis causas, as mais prováveis são identificadas e selecionadas para uma melhor análise, como demonstrado na figura abaixo:

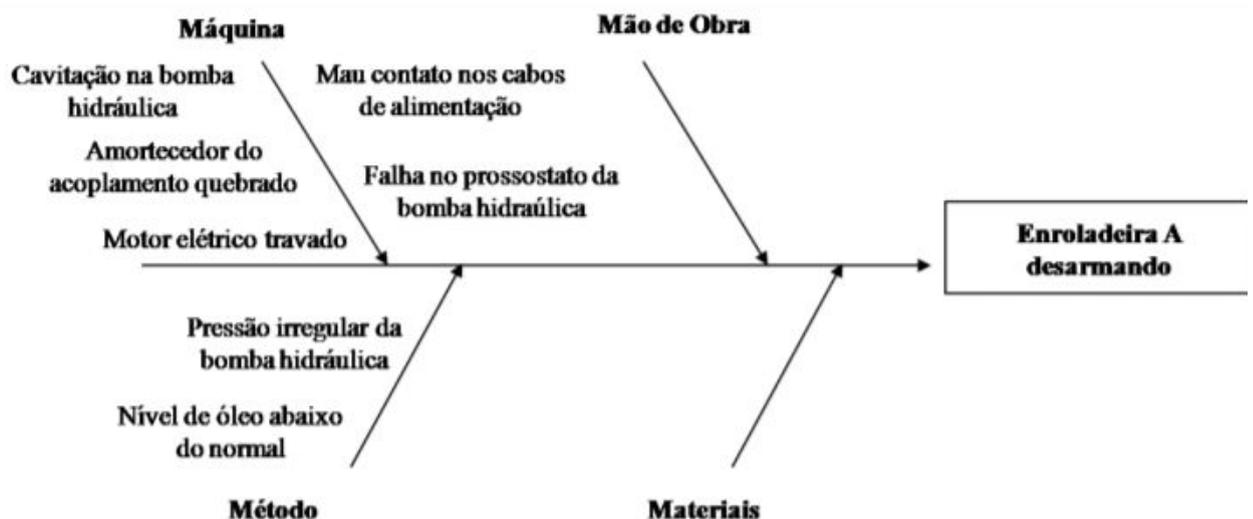


Figura 1: Exemplo de diagrama de Ishikawa

Fonte: Enegep 2016

No exemplo da imagem, que representa perfeitamente a situação da utilização desse método no ramo industrial, onde as categorias como: Máquina, Métodos, Mão de Obra e Materiais são as mais utilizadas. Apesar de apresentar uma boa definição do efeito ocorrido, o método torna difícil o entendimento das

relações causais que culminaram nesse evento, e assim prejudica a efetividade das soluções encontradas (GANO, 2011).

O primeiro passo na utilização deste método é a definição do problema, ou seja, o efeito identificado e que se deseja analisar ser específico, contribuindo assim para que a objetividade seja clara, e que a questão seja de fato possível de ser mensurada.

O desenvolvimento do segundo passo é identificar dentro das categorias as prováveis causas associadas ao efeito (problema), tornando a abordagem capaz de mapear os principais pontos e seu grupo de maior influência, possibilitando um melhor entendimento dos pontos levantados, podendo melhor exemplificar os grupos como descrito abaixo:

- Método: sequência de ações padronizadas que são utilizadas para executar o processo;
- Máquina ou equipamento: diversos problemas são derivados de erros ou falhas em maquinário. Dentro dessa categoria, as causas podem ir desde falta de manutenção até a utilização inadequada;
- Mão de obra ou pessoas: a falta de qualificação, a desmotivação e a imprudência de colaboradores ou fornecedores podem ser a causa de muitos problemas. A influência também pode vir da família, por exemplo;
- Materiais: pode ser a matéria-prima usada no processo ou qualquer outro material fundamental;

2.2. Método Apollo e o Reality Chart

O Apollo trata-se de um método de análise de causa raiz (ACR) para resolução efetiva de problemas baseado nas relações de causalidade (GANO,

Salvador

2020

2011). Criado por Dean L. Gano, o método foi fruto da experimentação de variadas abordagens de resolução de problemas, utilizadas pelo autor em diversas consultorias realizadas em companhias ao redor do mundo.

O Reality Charting, criado também por Dean L. Gano se deu como uma atualização do método Apollo, diferenciando-se apenas pela sua maior aplicabilidade, que se apresenta como uma melhor forma de resolução de problemas, de forma desafiadora, interativa e que promove um feedback instantâneo (GANO, 2011).

Esse foi o referencial de análise utilizado dentro da empresa para gestão do caso em questão. Por questões de informações confidenciais em relação à produção, processo e dados restritos referentes a bomba e a companhia, não tivemos permissão para divulgação e detalhamento neste estudo, contudo mostraremos o resultado final do reality chart, evidenciando a convergência do método específico da empresa, e o método o qual utilizamos para corroborar o resultado e embasar nossa avaliação sistemática, que foi o diagrama de Ishikawa.

2.3. Bombas industriais

As bombas industriais contribuem significativamente para o funcionamento de muitos processos dentro do âmbito de produção e serviços, tais equipamentos são, segundo Mattos e Falco (1998, p.105), definidos da seguinte forma: “[...] máquinas operatrizes hidráulicas que conferem energia ao líquido com a finalidade de transportá-lo de um ponto para outro, obedecendo às condições de processo”. E em seu princípio de funcionamento, Mattos e Falco (1998, p.105) que também pontuam que “[...] elas recebem energia de uma fonte motora qualquer e cedem parte dessa energia ao fluido sob a forma de pressão, energia cinética ou ambas [...]”.

2.3.1 Tipos de bombas

As bombas apresentam tipologias diferentes no que se refere a forma na qual a energia é transferida ao líquido (MATTOS e FALCO, 1998). É apresentado abaixo na Figura 2, seus tipos e categorias.

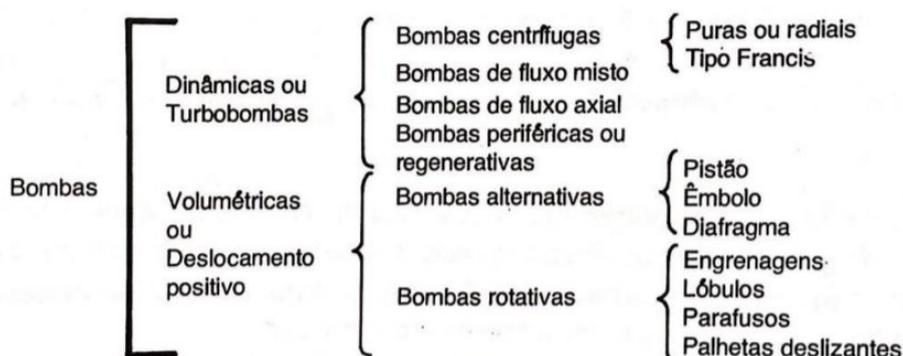


Figura 2. Classificação dos principais tipos de bomba.

Fonte: Mattos e Falco (1998).

As definições sobre as bombas dos tipos “dinâmica (Turbobombas) e volumétrica” são necessárias, uma vez que contribui na compreensão da classificação da bomba que faz parte do tema em estudo (Bombas centrífugas). Sendo a diferenciação entre esses dois tipos dada em relação a forma de transferência de energia efetuada pela bomba ao fluido.

Segundo Mattos e Falco (1998, p.106) as bombas dinâmicas “são máquinas nas quais a movimentação do líquido é produzida por forças que se desenvolvem na massa líquida, em consequência da rotação de uma roda (impelidor) [...]”. Esse tipo de bomba apresenta como subtipo as bombas centrífugas, que se caracterizam pela energia de velocidade e pressão a serem produzidas dinamicamente (KARASSIK et. al., 2001), ou seja, a energia promovida é exclusivamente cinética, sendo convertida em energia de pressão total ou parcialmente (MATTOS e FALCO, 1998). Nas bombas volumétricas, por sua vez, a energia já é disponibilizada na forma de

pressão, ou seja, não há necessidade de algum tipo de conversão. Desse modo, a movimentação do líquido ocorre com a interação das partes mecânicas da bomba (MATTOS e FALCO, 1998).

Realizando-se um breve comparativo entre ambas, pode-se inferir que as bombas centrífugas, comparadas com as volumétricas, apresentam maior flexibilidade com relação a mudança de vazão, nos serviços em que a pressão de saída não é alta e o fluido não é viscoso (RZR BOMBAS POSITIVAS, 2019).

2.3.2 Bomba de acoplamento magnético

As bombas de acoplamento magnético são definidas como bombas que utilizam um sistema de acoplamento magnético para ligar um propulsor, e o seu impelidor juntamente a um eixo contendo um ímã permanente.

Existindo um outro conjunto de ímãs, por sua vez unidos e conectados ao motor, a transmissão de movimento na bomba ocorre, graças à interação magnética entre dos dois conjuntos (MECÂNICA INDUSTRIAL, 2019).

Tendo como principal vantagem do seu uso no ramo industrial um maior nível de segurança com relação a vazamentos, principalmente quando são utilizados ácidos e substâncias perigosas (MECÂNICA INDUSTRIAL, 2019). Não obstante, esse tipo de bomba também preserva as características das bombas centrífugas.

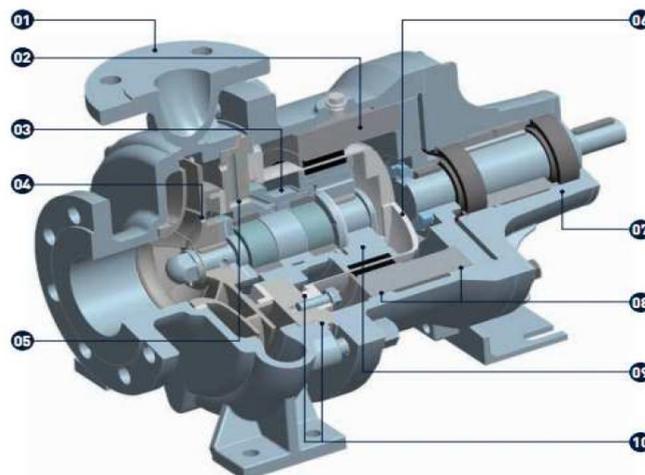


Figura 3. Representação de bomba centrífuga de acoplamento magnético do modelo SLM NV Salvador

2020

Fonte: Manual Klaus Union, SLM NV

Sendo os componentes apresentados:

1. Carcaça da bomba;
2. Saída do portador de imã: Zona de atrito com a lanterna intermediária
3. Rolamentos de mancal: Utilização sobre uma ampla faixa de temperatura e de anti-fricção;
4. Furos de balanceamento: Suporte de cargas axiais ao longo do eixo com faixa de operação via faixa hidráulica;
5. Sistema de descarga: Preferencialmente pressurizado no caso de lidar com líquidos perto de seu ponto de ebulição;
6. Escudo de contenção: Autoventilado e completamente drenável.
7. Suporte de rolamento: Lubrificação com óleo ou com graxa para toda vida útil;
8. Lanterna Intermediária: Zona de atrito com o portador de imã;
9. Interior do portador de imã: Com anel de atrito na bucha do anel de mancal;
10. Juntas estáticas: Apenas duas no escudo de contenção.

Outros aspectos também se mostram relevantes sobre as bombas de acoplamento magnético, sendo fáceis de montar e desmontar, facilitando a manutenção e inspeção do equipamento, além de conter boa resistência química à corrosão e um melhor desempenho que outros modelos de bombas convencionais.

2.3.3 Mancais

O termo mancal se caracteriza sempre que duas partes têm movimento relativo (Robert L. Norton, Projeto de Máquinas 4.ed, pág 633). Sendo este um componente fixo e fechado, normalmente apoiando um eixo, tendo a função de

Salvador

2020

suportar cargas, apoio aos componentes gerais de uma transmissão, tornando-se o responsável por guiar e restringir os graus de liberdade do componente nele acoplado.

Os mancais sofrem diferentes combinações de carga, onde o componente nele acoplado, que em sua grande maioria são os eixos, acabam tornando-se responsáveis pela ligação entre a parte móvel e a estrutura fixa de uma máquina rotativa e exercem grande importância para garantir o bom comportamento dos componentes e sistemas mecânicos. A classificação dos mancais referente às cargas sobre eles exercidas podem ser divididas nos grupos abaixo:

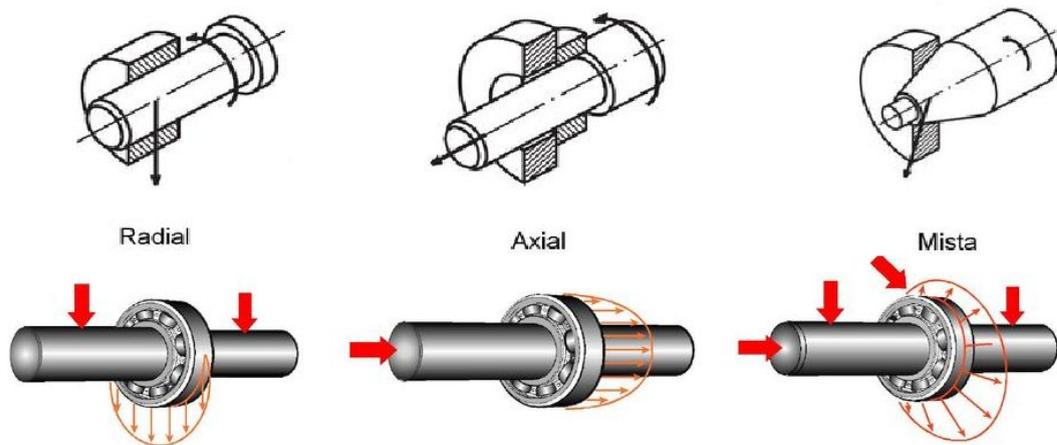


Figura 4. Classificação quanto à carga nos mancais
Fonte: FREITAS, M Rolamentos, Escola de engenharia São Carlos, 2004

- Radiais: suportam esforços radiais, impedindo o deslocamento no sentido transversal do eixo;
- Axiais: podem ser submetidos apenas a esforços axiais, impedindo o deslocamento no sentido longitudinal do eixo;
- Mistos: suportam tanto cargas axiais quanto radiais, impedindo o deslocamento do eixo em ambos os sentidos.

O aspecto construtivo dos mancais os separam em dois grandes grupos: o mancal de deslizamento e o de rolamento. O mancal de deslizamento possui uma bucha que separa a base do mancal e o eixo, enquanto os mancais do tipo

rolamento podem ser por esferas, agulhas ou rolos, onde ambas possuem a finalidade de auxiliar na geração de movimento, sendo este rotativo ou linear. Neste trabalho em específico estudaremos e trataremos do mancal de deslizamento.



Figura 5. Modelo de bucha de mancal
Fonte: THECNOLUB

Algumas das propriedades buscadas em um material de mancal são a suavidade relativa (para absorver partículas estranhas), resistência razoável, usinabilidade (para manter as tolerâncias), lubricidade, resistência a temperatura e corrosão e, em alguns casos porosidade (para absorver lubrificantes), e não obstante ser de material que tenha ao menos um terço da dureza do material que está se movendo em relação a ele a fim de prover cravabilidade de partículas abrasivas (Robert L. Norton, Projeto de Máquinas 4.ed, pág 633).

2.4. GAA (Global Acrylic Acid)

O ácido acrílico em condições normais de temperatura e pressão, é uma substância de aspecto incolor, altamente inflamável, corrosivo e volátil e que traz um odor que pode ser tido como irritante, sendo miscível a água e grande parte dos solventes orgânicos, segundo (Brockinton et al., 1986; Alba, 1999).

O principal meio para obtenção de composto como o ácido acrílico nas indústrias é através de um processo de oxidação parcial do propileno (C₃H₆). A

reação consiste na ocorrência de duas reações principais, iniciando com o propeno que é primeiramente oxidado para a produção de acroleína e água e, em seguida, a acroleína é oxidada para formar o ácido acrílico (GHILARDUCCI, David P.; TJEERDEMA, Ronald S., 1995).

Ácido acrílico possui ponto de ebulição de 139°C e na unidade de purificação, não pode estar a uma temperatura que exceda 90 °C, pois ocorre dimerização e perda da qualidade do produto requerido.

2.5. Seleção de materiais

A determinação dos materiais que serão utilizados em um projeto específico está associada ao processo em que este será aplicado e a natureza do material. As especificidades dos materiais são aspectos estritamente relacionados à suas propriedades, impacto ambiental, processamento, tempo útil de utilização e a relação custo benefício.

De forma geral, o processo pelo qual o produto será fabricado é determinado pela seleção de materiais, ou pelo menos, de alguma forma limita o número de processos passíveis de utilização.

O custo quando relacionado a performance requerida pelo material são os fatores que mais exercem influência sobre sua seleção em determinada aplicação. Empregar o material em funções que exijam melhor desempenho possível, como por exemplo nos carros de alta velocidade, equipamentos de segurança, foguetes e carros de corrida. Nestes exemplos, o custo não pode ser um limitador para a utilização de determinado material. Já em aplicações em que a criticidade envolvida é relativamente baixa o ajuste da relação “custo/benefício” do material tem que ser avaliado de forma a levar o custo com total relevância.

Algumas ferramentas são utilizadas no processo de determinação do material para aplicações específicas.

O engenheiro britânico Michael Ashby (1935) foi o responsável por desenvolver uma das estratégias mais utilizadas para a seleção de materiais,

Salvador

2020

conhecida como “índice de mérito”. O método consiste na confecção de fatores que são oriundos das especificidades requeridas pela aplicação ao material, onde estes fatores geram uma relação numérica que é disposta no diagrama (Fig. 6) em formas de linhas, limitando os materiais, deixando apenas os apropriados para a aplicação.

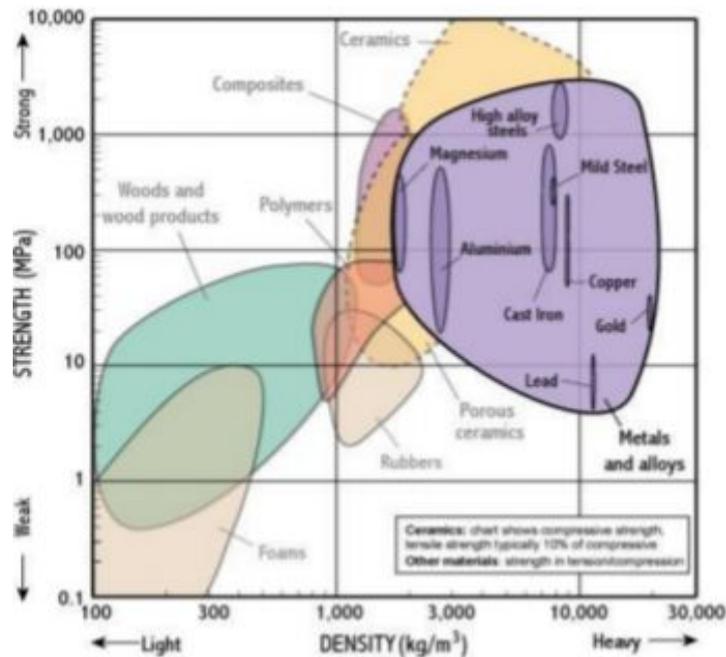


Figura 6: Diagrama do índice de mérito desenvolvido por Ashby

Fonte: Ashby, M., Shercliff, H., & Cebon, D. Materials: Engineering, science, processing and design (2ª ed.).

A partir dos materiais previamente selecionados, faz-se necessário uma nova avaliação mais específica, considerando outras possíveis restrições, para que dentre estes, o melhor material e com melhor custo/benefício será escolhido.

3. ANÁLISES E RESULTADOS

3.1. Bomba P6170

Anteriormente a etapa de reação de produto base para a formação de polímero superabsorvente, existe a etapa inicial de tratamento desse produto base. Na transição entre estas etapas está inserida a bomba centrífuga de acoplamento magnético, identificada como “P6170”. Também é oportuno pontuar que a planta, por se tratar de uma malha de produto sólido em sua maior parte, apresenta como fator chave para sua performance a alta confiabilidade dos seus equipamentos mecânicos rotativos, sendo a bomba um componente de alta criticidade na malha de operação, estando uma vez danificado, interfere no funcionamento ideal da planta, podendo causar inclusive a parada da mesma.

A bomba P6170 trata-se de uma bomba centrífuga de acoplamento magnético e apresenta as seguintes demandas operacionais e de processo:

1. A vazão requerida pelo sistema para a bomba deve apresentar um valor considerável e ser passível de variações ao longo de semanas e até diariamente.
2. Não é necessário que haja um considerável acréscimo de pressão no fluido de trabalho.
3. O fluido de trabalho contém ácido, devendo-se assim, para a caráter de segurança e proteção ambiental, a bomba apresentar um eficaz sistema de selagem.
4. O fluido não apresenta viscosidade considerável, não sendo esse um fator a se preocupar na operação da bomba.
5. Não há significativa variação de temperatura, tampouco temperaturas extremas.

Salvador

2020

Com relação ao apresentado, pode se perceber que a bomba do tipo dinâmica centrífuga, como explicado por Mattos e Falco (1998) e Karassik et al (2001) atende perfeitamente a essas demandas. O subtipo com acoplamento magnético, como também explicado, é indicado nesse caso, principalmente pelo que foi revelado na demanda número 3. Desse modo, a P6170, da companhia fabricante alemã Klaus Union GmbH & Co., KG e do modelo “SLM NV” apresenta as características apontadas a seguir:

1. Dados operacionais gerais da bomba modelos SLM NV
 - a. Máxima vazão: 3.500 m³/h;
 - b. Altura máxima promovida: 220m;
 - c. Faixa de Temperatura: -120°C até 400°C;
 - d. Sistema modular único;
 - e. Sem selagem dinâmica, o efeito magnético promove selagem completa.

2. Líquidos de trabalho: Ácidos, lixívia, hidrocarbonetos, líquidos de transferência de calor e líquidos agressivos, explosivos e tóxicos de um modo geral.

3. Indústrias de aplicação: Química, petroquímica, óleo e gás, de energia, dentre outras.

4. Dados operacionais específicos da bomba P6170
 - a. Vazão de trabalho: 450 m³/h;
 - b. Altura promovida: 25m;
 - c. Normatização: ISO 15783 & API 685;
 - d. Temperatura de operação: 34°C;
 - e. Pressão de sucção: -0,033 MPa;

Salvador

2020

- f. Pressão de descarga: 0,214 MPa;
- g. Pressão interna: 0,247 Mpa;
- h. Pressão Max do sistema: 1,5 Mpa;
- i. Rotação: 1780rpm;
- j. Torque: 41kgfm;

The Chemical Company

Specification sheet		TECHNICAL SPECIFICATION		Job No.: 8963	
B-40-700-SA-P-6-17-03		CENTRIFUGAL PUMP		Eqpt. No.: P 6170A[B]	
Plant: SAP		DETAIL		Building No.: B200	
Location: Camacari, Brazil				Page 2 of 6	
1	Rev.	Rev. of this page 1			
2	General data				
3	Service of unit: <input checked="" type="checkbox"/> Monomer solution loop over V6170 <input type="checkbox"/> Parallel service				
4	Quantity required	<input checked="" type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> Complete pump unit	<input type="checkbox"/> Pump with bare shaft (without motor, etc.)	
5	Location	<input type="checkbox"/> Indoor	<input checked="" type="checkbox"/> Outdoor		
6	Classification & fabrication code				
7	Centrifugal pump with:	<input type="checkbox"/> Mechanical seal	<input checked="" type="checkbox"/> Magnet coupling	<input type="checkbox"/> Canned motor	
8	<input type="checkbox"/> Heavy duty	<input type="checkbox"/> ISO 9905 / API 610	<input type="checkbox"/> API 685	<input type="checkbox"/> API 685	
9	<input type="checkbox"/> Medium duty	<input type="checkbox"/> ISO 5199 / ASME 73.1 / .2	<input checked="" type="checkbox"/> ISO 15783	<input type="checkbox"/> ISO 15783	
10	<input type="checkbox"/> General Service	<input type="checkbox"/> ISO 9908 / suppliers Standard	<input type="checkbox"/> VDMA 24279	<input type="checkbox"/> VDMA 24279	
11	<input type="checkbox"/> Special pump type (supplier standard):				
12	Customer's specification	<input checked="" type="checkbox"/> Project Spec.		<input type="checkbox"/> Other:	
13	Code for materials	<input checked="" type="checkbox"/> According to design code and manufacture standard			
14	Other codes required	<input type="checkbox"/> By contractor <input type="checkbox"/> N/A			
15	Design data				
16	Fluid Name	monomere solution			
17	Solids ²⁾	<input type="checkbox"/> Non-Abrasive	<input type="checkbox"/> Abrasive	40	Specific Heat at O.T. kJ/kgK
18	% of Mass			41	Vapor Pressure at Max. bar abs 0.039
19	Size mm			42	Solidification point °C
20	Corrosion by			43	Property of Liquid
21	Erosion by			44	<input type="checkbox"/> Poisonous / Toxic
22	pH Value			45	<input type="checkbox"/> Flammable
23	Gas content	Vol. %		46	<input type="checkbox"/> Reactive
24	Oper. Temperature (O.T.) °C	34	47	Capacity	rated/max. m ³ /h
25	Max. Fluid Temperature °C		48		norm. m ³ /h 450
26	Max. Density at O.T. kg/m ³	1008	49		min. m ³ /h
27	Dynamic Viscosity at O.T. mPas	6.4	50	Min. Continuous Flow (MCF) m ³ /h	242
28	Maximum Dyn. Viscosity at Temperature mPas		51	Maximum Pump Speed min ⁻¹	1780
29	Suction pressure	Rated MPa(g)	-0.033	52	Heating <input type="checkbox"/> Applicable <input checked="" type="checkbox"/> N/A
30		Max. MPa(g)		53	Differential head m 25
31	Discharge pressure	Rated MPa(g)	0.214	54	Differential Pressure MPa 0.247
32		Max. MPa(g)		55	NPSH-available m 9.692
33	Design Pressure MPa(g)	1.5	56	NPSH-required m 6.3	
34	Design Temperature ²⁾ °C	120	57	Cooling <input type="checkbox"/> Applicable <input checked="" type="checkbox"/> N/A	
35	<input type="checkbox"/> For other operating conditions (e.g. water test run, flushing, etc.) refer to remarks				
36					
37					
38					
39					
40					
41					

Figura 7. Especificações técnicas da bomba P6170
Fonte: Própria

3.1.1 Histórico de falhas

Segundo as informações passadas pela empresa detentora do equipamento, em forma de histórico de manutenção e registros de falha, a bomba P6170, apresentou problemas que se manifestam em forma de vibração excessiva, presença de polímeros nos canais de lubrificação e sucção, acoplamento magnético

Salvador

2020

com baixa transmissão de torque e patinando, apresentando assim problema com baixa vazão e contrafluxo, acionado um travamento da bomba e a válvula de recirculação de forma automática como medida de segurança e para resfriamento do conjunto.

O acompanhamento por parte do time de manutenção se faz em um nível de atuação mais intenso, por se tratar de uma bomba de acoplamento magnético que possibilita melhores práticas de manutenção, visto a separação por acoplamento entre o sistema de rotação que está em contato com o líquido de trabalho, e o sistema motriz que aciona a bomba por união através de ímãs. Sendo assim mais seguro e de menor criticidade para atuação quando os itens em análise pertencerem ao acoplamento gerador de movimento motriz, já no conjunto do rotor esse trabalho é mais complicado de ser executado pois o sistema é exposto ao fluido de trabalho (ácido), sendo assim necessário um procedimento para retirada do fluido do sistema antes da abertura desse compartimento, como na figura 8 abaixo.

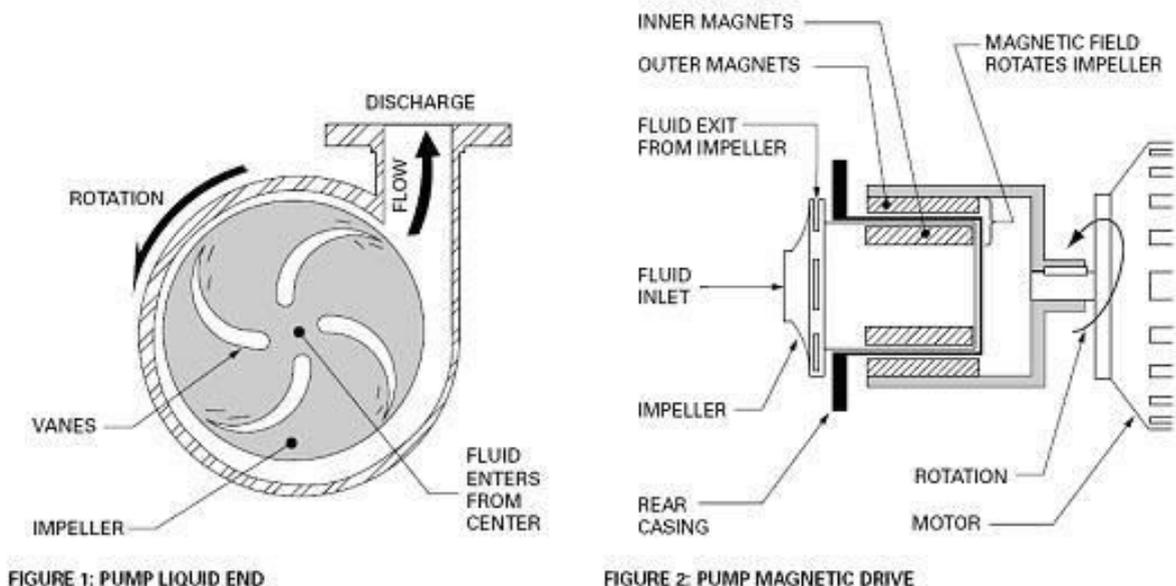


Figura 8. Bomba de acoplamento magnético, como funciona.

Fonte: T-Mag DRIVE PUMP

A tabela 1 abaixo traz um resumo do histórico principal de paradas da bomba por falhas que ocorreram no período de um mês antes da quebra. Tendo

Salvador

2020

apresentado anteriormente falhas que segundo o time de manutenção responsável foram categorizadas como não significativas para o estudo em questão.

Tabela 1. Resumo histórico de falhas (Anterior a quebra).

Nº	Tipo de falha	Causa
1	Bomba operando em contra fluxo	Desbalanceamento do rotor
2	Bomba operando em contra fluxo	Magnéticos dinâmicos e estáticos enfraquecidos (fim da vida útil)
3	Bomba operando em contra fluxo	Rotor com diâmetro incorreto
4	Baixa velocidade de fluxo	Resíduos de polímeros na linha de sucção
5	Bomba operando em contra fluxo	Desbalanceamento do rotor
6	Baixa velocidade de fluxo	Desbalanceamento do rotor
7	Bomba operando em contra fluxo	Desbalanceamento do rotor
8	Bomba operando em contra fluxo	Desbalanceamento do rotor

Fonte: Própria

Um ponto que chama atenção na análise do histórico de intervenções é o contínuo diagnóstico para desbalanceamento do rotor, havendo intervenção para correção do mesmo quando apresentado nas primeiras vezes, isto pode indicar uma incerteza no diagnóstico, não sendo a origem da causa raiz do problema.

3.2. Análise de falha

Salvador

2020

3.2.1 Análise por Ishikawa

Os principais efeitos, tidos na tabela 1 como “Tipos de Falhas” são melhores compreendidos abaixo:

i) Bomba operando em contrafluxo: A operação em contrafluxo, tendo como objeto de estudo a bomba centrífuga de acoplamento magnético P6170 é dado ao fato de ser apresentado o ato de retorno parcial do fluxo pelo canal de sucção. Sendo isto causado por alguns fatores, tais quais: operação abaixo da vazão mínima, deficiência da transmissão de força por parte do acoplamento magnético, falta de chave de fluxo que impeça retorno do fluido. O fato de o fluxo estar se deslocando em sentido reverso como assim caracterizado o contrafluxo, sugerindo baixa rotação do rotor ou até mesmo o seu não funcionamento. Tal efeito como o fluxo instável, além de ser de total impacto no processo produtivo, direciona para o entendimento que o funcionamento da bomba está de fato comprometido.

O entendimento do principal efeito acima melhor abordado se faz necessária uma conjuntura similar referente os principais tópicos tidos na tabela 1 como “Causa”, para então ter a compreensão necessária sobre os quesitos em estudo da análise de falha envolvendo a bomba P6170.

ii) Desbalanceamento do rotor: O desbalanceamento de um componente rotativo produz vibração no sistema mecânico (RAO, 2011), justificando assim os altos níveis de vibração da bomba como informado no histórico de manutenção. Foi possível também identificar nos relatórios que houve registro onde todo o conjunto apresentou comportamento de não ter sido balanceado, direcionado a uma provável falha de procedimento na manutenção do equipamento.

iii) Presença de Polímero nos canais de Lubrificação: A presença de polímero nos canais de lubrificação da bomba, ponto ao qual, junto com a ocorrência de vibração, podem ser considerados como causador da falha na bomba. Logo a presença de polímeros nos canais, primordialmente se deve a como uma possibilidades levantada a filtragem não totalmente eficaz que o sistema pode ter de nas tubulações de sucção instaladas na bomba.

Salvador

2020

iii) Montagem incorreta da bomba: Desencadeia, dentre outros problemas, a vibração do equipamento. Essa ocorrência se deve ao fato de a bomba ter sido substituída mais de uma vez, sofrendo rápidas intervenções de maneira a se estabelecer o sistema devido ao alto volume de paradas.



Figura 9. Montagem da Bomba P6170
Fonte: Própria

Sendo cada componente descrito abaixo:

1. Conjunto do rotor/impelidor.
2. Junta da voluta
3. Corpo da bomba

O desenvolvimento do diagrama de Ishikawa abaixo seu deu em forma de análise do histórico de manutenção e intervenções na Bomba P6170, sendo estudado suas causas e feito de forma a interligados e compreender a sua influência no comportamento do sistema, relacionado ao seu ambiente de uso, substâncias em contato e modo de operação.

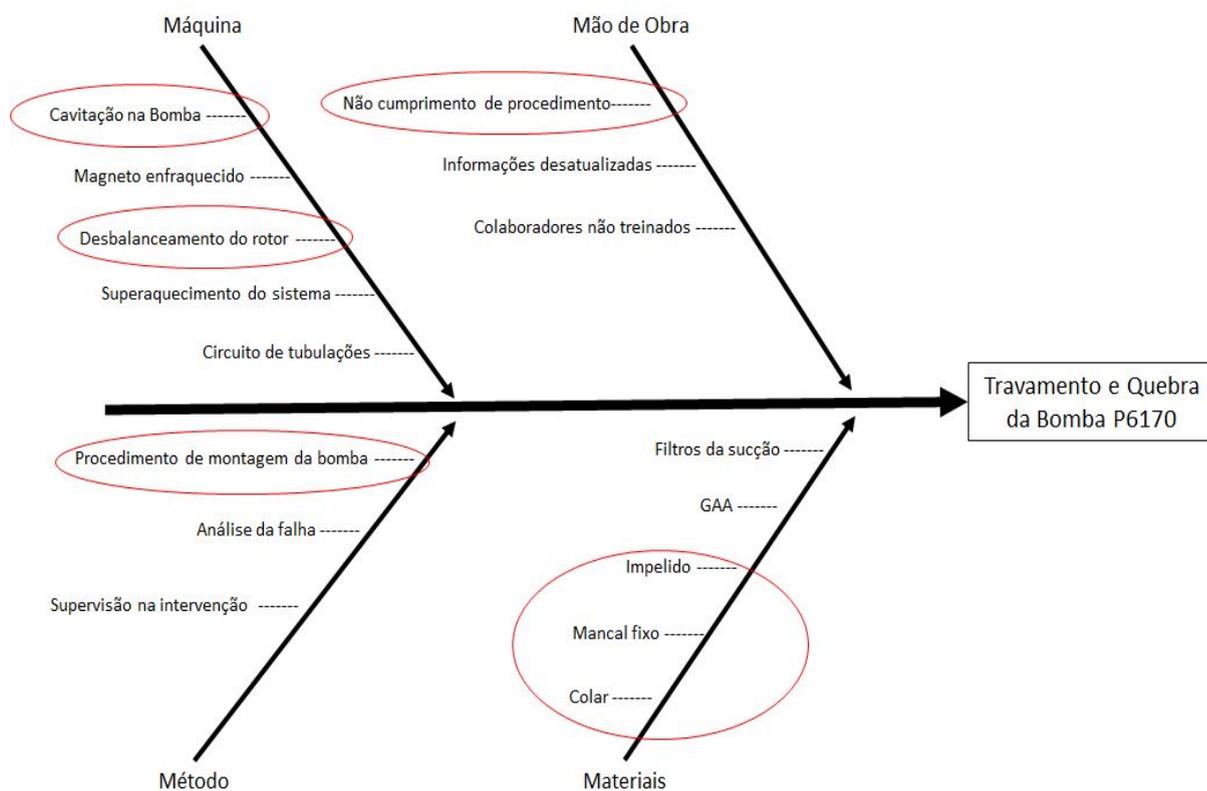


Figura 10 .Diagrama de Ishikawa.
Fonte: Própria

Os elementos pontuados no diagrama acima partiram de um processo de Brainstorm após compreensão do funcionamento do modelo da bomba abordado, o processo ao qual está inserido e seus aspectos de funcionamento juntamente ao seu histórico de manutenção, não obstante na utilização de literatura como base de confiabilidade nas considerações dos referidos.

Sendo considerado os fatores de maior influência os seguintes:

- Cavitação;
- Desbalanceamento do rotor;
- Procedimento de montagem da bomba;
- Não cumprimento do procedimento;
- Componentes de acoplamento e impelido;

A correlação entre três pontos com a mesma origem de falha (o desbalanceamento do rotor, procedimento de montagem da bomba e o não cumprimento do procedimento), por ter ocorrido um alto índice de intervenções em um curto período de tempo, ocorreu assim como relatado no histórico de manutenção, situações onde durante a montagem da bomba, componentes de dimensões erradas foram instaladas, ocasionando um desbalanceamento do rotor e mau funcionamento da bomba seguido de altos níveis de vibração, atentando para o desenvolvimento de um procedimento de intervenção na bomba mais criterioso para evitar falhas de operação.

Os pontos de cavitação e componentes de acoplamento e impelidor também se correlacionam e apontam para a mais provável origem da falha no sistema. A cavitação em sua grande maioria é causada por altas pressões no sistema, vazões fora do especificado e impurezas na linha, o que sugere ser o caso nesta análise. Sendo o impelidor o componente a sofrer parte do desgaste influenciando diretamente nos desempenho da bomba até a falha permanente, porém outros componente ligados ao impelidos podem ser os causadores e afetados pelo o distúrbio no sistema, sendo necessário se encontrarem em bom estado para garantia do funcionamento da bomba.

Para confirmação das análises se utilizou do material referente a abertura do conjunto do impelidor que foi resultado de uma ação por não ter sido encontrado a falha nos outros componente da bomba. A figura 11 abaixo destaca a região analisada com a abertura do sistema de atuação do impelidor.

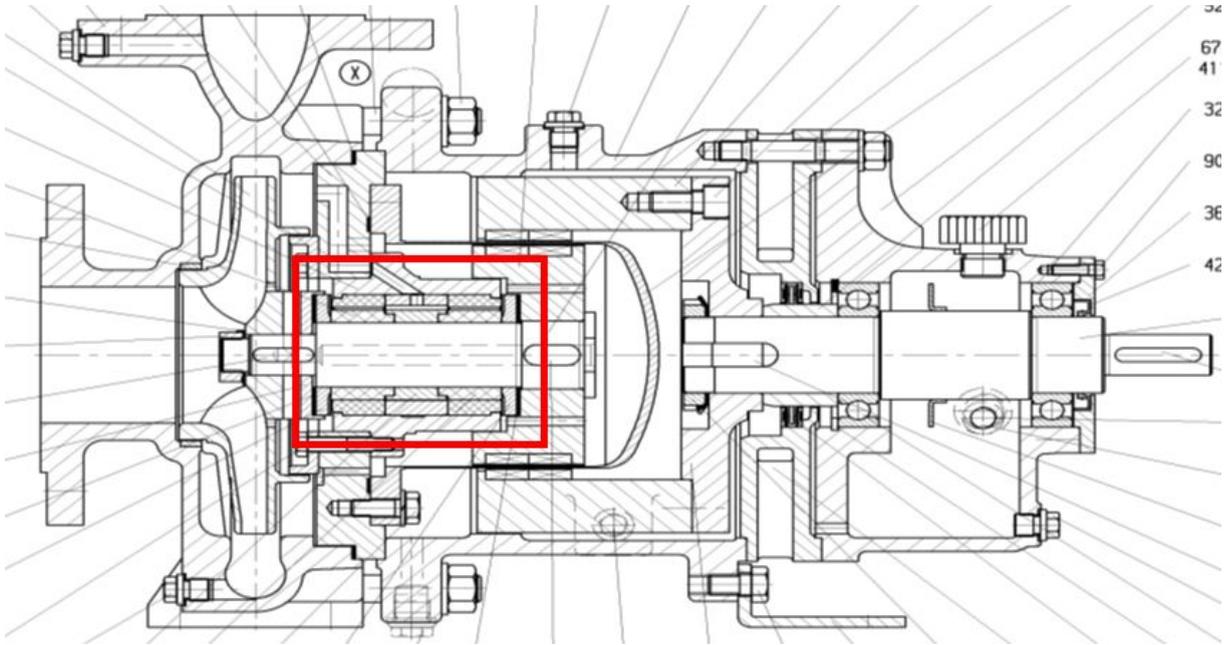


Figura 11. Representação 2D da bomba P6170
 Fonte: Klaus Union GmbH

A figuras 12 abaixo destacam as regiões que se apresentaram com avarias no primeiro momento da abertura do sistema de atuação do impelidor, o copo de separação apresenta furo/poro, o que fez o líquido bombeado se deslocar para o lado do acoplamento magnético, a capa de proteção do magnético interno danificada, rotor apresenta avarias em todo o perímetro, sendo essa uma das principais características de cavitação e ou ataque químico.



Figura 12. Desmontagem da Bomba P6170
 Fonte: Própria
 Salvador

2020

As figuras 13 abaixo destacam as outras regiões que se apresentaram com avaria. Iniciando pelo colar de escora que apresenta regiões danificadas, impossibilitando o seu uso, sendo necessário a reposição do componente. A face do mancal demonstrou estar completamente danificada, sendo este um componente de difícil reposição, e por fim o magnético interno com capa de proteção danificada.

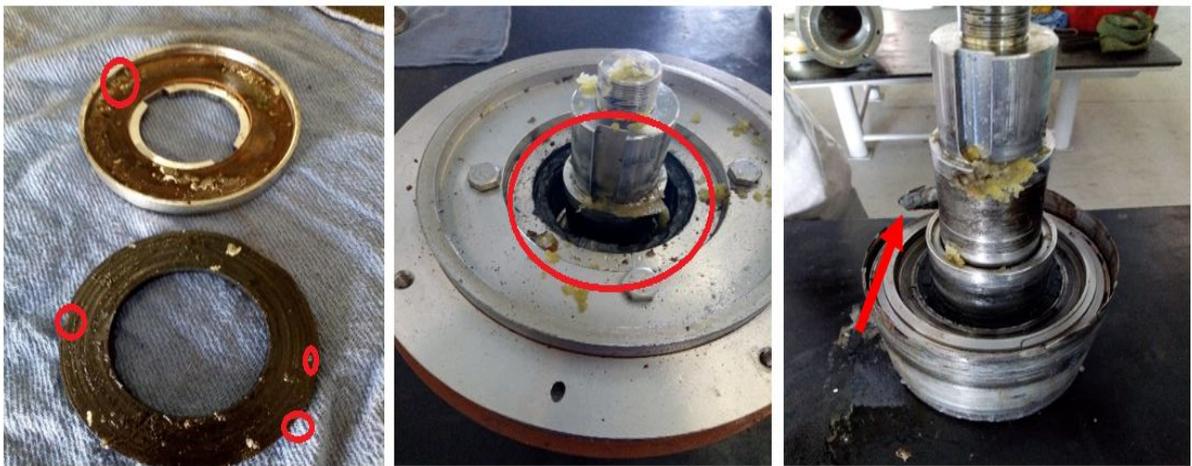


Figura 13. Componentes danificados Bomba P6170
Fonte: Própria

O sistema apresentou diversas avarias que indicam ser causadas pela cavitação e a circulação de impurezas junto ao fluido de trabalho decorrente do desprendimento de material do equipamento.

3.2.2 Análise de causa raiz

O método pressupõe uma forma de, através do trabalho conjunto das partes interessadas, encontrar as causas origens da falha em um estudo em situações nas quais as causas não são encontradas por abordagens individuais (GANO, 2011). Desse modo, o método também oferece meios de se encontrar soluções efetivas para as causas geradoras de falhas, realizando um constante acompanhamento e validação das soluções encontradas.

O trabalho se inicia com a escolha do equipamento a ser tratado, e se deve a uma recorrência considerável de falhas no mesmo. Em seguida, são elencadas as principais falhas a serem tratadas na ACR, e assim ocorre a realização da distribuição de dados de vida para tais falhas, sendo essa a etapa preliminar à análise, servindo de suporte para as decisões que serão tomadas.

Posteriormente ocorre a formação do time multidisciplinar que realizará a análise, sendo composto por setores da empresa afetados pela falha em questão, e que apresentam interface com o equipamento.

Com a etapa preliminar e a formação do time concluídos se inicia a ACR, a definição dos caminhos causais de suas principais falhas, e a decisão de qual falha será a preferencial a ser destrinchada na análise. Sendo assim a análise se dá através da falha escolhida como preferencial, e são encontradas causas raízes para os principais eventos causadores da falha.

Com a definição de todas as causas raízes, se houver mais de uma, ocorre a atribuição de ações para findar tais causas, tendo essas ações seus responsáveis integrantes do próprio time interdisciplinar que realiza a ACR.

Por fim ocorre a aplicação do plano de ação gerado na ACR com o seu constante monitoramento, para que seja verificada a eficácia de cada ação. As ações são constantemente acompanhadas e novas ações podem ser criadas assim como algumas podem ser descartadas.

Princípios da efetiva resolução de problemas, esses princípios, chamados por L.Gano de princípios de causalidade são base para o método de solução de problemas de ACR, sendo compostos por 4 afirmações, como ilustra a figura 14, que conduz todo o processo de análise. Seu completo entendimento, é essencial para que o método seja aplicado com eficácia.

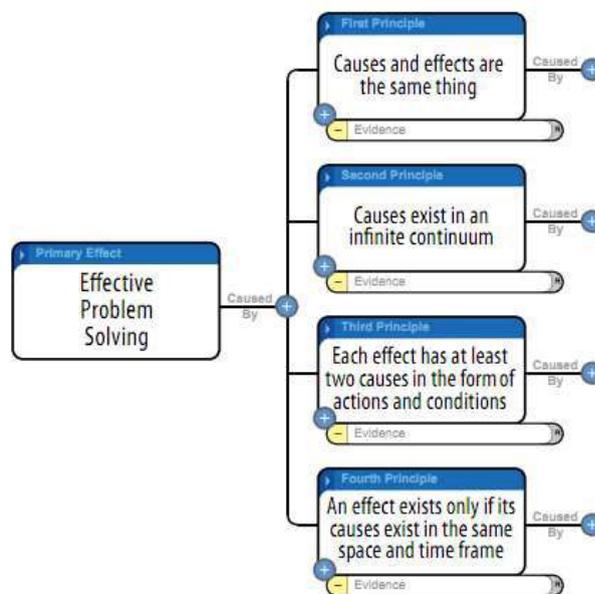


Figura 14. Princípios de causa e efeito
 Fonte: Gano (2011)

O completo entendimento desses princípios é essencial para que o método seja aplicado com eficácia. Dessa maneira, cada um será previamente traduzido e explicado a seguir.

- i) Causas e efeitos são a mesma coisa: Gano constatou que a classificação do que seria causa e o que seria efeito depende da sequência de observação em uma linha do tempo, ou seja, um efeito de uma causa pode se comportar como causa para outro efeito (GANO, 2011);
- ii) Causas existem em um infinito meio contínuo: Temos que destrinchando cada efeito continuamente, suas causas aparecerão indefinitivamente, de sorte que, é imprescindível saber até quando é necessário efetuar a busca de causas (GANO, 2011);
- iii) Cada efeito tem pelo menos, duas causas, nas formas de ações e condições: Uma condição não se converterá em efeito por si só, é necessário que haja uma ação para gerar tal efeito e vice-versa. Do jeito que, para cada efeito será obrigatório a busca de ações e condições (GANO, 2011).

iii) Um efeito apenas existe se suas causas coexistirem no mesmo espaço e tempo: Com base no pensamento físico Isaac Newton (1643-1727), os pares de ação(ões) e condição(ões) apenas culminaram em um efeito se ocorrem ao mesmo tempo no mesmo espaço. Conseqüentemente é fundamental, à análise, a relação espaço-temporal das causas para definir se, de fato, são a origem do efeito em questão (GANO, 2011).

3.2.3 Funcionamento do método reality charting

Com base nos princípios explanados é montado o diagrama, fornecido pelo próprio software autointitulado “Reality Charting”, no qual, os efeitos são destrinchados em causas de ação e condição. Sua composição é diretamente baseada nos princípios apresentados, sendo tal composição composta por um time multidisciplinar.

Segundo Gano (2011), o método de ACR Reality Charting pressupõe um trabalho em conjunto de forma a combinar realidades das partes interessadas. Nessa conformidade as partes interessadas, no ramo industrial, seriam os setores da empresa afetados pelo problema e dependentes do equipamento.

Para a condução da análise de forma a se determinar as soluções efetivas, é necessário que sejam identificadas quais causas são raízes do problema, ou seja, as causas nas quais vale a pena investir energia para resolver. A identificação passa pelo conceito de que as causas consideradas raízes, serão as que, quando retiradas do diagrama evitariam o acontecimento da falha (efeito) da matriz da ACR (GANO, 2011).

Como elucidado anteriormente, a sistemática das análises de falha promulgou dentro da companhia, a sua influência direta na confiabilidade dos ativos da unidade, contribuindo assim para o sucesso do negócio como um todo. Dentro desse contexto, foi definido pela companhia que qualquer equipamento que apresente falha deverá ser alvo de uma ACR, baseada no método Reality Charting. Salientando-se que para o grupo de equipamentos causadores de problema, as análises procuram

Salvador

2020

ser mais expandidas, de modo a relacionar um maior número de falhas, ocorridas antes do começo da aplicabilidade do método, assim eliminando as causas de falhas crônicas porém no caso iremos disponibilizar apenas a ramificação crucial a qual definiu a causa raiz e trouxe a carência desse estudo de avaliação sistemática para melhoria, sugestão ou até mesmo reafirmação com maior propriedade do que foi feito às pressas sob condição de urgência com a planta parada.

3.2.4 Definição do problema e principais relações causais

Iniciando-se a análise, temos, referente ao passo 1, a definição do problema, que foi compreendido nas seções anteriores e desse modo será o efeito primário da análise.

As principais relações causais, referente ao passo 2, se trata da definição das principais relações da causalidade, e foram criadas a partir das duas análises preliminares representadas

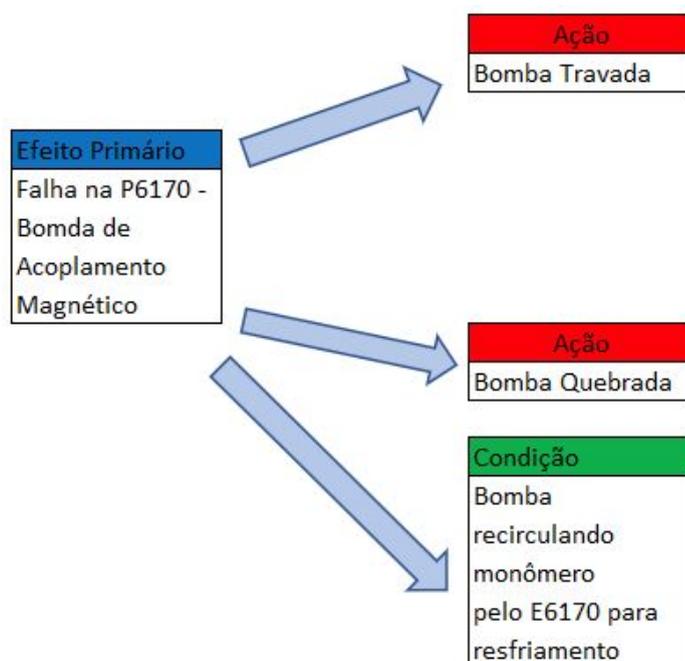


Figura 15. Principal relação causal do ACR
Fonte: Própria

Nota-se então, que a análise partirá da análise mais geral “Falha na Bomba” que representa assim todos os modos de falhas e se dividirá nas principais relações causais, sendo bomba travada na forma de ação, a principal causa/efeito que será desdobrada. Também é oportuno observar, como definido por Gano (2011) que as causas se desdobram sempre na forma de ação e condição.

3.2.5 Reality Charting – Sete passos para solução de problemas

Nesta seção será apresentada a estrutura lógica sequencial apresentada por L.Gano para o desenvolvimento da análise. L Gano, construiu a estrutura mencionada na forma de sete passos que seriam utilizados para a solução efetiva de problemas, sendo esses:

1. Definir o problema;
2. Determinar as relações de causalidade para incluir ações e condições para cada efeito;
3. Providenciar uma representação gráfica das relações de causalidade para incluir ações e condições específicas;
4. Providenciar evidências para suportar a existência de cada causa;
5. Determinar se cada set de causas é suficiente para causar o efeito do set;
6. Providenciar soluções que removem, mudam, ou controlam uma ou mais causas do evento. As soluções devem ser reveladas para prevenir a recorrência, alcançar os objetivos do time, estar sobre o controle do time e não gerar outros problemas;
7. Implementar e rastrear a efetividade para cada solução.

Desse modo, é resumido todos os conceitos apresentados anteriormente, utilizando uma linha sequencial na resolução do problema.

3.2.6 Demais modos de falha

Como explicado anteriormente, os demais efeitos analisados não necessitam ser profundamente explorados. Desse modo segue o breve desdobramento causal realizado. As causas da imagem, são diretamente ligadas ao efeito primário, como ilustrado na figura 16. acima e até onde foram adentradas, produziram uma causa raiz, da ACR. A causa-raiz trata-se dos “Mancais de silício” terem sido destruídos, que de uma forma geral, causaram a quebra da bomba.

Segue o set principal resultante do Reality Charting reafirmando a conclusão embasada no Ishikawa:

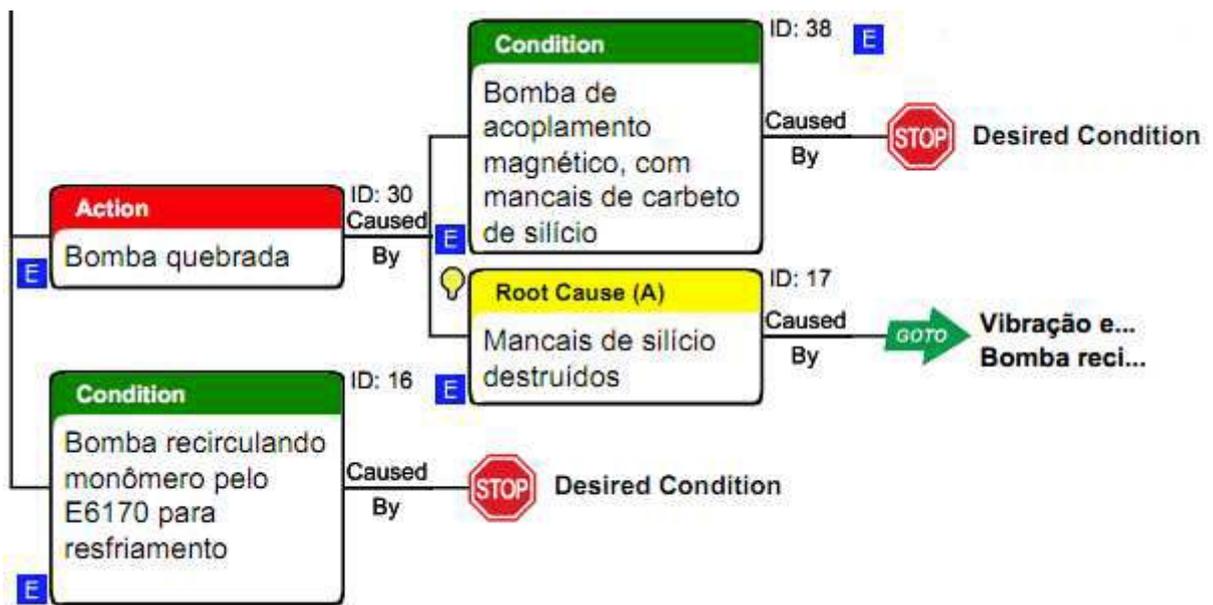


Figura 16. Causas de “Falha P6170”
Fonte: Própria

Por fim, com base na ACR realizada através do Reality Charting, essa foi a causa raiz encontrada. No capítulo posterior ocorrerá a atribuição de soluções para causa listada e assim ocorrerá a validação da eficácia dessas soluções.

3.3. Análise funcional da bucha de mancal da bomba P6170

3.3.1 Comportamento e modelo.

O mancal analisado é do tipo mancal de deslizamento, utilizando de uma bucha sobre comportamento de lubrificação hidrodinâmica em forma de cilindro. Tendo como principais esforços a pressão do fluido lubrificante do sistema (o mesmo que bombeia) e de reações devida a força centrífuga, carga radial e torque. Todavia a carga axial preponderante do eixo não é considerada pelo o fato de o mesmo ser acoplado magneticamente, não estando assim em repouso sobre a bucha, logo sendo um mancal do tipo cargas radiais: suportam esforços radiais, impedindo o deslocamento no sentido transversal do eixo.

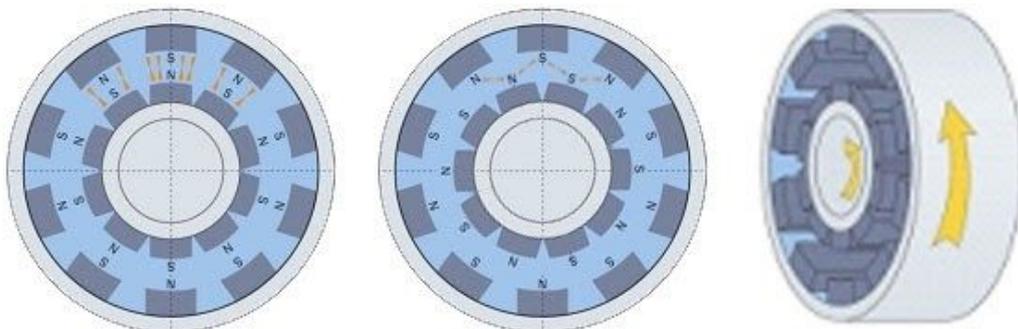


Figura 17. Princípio de operação do acoplamento magnético
Fonte: NEOFLUX

Existe uma relação de grande importância e que também contribui como uma das premissas para que a bucha de mancal tenha o comportamento esperado. A dureza do material da bucha deve ser para este sistema inferior a dureza da luva acoplada ao eixo em rotação de aço Inox 616 (176,6 HV) onde o desgaste por atrito que possa ocorrer impacte na bucha e não no conjunto da luva acoplado ao eixo. O fator usinabilidade também é outro aspecto importante a ser considerado, visto que um dos objetivos deste trabalho é encontrar materiais que possam ser utilizados na

Salvador

2020

bucha de mancal, tendo como características a se diferenciar a facilidade de fabricação ou aquisição do mesmo, sendo a dureza de grande relevância para o processo de confecção do componente. .

A geometria da bucha bem como a sua folga com relação a luva, onde o fluido lubrificante agirá, tem dimensão de 0,09mm e um passeio axial de 1 mm. As dimensões da bucha podem ser melhores compreendidas na figura 18 abaixo:

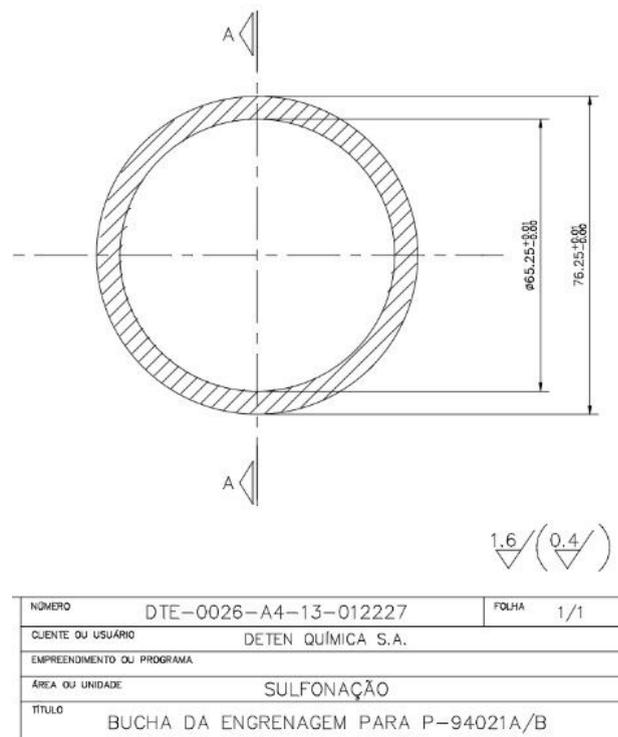


Figura 18. Desenho de cotas bucha em PEEK
Fonte: Própria

As principais informações para a análise são os raios internos e externos e o comprimento da bucha, sendo o diâmetro externo de 76,30 mm, o interno de 62,1 mm e comprimento de 75.88 mm, sendo utilizadas para compreensão nos esforços da parte interna da bucha, que está em contato com o fluido lubrificantes e sobre as cargas de pressão e componentes radiais.

3.3.2 Lubrificação

A lubrificação utilizada para o funcionamento do sistema de interação entre a bucha de mancal e do eixo do impelidor tem que ser capaz de promover o deslizamento necessário para uma boa operação do equipamento. A utilização de óleos lubrificantes ou do tipo sólido se faz presente em grande parte desses tipos de aplicações, todavia no estudo do sistema para uma bomba de acoplamento magnético esse tipo consideração se torna ainda mais relevante. Uma bomba de acoplamento e acionamento magnético é uma conjunto fechado, onde o óleo ou graxa de lubrificação não podem ser usados para auxiliar no deslizamento sobre a bucha de mancal. Logo, o líquido bombeado que é usado para a lubrificação do conjunto e para as necessidades de refrigeração, no caso em estudo é o próprio GAA. Uma porção de líquido bombeado é geralmente retirada da descarga da bomba, esse fluxo é geralmente conhecido como fluxo de recirculação e geralmente é empregado para o resfriamento do sistema magnético, lubrificação de rolamentos radiais e axiais e para outras aplicações similares em que é necessário lubrificante ou fluido de resfriamento.

As bombas de acionamento magnético geralmente são equipadas com "mancais de bucha", que usam o líquido bombeado para lubrificação hidrodinâmica. Um mancal de bucha é um dos tipos mais simples de mancal, compreendendo apenas superfícies de mancal e sem elementos rolantes. Portanto, a luva ou o mancal deslizam sobre a superfície do mancal, onde o líquido bombeado é usado para sua lubrificação. Os materiais de construção destes e as folgas necessárias das superfícies deslizantes podem restringir os líquidos e serviços para os quais esse tipo de bomba pode ser usado.

Dentro da conjunto de análise da bucha de mancal, a viscosidade do fluido lubrificante influencia diretamente na propagação dos esforços sobre a superfície da bucha, em especial as componentes resultantes para o atrito. Considerando um fluido onde ocorre movimento relativo das partículas, sendo a relação entre as

velocidade da camada superficial superior e da inferior a garantir que as camadas superficiais estejam afastadas entre si, onde a

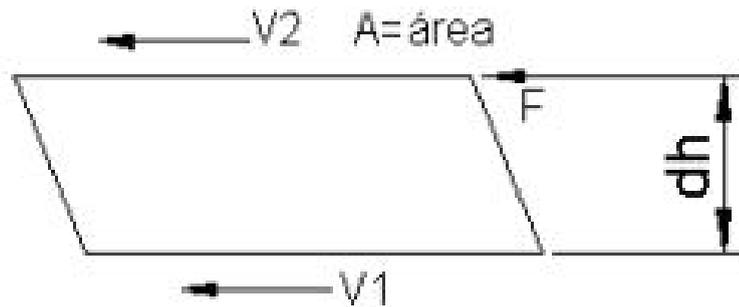


Figura 19. Definição de viscosidade
Fonte: UNIP (Projeto de componentes de máquinas)

O GAA tem viscosidade absoluta do fluido a condição de 20°C igual a 1,19 cp, em 40°C de 0,85 cp e a 50°C de 0,73 cp. A temperatura de funcionamento ideal da bomba que deve estar em 34°C, com variações aceitáveis entre 31 - 40°C indica viscosidade abaixo de 1 cp a altas temperaturas, e não deixando de levar em consideração o fato de fluido sem um ácido e a bucha de mancal deve ter propriedades que não permita a reação química entre eles.

Existem duas variações da viscosidade que comumente são utilizadas para análises que envolvem comportamento mecânicos como o de um mancal de deslizamento. A viscosidade absoluta é derivada da unidade básica de força e velocidade, por sua vez a viscosidade cinemática definida como a viscosidade absoluta dividida pela densidade do fluido, que no caso da GAA é de 1,05 g/cm³.

$$u = \eta / \rho$$

- u: Viscosidade cinemática
- η : Viscosidade absoluta
- ρ : Densidade da massa

Salvador
2020

Encontrando assim o valor de 1,13 cp para a viscosidade cinemática do sistema de deslizamento da bucha de mancal a 20°C

Para o levantamento das tensões de cisalhamento envolvidas no sistema, uma avaliação similar é utilizada, tomando como base a folga do sistema, que será a mesma espessura do fio do fluido lubrificante (h), e variação entre as velocidades das superfícies.

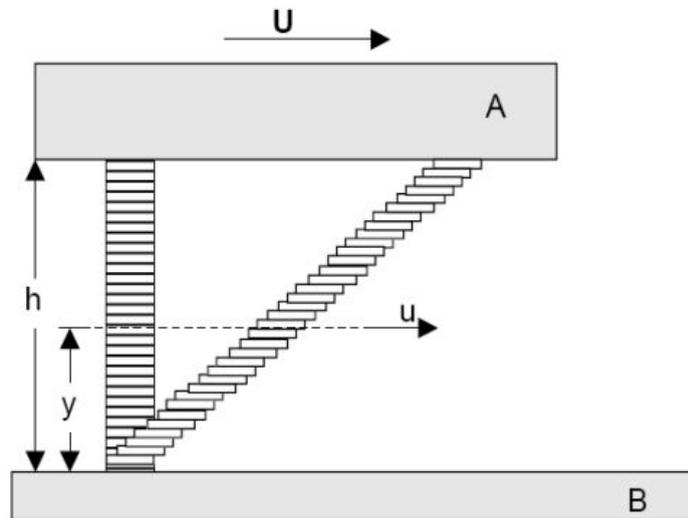


Figura 20. Tensões de cisalhamento
Fonte: UFPR (Mancais de deslizamento)

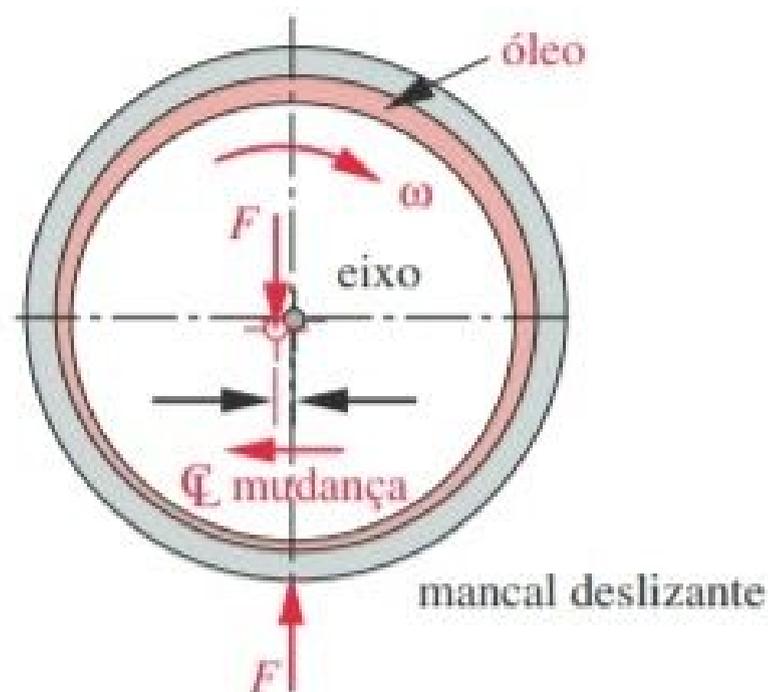
A lubrificação a qual o sistema está sobre funcionamento é do tipo Hidrodinâmica, onde apresenta um comportamento estável. Logo se existe o aumento da temperatura do lubrificante e a viscosidade tender a cair, resultará em um menor coeficiente de atrito levando o sistema a variações de esforços não desejadas, logo para uma correta aplicação dessas análises se faz necessário considerar o modo de operação conhecido da bomba.

Existem inúmeras geometrias para mancais que fazem uso dos princípios hidrodinâmicos. De forma geral qualquer mancal de deslizamento que use um filme de óleo ou fluido é considerado um mancal hidrodinâmico, podendo ser ele um gás ou fluido.

Salvador

2020

Às geometria de superfícies de um mancal agem criando um fluxo e pressão sobre o fluido. A pressão sobre o fluido suporta a carga evitando interação metal/metal. Caso o filme de óleo sob o eixo seja fino, logo as superfícies do mancal devem ser lisas para que haja uma boa interação no sistema de lubrificação do mancal. Para o projeto de um mancal de deslizamento deve-se assegurar que a espessura mínima do filme seja mantida, a excentricidade do eixo seja aceitável, a pressão no lubrificante seja possível e a viscosidade do óleo seja aceitável.



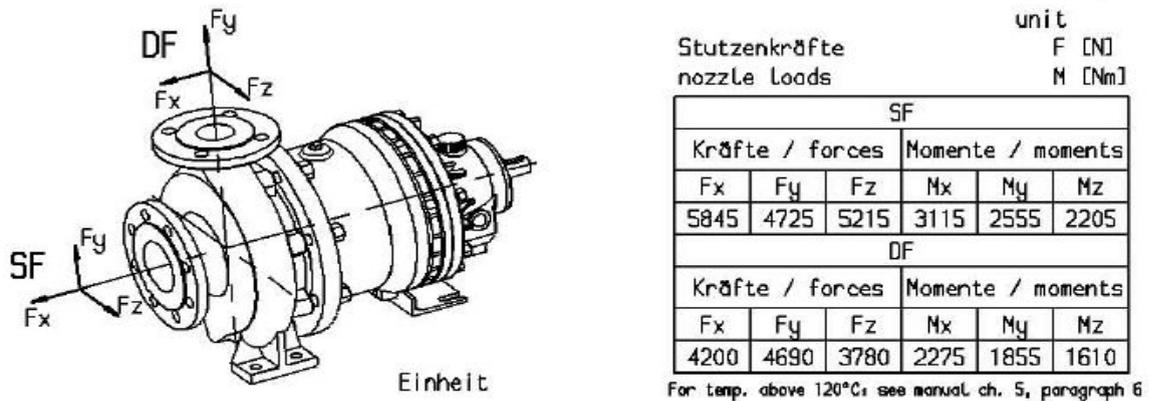
- (c) Eixo rodando rapidamente
- lubrificação hidrodinâmica
 - ausência de contato metálico
 - fluido é bombeado pelo eixo
 - o eixo atrasa a linha de centro do mancal

Figura 21. Condição de lubrificação
Fonte: Robert L. Norton 4º ed

3.3.3 Solicitações na bucha

As solicitações na bucha de mancal em geral são resultado da influência do líquido lubrificante, pressão e temperatura da condição de trabalho, e formas geométrica de influência direta e indireta sobre a bucha.

A figura 22 abaixo traz as tensões principais exercidas pelo eixo no sistema, sendo o principal referencial no que tange o aspectos dos valores absolutos de tensões. Esses valores são encontrados diretamente no manual e datasheet da bomba em questão.



ITEM No.	P6170 A[B]																				
OWNER DOC. No.	B-40-300-SA-P-6-17-001																				
WPC DOC. No.	4-ASP007-B01-0002																				
<small>Sämtliche Rechte an dieser Zeichnung einschließlich der Rechte für den Fall der Patenterteilung bleiben vorbehalten. Diese Zeichnung darf weder vervielfältigt, noch zu Zwecken des Wettbewerbes verwendet oder an dritte Personen mitgeteilt werden.</small>																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>☒</th> <th>Datum</th> <th>Name</th> <th>Modell-Nr.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gezeichnet</td> <td>.</td> <td>.</td> <td>.</td> </tr> <tr> <td>Geprüft</td> <td>23.08.2012</td> <td>Nielke</td> <td rowspan="3">☒</td> </tr> <tr> <td>Genehmigt</td> <td>16.10.2012</td> <td>Nielke</td> </tr> <tr> <td>CAD-gez.</td> <td>23.08.2012</td> <td>Vahle</td> </tr> </tbody> </table>	☒	Datum	Name	Modell-Nr.	Gezeichnet	.	.	.	Geprüft	23.08.2012	Nielke	☒	Genehmigt	16.10.2012	Nielke	CAD-gez.	23.08.2012	Vahle	 KLAUS UNION Bochum		
☒	Datum	Name	Modell-Nr.																		
Gezeichnet	.	.	.																		
Geprüft	23.08.2012	Nielke	☒																		
Genehmigt	16.10.2012	Nielke																			
CAD-gez.	23.08.2012	Vahle																			
Maßstab	Kreiselpumpe mit Magnetkupplung centrifugal pump with magnetic coupling SLM NVO 250-200-250-16E10		1.5915.5330 Ersatz f. , ersetzt d. , Entst. aus 2.5915.3324																		

Figura 22. Esforços sobre o eixo de atuação do impelidor
Fonte: Própria

3.3.3.1. Lei de Petroff

Considerando uma placa inferior estacionária e movermos a placa superior para a direita com a velocidade (U), o fluido entre as placas será cisalhado da mesma maneira que no intervalo concêntrico. O fluido molha e se adere em ambas placas, fazendo sua velocidade zero na placa estacionária e U junto à placa móvel. (Robert L. Norton, Projeto de Máquinas 4.ed, pág 633):

$$\tau_x = \eta \frac{d\beta}{dt} = \eta \frac{d}{dt} \frac{dx}{dy} = \eta \frac{d}{dy} \frac{dx}{dt} = \eta \frac{du}{dy}$$

Figura 23. Equação da tensão de cisalhamento .
Fonte: Robert L. Norton, Projeto de Máquinas 4.ed

A equação acima da figura 23 correlaciona os elemento diferenciais de fluido no intervalo. e de de velocidade responsável pela a distorção angular (β). A tensão de cisalhamento (τ_x), agindo no elemento diferencial de fluido no intervalo é proporcional à taxa de cisalhamento agindo sobre o mancal.

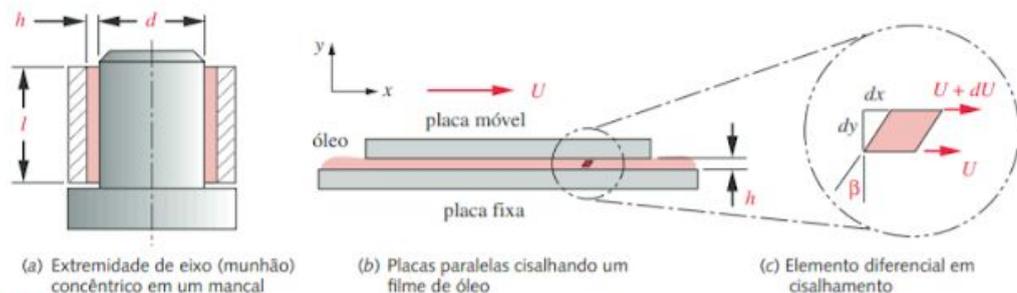


Figura 24. Mancal e elementos de força .
Fonte: Robert L. Norton, Projeto de Máquinas 4.ed

Sendo possível assim encontrar o valor de τ_x com intensidade de 0,19 MPa.

Ainda em consideração a análise acima, foi então utilizado a formulação abaixo da figura 25 para identificar a força de cisalhamento necessária para o filme de lubrificação.

$$F = A\tau_s = \eta A \frac{U}{h}$$

Figura 25. Equação para a força de cisalhamento
Fonte: Robert L. Norton, Projeto de Máquinas 4.ed

Sendo possível assim encontrar o valor de F com intensidade de 2,81 KN

Agora em uso da força de cisalhamento também se é compreendido o torque relacionado com o sistema do fluido, como apresentado na figura 26 abaixo:

$$T_0 = \frac{d}{2} F = \frac{d}{2} \eta A \frac{U}{h} = \frac{d}{2} \eta \pi dl \frac{\pi d n'}{c_d/2}$$

$$T_0 = \eta \frac{\pi^2 d^3 l n'}{c_d}$$

Figura 26. Equação para torque sem carga no filme
Fonte: Robert L. Norton, Projeto de Máquinas 4.ed

Encontrando assim um torque de intensidade de 0,349 KN.m

3.3.3.2. Equação de Reynolds para mancais radiais.

Considerando uma abordagem com as cargas transversais e buscando encontrar os limites de solicitações mecânicas sofrida pela bucha, considera-se a premissa onde as placas abaixo na figura 27 não podem ser paralelas.

Se rodarmos a placa inferior de figura 27 ligeiramente no sentido anti-horário e movermos a placa superior para a direita com uma velocidade U, o fluido entre as placas será carregado para dentro do espaço decrescente como mostrado na figura, desenvolvendo uma pressão que suportará uma carga transversal P (Robert L.

Norton, Projeto de Máquinas 4.ed, pág 634). O ângulo entre as placas é análogo à variação da folga devido à excentricidade e da extremidade do eixo e do mancal quando houver a sua existência, se tratando de um eixo apoiado na bucha, diferente do acoplamento magnético onde esse tipo de comportamento só se dá em altas rotações, ou sob funcionamento inadequado do sistema, a exemplo de mal funcionamento do magnetos do acoplamento.

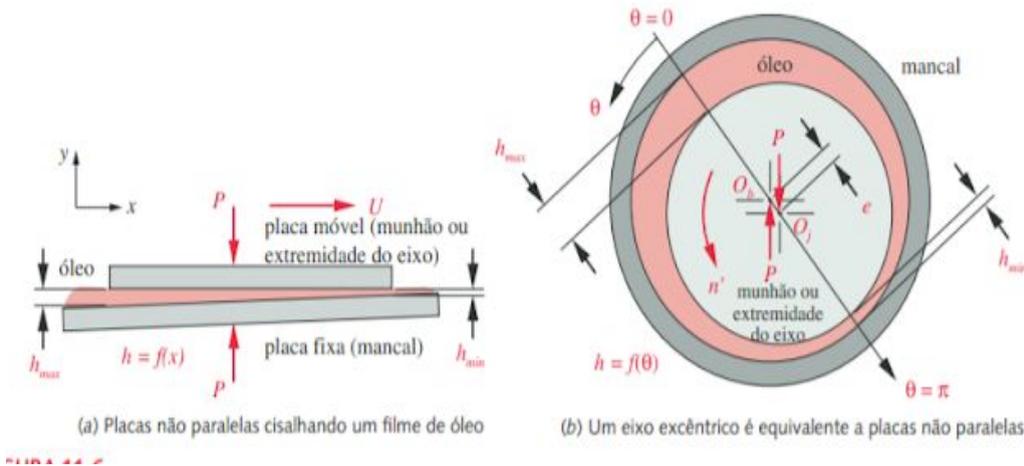


Figura 27. Mancais radiais excentricidades e intervalo h
 Fonte: Robert L. Norton, Projeto de Máquinas 4.ed

Folgas e excentricidades podem ser interpretadas através de um fator adimensional de excentricidade dado pela equação na figura 28 abaixo:

$$\epsilon = \frac{e}{c_r}$$

Figura 28. Equação de excentricidade
 Fonte: Robert L. Norton, Projeto de Máquinas 4.ed

Considerando os valores de ϵ como os extremos 0 e 1, com e sem o contato entre as superfícies, e utilizando as formulações da figura 29 abaixo, se chega à conclusão que $h = cr = 0,09 \text{ mm}$, a folga para lubrificação no sistema e já definida.

$$h_{\min} = c_r (1 - \epsilon) \qquad h_{\max} = c_r (1 + \epsilon)$$

Figura 29. Equação da espessura do filme
 Fonte: Robert L. Norton, Projeto de Máquinas 4.ed

Para identificar a principal tensão sobre o sistema foi utilizada a análise considerando a solução para mancal curto, Os mancais longos não são frequentemente usados nas máquinas modernas por diversas razões. Pequenas deflexões do eixo ou desalinhamento podem reduzir a folga radial a zero em um mancal longo, e considerações de empacotamento frequentemente requerem mancais pequenos. As razões típicas l / d dos mancais modernos são no intervalo de 1/4 a 2 (Robert L. Norton, Projeto de Máquinas 4.ed, pág 637), sendo o intervalo para o caso em estudo de 0,99.

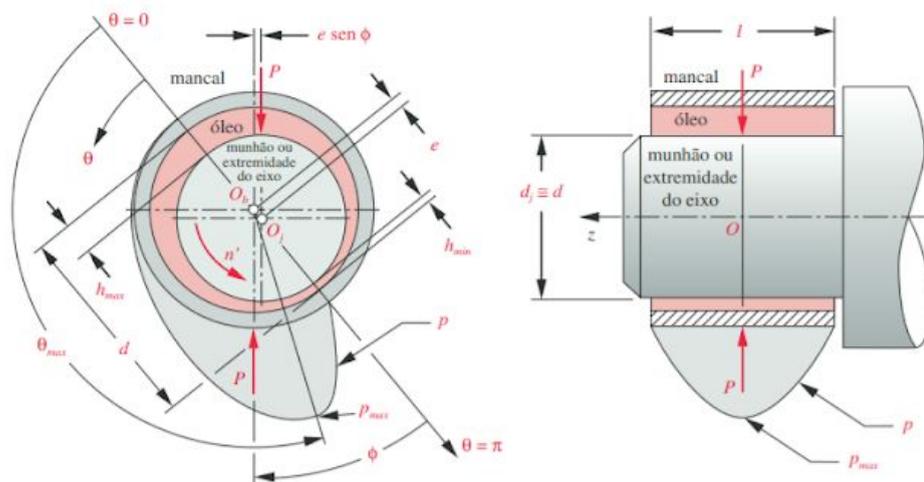


Figura 30. Solicitações solução de Ocvirk
 Fonte: Robert L. Norton, Projeto de Máquinas 4.ed

A solução para mancal longo (Sommerfeld) supõe a inexistência de perdas de óleo na extremidade do mancal, mas nestas razões l/d pequenas as perdas de extremidade podem ser um fator importante. Ocvirk e DuBois resolveram uma forma da equação de Reynolds que inclui o termo de perdas nas extremidades (Robert L. Norton, Projeto de Máquinas 4.ed, pág 637).

$$p = \frac{\eta U}{rc_r^2} \left(\frac{l^2}{4} - z^2 \right) \frac{3\epsilon \sin \theta}{(1 + \epsilon \cos \theta)^3}$$

Figura 31. Pressão no mancal solução de Ocvirk .
 Fonte: Robert L. Norton, Projeto de Máquinas 4.ed

Aplicando os valores conhecidos nas formulações de Reynold e Ocvirk, se chegou a tensão (compressão) mínima a ser suportada pelo o material da bucha de mancal da bomba de acoplamento magnético de recirculação de GAA com intensidade de 77,26 MPa utilizando o fator de segurança igual a 2, considerando 80 Mpa devido às variáveis de pressão geradas pelo fluido de lubrificação.

3.4. Seleção de materiais para bucha de mancal

3.4.1 Bucha de PEEK

No contexto o qual o desafio se apresentou para a equipe, com caráter de urgência, era recolocar a bomba em condições de uso novamente o mais rápido possível, para evitar maiores perdas do produto, obstruindo linhas por toda planta, e produção em si. A planta produz em média 220 toneladas de produto por dia, e dada a criticidade do equipamento no processo, e a impossibilidade de produção sem o pleno funcionamento da bomba, os prejuízos seriam consideráveis, caso fossem escolhidas uma das soluções mais palpáveis que haviam sido levantadas até o momento, nos dois primeiros dias de planta parada devido a quebra da P6170. Por não ter em posse a peça sobressalente para reposição no almoxarifado, as soluções citadas acima eram, a primeira, mandar confeccionar a peça com um cliente especializado em produção de peças a partir do carbetto de silício que demoraria 20 dias para ser acabada e entregue para a recolocação da bucha ou, solicitar em algum almoxarifado das plantas idênticas às de SAP pertencentes ao cliente em questão, ao redor do mundo, já que existem outras 6 plantas idênticas da companhia

Salvador

2020

em outros quatro países do mundo como, Alemanha, Bélgica, China e Tailândia, entretanto, o frete mais rápido que foi encontrado, para o envio para o Brasil demoraria 28 dias e sairia caro pois o frete era custoso e 28 dias sem produzir, assim como os 20 dias da primeira opção, não seria saudável economicamente para a empresa que teria prejuízos financeiros significativos, chegando inclusive atrapalhar fornecimentos a alguns clientes trazendo problemas logísticos também acarretando numa série de danos a corporação.

Dessa forma, ocorreram reuniões para de alguma forma pensar numa alternativa de melhor viabilidade, por coincidência, o técnico sênior da planta, semanas antes havia recebido um cliente oferecendo serviços de produção, feito de um polímero de alta performance com utilização em ascensão, o poliéter-éter-cetona (PEEK), ao lembramos dessa oferta fizemos uma pesquisa superficial para verificar se o material poderia ser empregado para confeccionar uma bucha de mancal, pois por ser um polímero resistente com módulo elástico elevado e com características aparentemente deslizante, e não reagia com o GAA, dados segundo a empresa carioca Incomplast. Foram feitas mais algumas reuniões com o time de segurança para prever qual seria o impacto na segurança e a viabilidade da implementação da peça de PEEK, já que a previsão era que todo o pro

cesso de fabricação da nova peça até a manutenção da bomba, e o retorno da planta se daria em quatro dias, devido às circunstâncias, a equipe assumiu os riscos e implementou a mudança, voltando a condições de produção em quatro dias, após o retorno da produção a bomba seguia sendo monitorada diariamente, para observar qualquer mudança no funcionamento normal do equipamento após implantação da peça. Até o presente momento, nenhuma falha foi constatada.

Salvador

2020



Figura 32. Bucha do mancal em PEEK.
Fonte: Própria

3.4.2 Aplicação do método de Ashby da seleção de materiais

O conceito original da seleção de materiais foi desenvolvido pelo engenheiro e professor M. F. Ashby. Agrupam-se todas as famílias de materiais em gráficos, cujos eixos combinam duas propriedades dos materiais, tais como dureza, resistência, densidade etc. Por diversas vezes se é necessário fazer do uso da escala logarítmica para englobar uma parte maior de materiais, que sejam aplicáveis à necessidade em questão.

Para compreender as melhores opções entre os materiais na substituição do Carbetto de Silício (antigo material utilizado na confecção da bucha de mancal), foi seguido o método de Ashby para a seleção de materiais. Neste método foram aplicadas as seguintes etapas:

i) Estabelecimento das restrições:

Com base no manual da bomba disponibilizado pelo cliente, pelas restrições ambientais e esforços solicitantes, as restrições estabelecidas para o novo material da bucha de mancal foram:

- I) Inerte em contato com o GAA;
- II) Melhor módulo de Young;
- III) Temperatura de colapso do sistema igual ou superior a 90°C;

- IV) Melhor índice de mérito;
- V) Dureza Vickers menor que a do aço Inox 616 (176,6 HV);
- VI) O material deve resistir a tensões de compressão maior ou igual a 80 Mpa;
- VII) Menor custo.

As restrições são utilizadas na determinação dos materiais mais propensos a uma certa aplicação, neste caso a fabricação de uma bucha de mancal. E junto a equação do índice de mérito auxiliam no estabelecimentos dos gráficos de Ashby.

ii) Determinação do índice de mérito

Para o desenvolvimento do índice de mérito, faz-se necessário relacionar algumas propriedades do componente. A figura 33 abaixo mostra a geometria da bucha de mancal e algumas de suas variáveis geométricas.

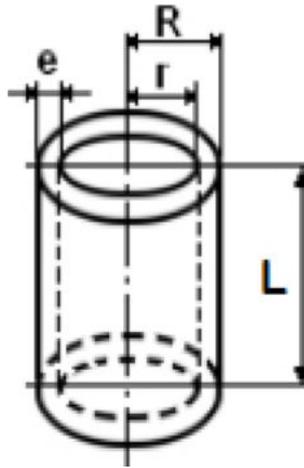


Figura 33: Desenho representativo de um componente semelhante à bucha de mancal.
Fonte: Ashby 1999.

i) A massa da bucha de mancal, por exemplo, é calculada a partir da fórmula da densidade;

$$m = \rho \times V \quad (1)$$

Salvador
2020

Como o volume do tubo vazado é:

$$V = \rho(R^2 - r^2) \times L \quad (2)$$

Substituindo a equação (1) em (2):

$$m = \rho \times \pi(R^2 - r^2) \times L \quad (3)$$

ii) Na análise funcional realizada, foi constatado que um dos principais esforços sofridos pela bucha de mancal é a compressão, sendo sua equação a base para o cálculo do índice de mérito:

$$\sigma_{\text{Compressão}} = F/A \quad (4)$$

Considerando a força F como força peso (m x g):

$$\sigma_{\text{Compressão}} = m.g / A \quad (5)$$

iii) A tensão de compressão aplicada à bucha de mancal pode ser relacionada com o módulo de elasticidade e a deformação do material:

$$\sigma_{\text{Compressão}} = m.g / A = E.\epsilon \quad (6)$$

Substituindo a massa (m) pela equação 3 e a área (A), sendo $2\pi.r.L$, tem-se:

$$\sigma_{\text{Compressão}} = \frac{\rho \times \pi(R^2 - r^2) \times L . g}{2\pi.r.L} = E.\epsilon \quad (7)$$

Simplificando a equação:

$$E.\epsilon = \frac{\rho(R^2 - r^2) . g}{2.r} \quad (8)$$

Salvador

2020

Mediante a relação encontrada na equação 8, torna-se possível a determinação do índice de mérito para uma bucha de mancal, submetida à condições de trabalho semelhantes a abordada neste trabalho.

O índice de mérito se caracteriza pela relação entre o módulo de elasticidade (E) do material e sua densidade (ρ). A partir da equação 8 a relação encontrada para o índice de mérito da bucha de mancal é:

$$\frac{E}{\rho} = \frac{(R^2 - r^2) \cdot g}{2 \cdot r \cdot \varepsilon} \quad (9)$$

.Então, o índice de mérito para a bucha de mancal é:

$$IM = \frac{E}{\rho} = \frac{(R^2 - r^2) \cdot g}{2 \cdot r \cdot \varepsilon} \quad (10)$$

3.4.2.1. Aplicando o índice de mérito no diagrama de materiais de Ashby

Com base na equação encontrada, e nas especificações do material é determinado o Índice de mérito do Carbetto de Silício.

$$IM_{SiC} = 380000 / 3070000000$$

$$IM_{SiC} = 12 \times 10^{-5}$$

De posse do valor de índice de mérito referente ao Carbetto de Silício, os pontos proporcionais são inseridos no gráfico de materiais de Ashby.

Para a plotagem dos gráficos foi utilizado o software “*Granta*” da empresa de softwares Ansys, seu uso foi disponibilizado e acompanhado por profissionais do setor de Desenvolvimento de Produtos Industriais (DPI) do Senai Cimatec.

Inicialmente são realizados *inputs* no software com as restrições desejadas, tais como material de aplicação, índice de mérito, propriedades do material, etc.

Salvador

2020

Primeiramente foi-se avaliado pelo gráfico de Ashby os materiais com base em sua resistência σ (compressão) e densidade ρ dada em Mg/m^3 .

Etapa 2: Densidade (kg/m^3), Resistência a tração (GPa)

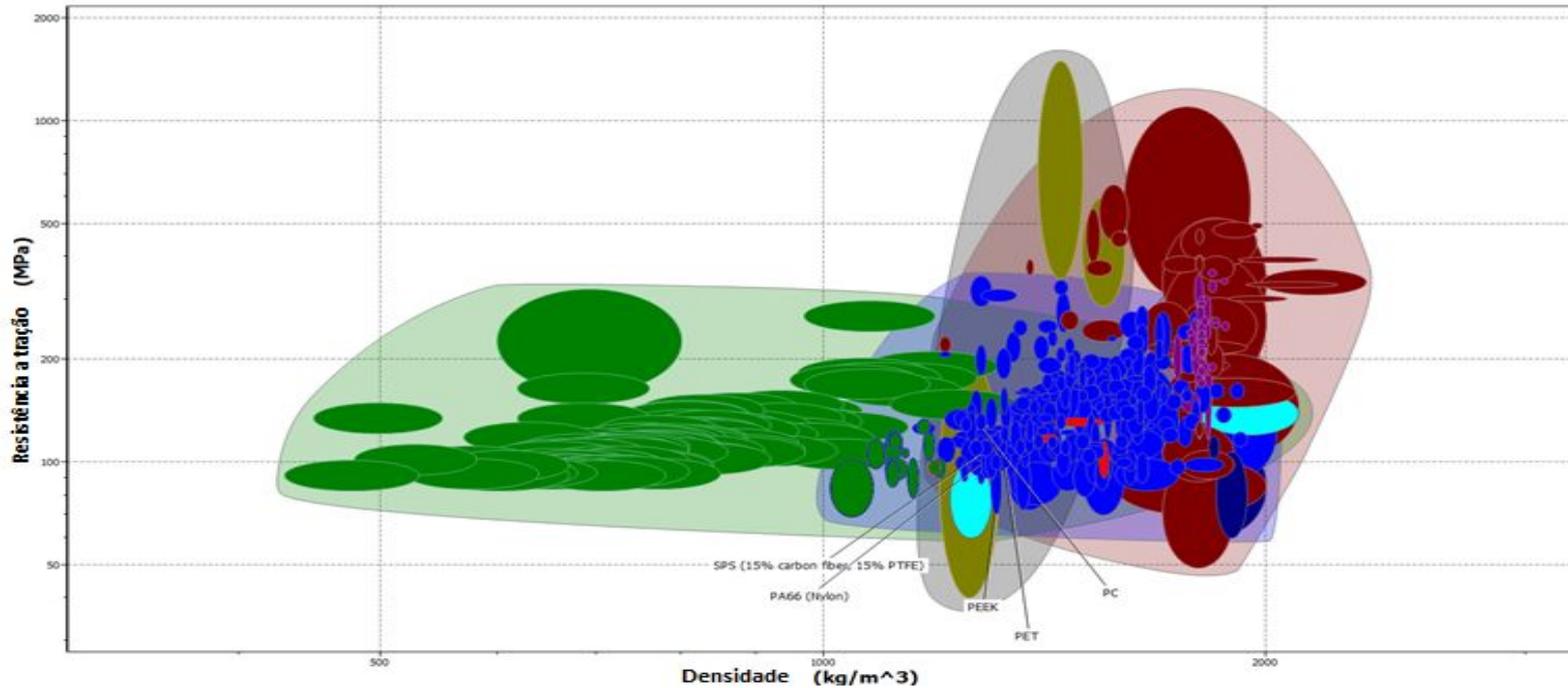


Figura 34. Modelo do gráfico de materiais de Ashby.
Fonte: Própria

A reta do é desenhada sob o gráfico para restringir o grupo de materiais passíveis de avaliação e uso na aplicação da bucha de mancal.

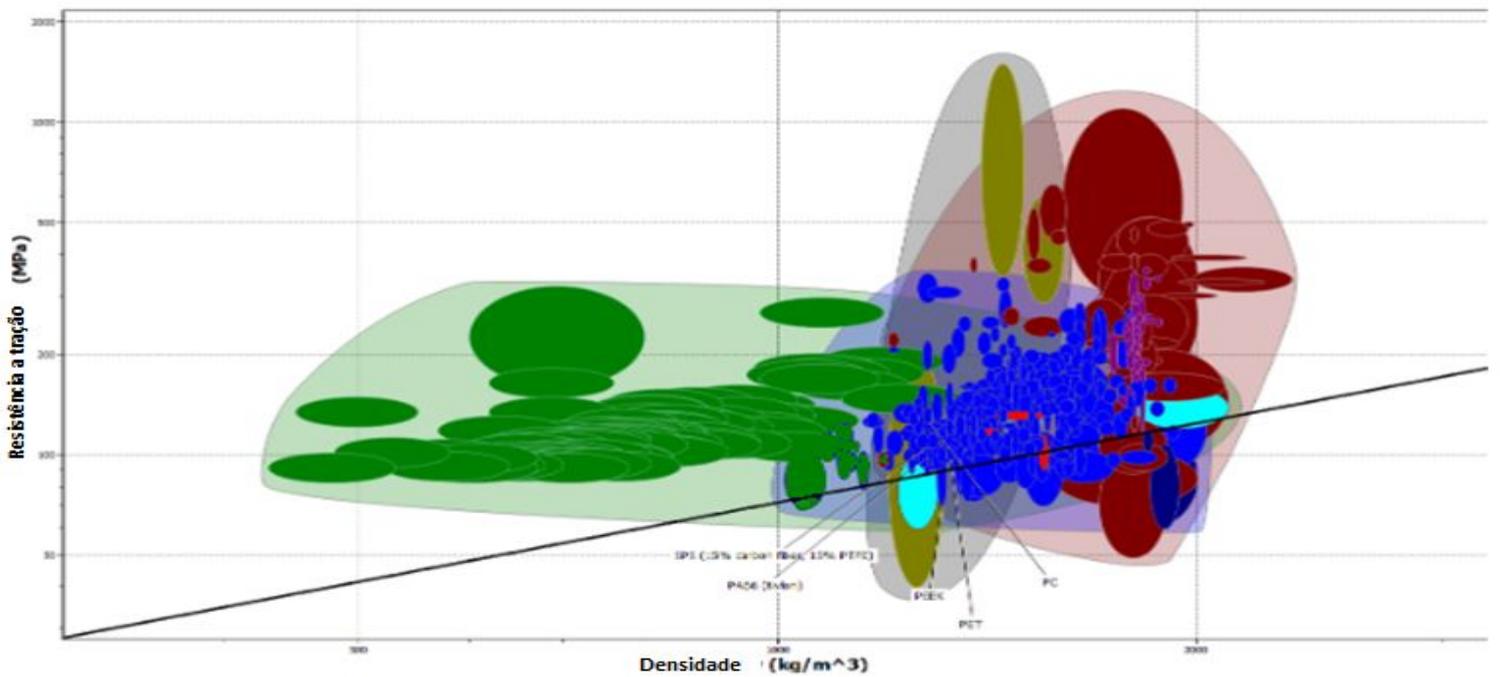


Figura 35. Gráfico de materiais de Ashby com a reta traçada do índice de mérito
 Fonte: Própria.

Se apenas for considerado o índice de mérito todos os materiais cortados pela sua linha ou acima dela são elegíveis de serem escolhidos. Mas, como é observado, acima da linha encontram-se as espumas por exemplo, que para a aplicação não teria nenhuma forma de utilização. Por conta disto, há a necessidade de se avaliar as demais restrições estabelecidas.

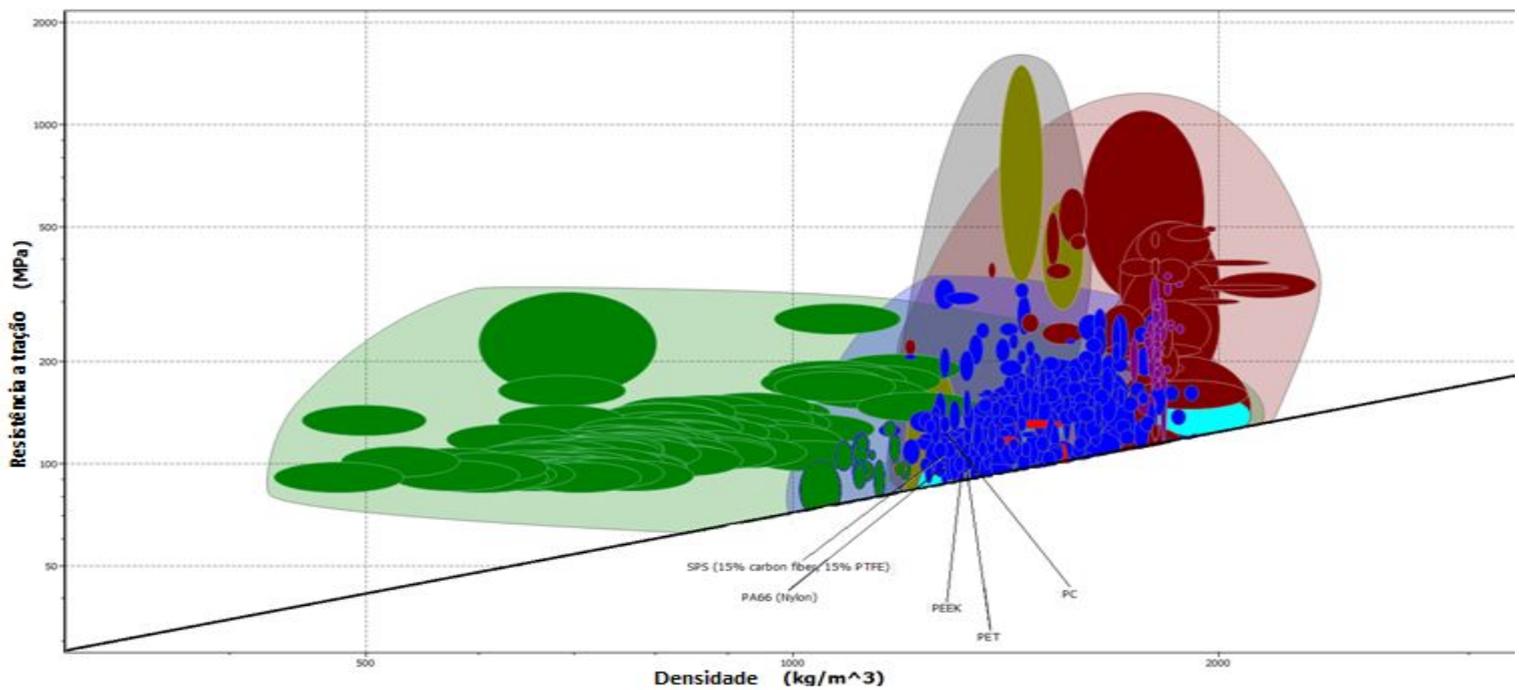


Figura 36. Materiais elegíveis para a confecção da bucha de mancal, sugeridos pelo índice de mérito.
Fonte: Própria.

Segundo ASHBY, 2004 os melhores (ou mais recomendados) materiais para a aplicação na qual foram especificadas as restrições, são os materiais mais próximos da reta de índice de mérito e do canto inferior esquerdo do gráfico.

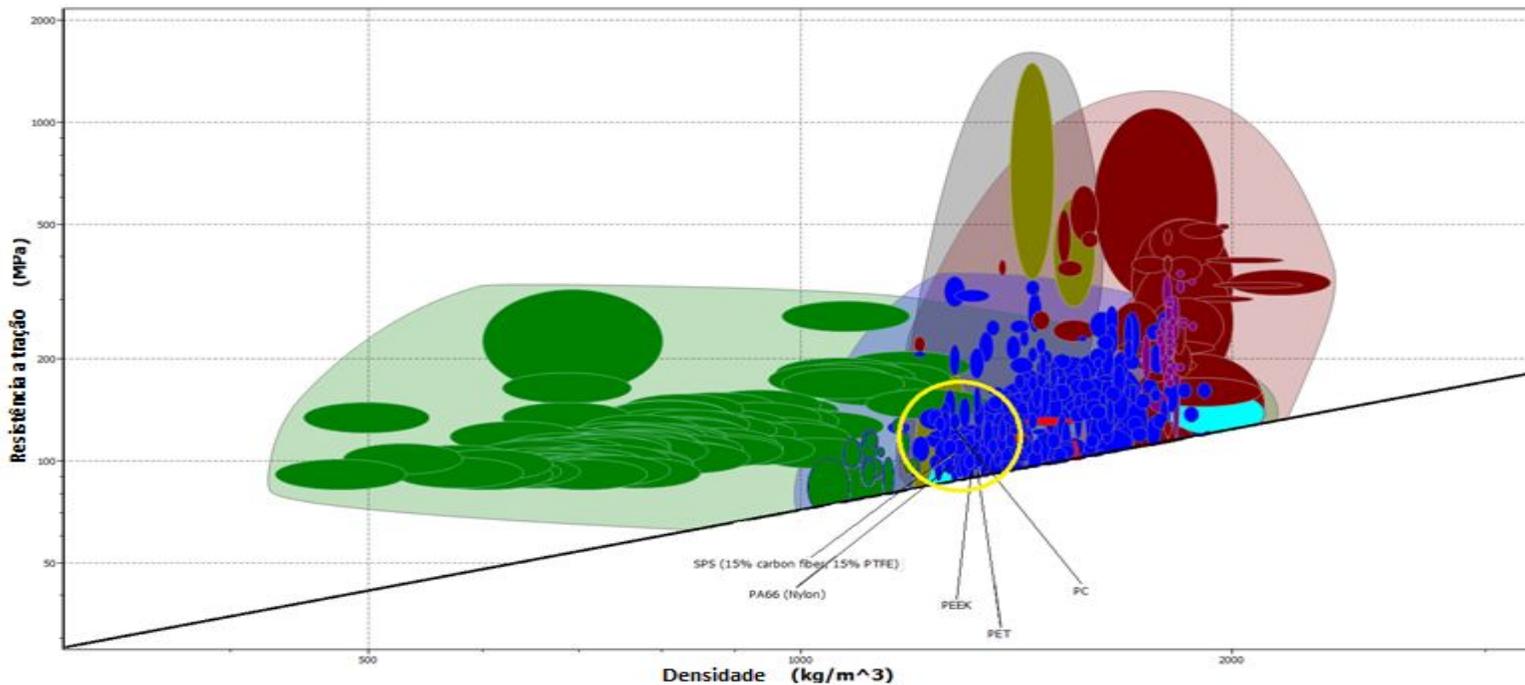


Figura 37. Materiais elegíveis para a confecção da bucha de mancal, segundo índice de mérito 2.
Fonte: Própria.

3.4.2.2. Aplicando as demais restrições nos gráficos de Ashby para polímeros

Percebe-se nos gráficos acima que o grupo de materiais mais recomendado para a substituição do Carbetto de Silício na confecção da bucha de mancal é o grupo dos materiais poliméricos. Com base nessa informação os gráficos a seguir são restritos apenas à essa classe de materiais, para a obtenção de uma análise mais detalhada e aprofundada, conferindo solidez à escolha do material de substituição.

Depois do gráfico do índice de mérito, foi plotado o gráfico de Ashby comparando o módulo de Young e a temperatura máxima de serviço dos materiais.

Etapa 6: Máxima temperatura de serviço, Modulo de Young (GPa)

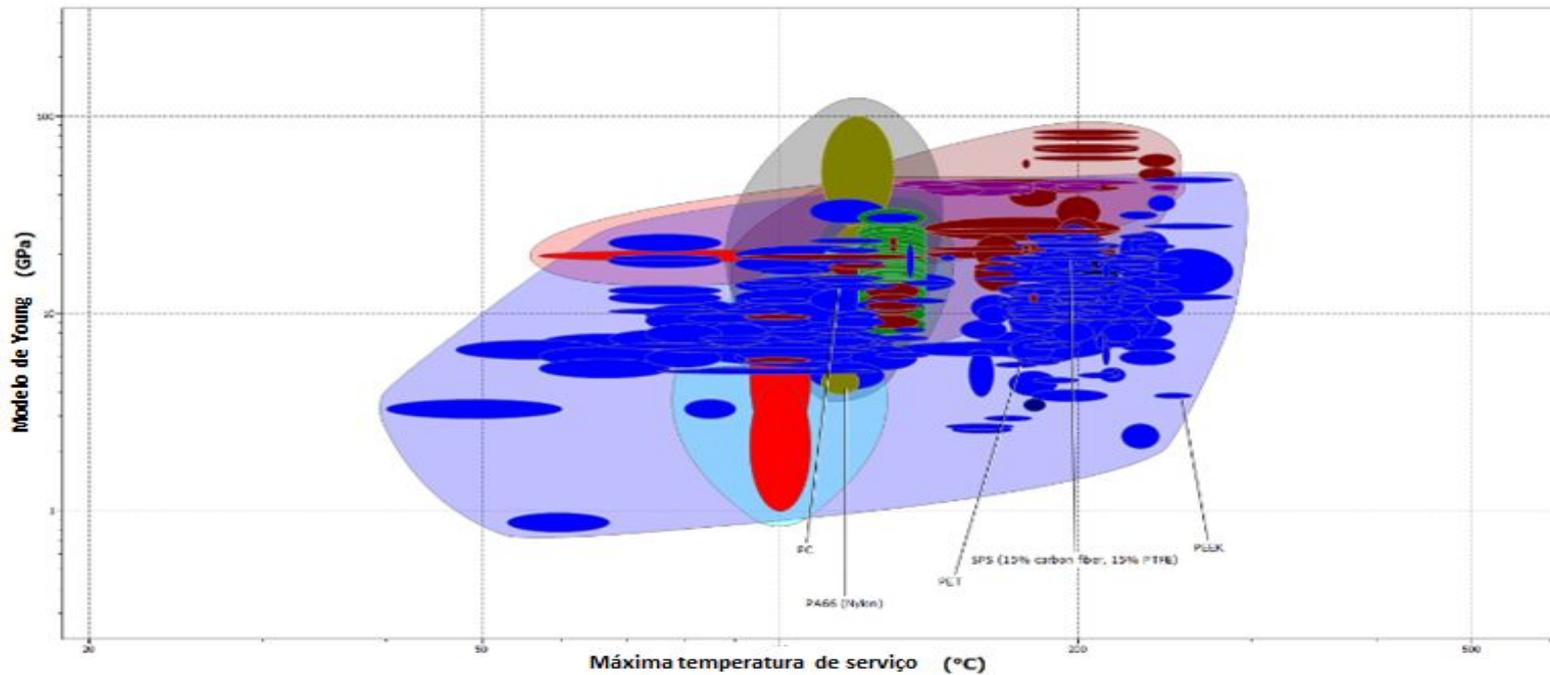


Figura 38. Gráfico de ashby relacionando máxima temperatura de serviço com o módulo de Young dos materiais poliméricos.
Fonte: Própria.

Dentre os materiais previamente selecionados pelo gráfico de índice de mérito, observa-se que todos atendem a restrição máxima temperatura de serviço (90°C), porém o Policarbonato e o SPS foram os materiais que apresentaram maior módulo de Young.

Juntamente com a máxima temperatura de serviço, a dureza Vickers (HV) dos materiais foi plotada em um novo gráfico de Ashby, para observar se os materiais pré-selecionados atendem ao quesito estabelecido nas restrições de serem mais dúcteis que o Aço Inox 616 (material da luva). Esta restrição foi estabelecida, pois a bucha deve, preferencialmente sofrer desgaste em detrimento da conservação da

luva, por isso o material ideal para a bucha de mancal deve possuir maior ductilidade que o Aço Inox em questão.

Etapa 8: Dureza – Vickers (HV), Máxima temperatura de serviço

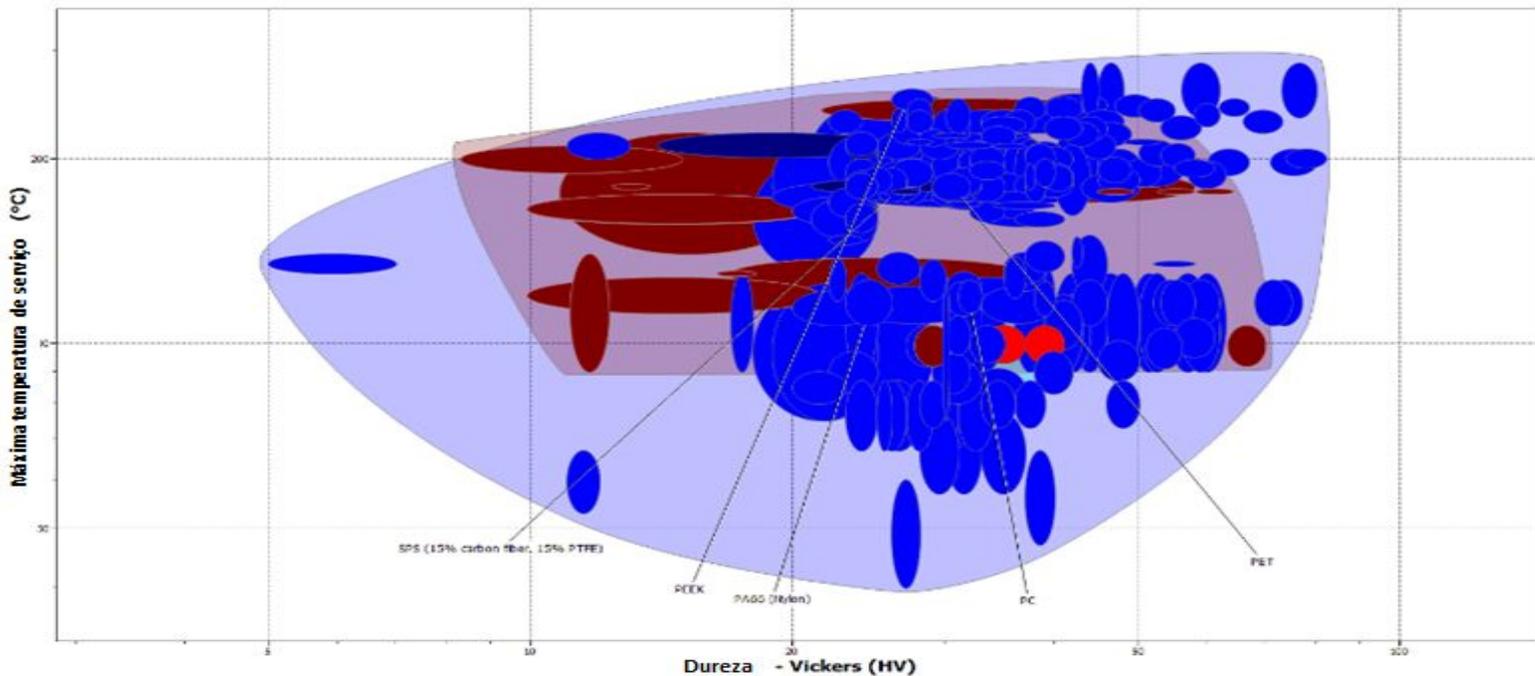


Figura 39. Gráfico de ashby relacionando máxima temperatura de serviço com a dureza Vickers dos materiais poliméricos
Fonte: Própria.

Pelo gráfico é possível observar que todos os materiais previamente selecionados atendem ao quesito dureza inferior ao do Aço Inox 616. Porém, o Policarbonato apresenta maiores valores de dureza, fazendo com que este tenha uma tendência maior à resistir ao desgaste quando comparado aos outros materiais analisados.

Outro quesito importante na seleção de materiais e para qualquer projeto na indústria é o custo, incessantemente buscamos alternativas que apresentem maior custo benefício. Desta forma, foi plotado o gráfico de Ashby a fim de comparar o módulo de Young com o custo relativo dos materiais (polímeros).

No gráfico abaixo, é possível visualizar os materiais previamente selecionados em destaque.

Etapa 4:

Modulo de Young (Gpa), Preco (BRL/kg)

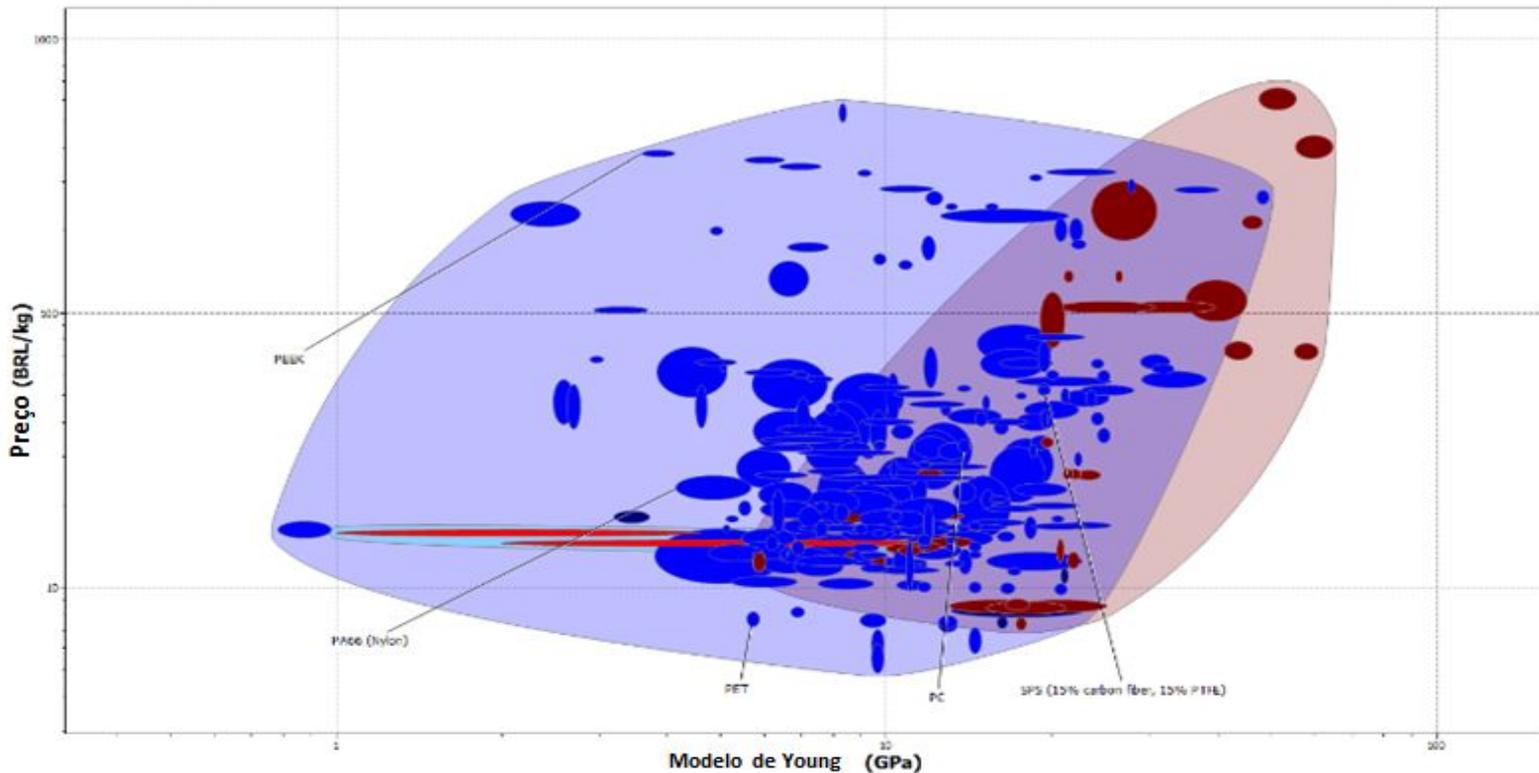


Figura 40 Gráfico de ashby relacionando custo dos materiais poliméricos com os respectivos módulos de Young.

Fonte: Própria.

Nota-se que o PEEK é o material com o menor valor para o módulo de Young e com o maior custo dentre os materiais analisados, isto faz com que este tenha o menor custo benefício, quando comparado aos materiais que atendem à todos os pré-requisitos estabelecidos.

O PET apresentou melhor custo, porém os valores de módulo de Young relativamente baixo faz com que sua escolha não seja a mais indicada para a confecção da bucha de mancal.

Salvador

2020

Com base nas restrições estabelecidas Policarbonato (PC) e o SPS se mostraram como as melhores opções para a confecção da bucha de mancal.

Entretanto, o Policarbonato (PC) apresentou melhor custo, o que o torna o material com o melhor custo benefício para esta aplicação. As demais características e propriedades dos materiais avaliados podem ser conferidas no Anexo 1.

3.4.2.3 Informações sobre o PEEK utilizado pelo cliente

Um dos polímeros com maior desempenho nas aplicações industriais, o Polieterecetonona, mais conhecido como PEEK, possui tecnologia para ser aplicado na forma de pequenas ou grandes peças, sujeitas à condições severas de serviço. Os ramos industriais em que o PEEK pode ser aplicado passa pelos setores automotivos, petroquímico, químico, elétrico, transformação de plástico, entre outros.

Algumas características físicas e químicas garantem ao PEEK uma ótima performance, tais como:

- Excelentes propriedades mecânicas e dureza;
- Excelente resistência química;
- Resistência superior ao desgaste e propriedades de deslizamento;
- Ótima estabilidade dimensional;
- Grande resistência à radiação;
- Alta pureza e baixa emissão de gases;
- Excelente resistência à vibração.

O PEEK pode ser encontrado em diversas composições, e a partir destas, o PEEK é classificado, podendo ser de altíssima fluidez (não reforçado), alta fluidez e fluidez padrão. Em alguns casos, pode ser reforçados com fibras de vidro ou carbono e alguns aditivados para uma melhora na sua resistência à abrasão.

3.4.2.4 Informações sobre o Policarbonato (PC)

O policarbonato é um dos materiais mais utilizados pelos profissionais que atuam na indústria e nos setores de construção. Seu uso pode ser visto massivamente em construções de residências e prédios, em equipamentos medicinais e para a confecção de dispositivos de máquinas nos diversos segmentos da indústria.

Dois dos grandes diferenciais do policarbonato são a sua resistência e durabilidade, de forma que é possível diminuir bruscamente gastos envolvidos na manutenção de dispositivos feitos a partir dele. Além das características a pouco listadas, o policarbonato, assim como o PEEK é um termoplástico de altíssima segurança e qualidade, pois trata-se de um polímero extingüível, ou seja, ele não propaga chamas.

Mesmo o Policarbonato sendo aproximadamente 20 vezes mais resistente que o PMMA, isso não o faz com que ele tenha peso elevado, em alguns casos, ele chega a ser 30% mais leve que outros materiais, como o próprio PMMA.. No que diz respeito às temperaturas, os dispositivos feitos de policarbonato demonstram resistência considerável, preservando suas condições estruturais entre -30°C e 120°C.

Por se tratar de um material que pode ser curvado a frio, possibilita uma aplicação rápida e simples, atendendo de forma fácil os objetivos em relação à finalização e ao acabamento.

Desta forma, trata-se de um material que pode ser utilizado nos ambientes mais variados possíveis nas mais variadas condições.

4. CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise aprofundada e detalhada, de uma decisão tomada por um time de engenharia e técnicos, sob condições de extrema pressão contra o tempo, em um cenário de sérias consequências como a parada de uma planta industrial. Uma melhor apuração dos resultados, e embasamento teórico sobre as medidas tomadas, fundamentam decisões que assim como neste caso foram tomadas diante de um cenário crítico com pouco embasamento teórico e deram certo.

A análise em questão fundamentou e corroborou a solução proposta na fábrica e através da utilização do método de seleção de materiais, comprovam que o projeto foi eficaz e a utilização do PEEK como material de base para a bucha de mancal foi assertiva, porém o Policarbonato apresentou características mais interessantes quando comparado ao PEEK, principalmente no custo relativo, módulo de elasticidade e em sua excelente usinabilidade.

Com embasamento e fundamentação nas análises realizadas, a partir da seleção de materiais de Ashby, foi constatado a possibilidade da utilização do Policarbonato, que se adequa melhor que o PEEK aos quesitos requeridos para a confecção do dispositivo em questão.

Salvador

2020

5. SUGESTÕES

Diante das experiências vividas durante a execução do projeto, foi observada a necessidade da criação de um departamento de análise de falhas e ensaio em materiais para auxiliar nos processos de melhoria da empresa. Principalmente por possuir em seu quadro uma gama de equipamentos dinâmicos e críticos que podem causar a parada produtiva da planta.

Por questões de urgência do cliente, o PEEK foi o material utilizado para a confecção da bucha de mancal. Porém com base na análise realizada, caso ocorra uma nova necessidade de confecção, recomenda-se a utilização do Policarbonato como material em detrimento das suas características e baixo custo relativo, quando comparado ao PEEK.

6. REFERÊNCIAS

1. Ashby, M., Shercliff, H., & Cebon, D. Materials: Engineering, science, processing and design (2ª ed.). Butterworth--Heinemann. Edição norte-americana, 2010.
2. Callister, W. D. Materials science and engineering: An introduction (8ª ed.). John Wiley & Sons, 2010. Um texto maduro que adota a abordagem baseada na ciência para a apresentação do ensino de materiais.
3. MATTOS, E. E.; DE FALCO, R. Bombas Industriais. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
4. MECÂNICA INDUSTRIAL. O que são Bombas de Acoplamento Magnético. Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/80-o-que-sao-bombas-de-acionamento-magnetico/>>. Acesso em: 20 Dezembro 2019.
5. KECECIOGLU, D. Reliability Engineering Handbook. 1. ed. [S.l.]: Lancaster Destech Publications, v. 1, 2002.
6. RED-HILL, R. E.; ABBASCHIAN, R.L The hardening of steel. In: . Physical Metallurgy Principles. 3ed. Boston: PWS Puablisshing Company, 1994. cap.19, p.632-687.
7. PETZOW G. Metallographic Etching, Techniques for Metallography. 2ª Ec. ASM. Estados Unidos da América. 1999.
8. CYRINO, L. Análise de Falhas, Máquinas e Equipamentos. Manutenção em Foco.

Salvador

2020

Disponível em: <<https://www.manutencaoemfoco.com.br/analise-de-falhas/>>. Acesso em: 06 Janeiro 2020.

9. FOGLIATO, F. S.; RIBEIRO, J.L.D. Confiabilidade e Manutenção Industrial. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.
10. ECKERT, C. Slow Down and Think Casually to Solve Pump Problems, Avoid Repeat Failures and Lost Production or Profits by Using a Structures Approach to Problem Solving, Setembro 2010.
11. GANO, D. L. Seven Steps To Effective Problem Solving and Strategies for Personal Success. 1. ed. [S.I.]: Kennewick Apollonian Publications, 2011.
12. MATTOS, E. E.; DE FALCO, R. Bombas Industriais. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.
13. RAO, S. S. Mechanical Vibrations. 5. ed. Nova Jersey: Pearson, 2011.
14. KARASSIK, I J ET AL. Pump Handbook. 3. ed. Nova York: McGraw Hill, 2001.
15. RZR BOMBAS POSITIVAS. Como Decidir Entre uma Bomba Centrífuga e uma Bomba de Deslocamento Positivo. Disponível em: <<https://www.rzrbombas.com.br/suporte/entenda-diferenca-entre-uma-bombacentrifuga-e-uma-bomba-de-deslocamento-positivo/>>. Acesso em: 28 Novembro 2019.
16. Brockinton et al., 1986; Alba, 1999.
17. GHILARDUCCI, David P.; TJEERDEMA, Ronald S., 1995.

18. RAO, S. S. Mechanical Vibrations. 5. ed. Nova Jersey: Pearson, 2011.
19. Polyfast Polímeros. Disponível em <<http://www.polyfast.com.br/produtos-peek/>>. Acesso em: 08 de Fevereiro 2020.
20. Policarbonato é a opção com o melhor custo-benefício do mercado. Disponível em <<https://www.terra.com.br/noticias/dino/policarbonato-e-a-opcao-com-o-melhor-custo-beneficio-do-mercado,4393ec3f49af49906b977497905f9c551pgimg2h.html>>. Acesso em: 08 de Fevereiro 2020.
21. Robert L. Norton. Projetos de Máquinas , uma abordagem integrada 4. ed.
22. Bento, R. T, Ferrus Filho, A. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTÁTICO DE MANCAIS HIDRODINÂMICOS PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS, 23º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 04 a 08 de Novembro de 2018, Foz do Iguaçu, PR, Brasil., Setembro 2010.
22. JUVINALL, Robert – Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas, LTC;
23. HAMROCK, Bernard J. – Elementos de Máquinas – McGraw-Hill;
23. SHIGLEY, MISCHKE e BUDYNAS – Projeto de Engenharia Mecânica, editora Bookman;
24. NIEMANN – Elementos de Máquinas – LTC.

ANEXO I

4. Comparison table

	PEEK	PET	Polycarbonato (PC)	PA66 (Nylon)	SPS (15% PTFE)
Price					
Price (BRL/kg)	383	7.29 - 8.14	31.1 - 34.8	21.1 - 25.5	50.5 - 54.4
Price per unit volume (BRL/m ³)	498000 - 505000	9610 - 10900	39400 - 44800	25900 - 34200	64400 - 71000
Physical properties					
Density (kg/m ³)	1300 - 1320	1320 - 1340	1270 - 1290	1230 - 1340	1280 - 1300
Mechanical properties					
Young's modulus (GPa)	3.76 - 3.95	5.57 - 5.85	13.5 - 14.1	4.14 - 5.64	18.8 - 19.8
Specific stiffness (MN.m/kg)	2.87 - 3.02	4.18 - 4.4	10.5 - 11	3.21 - 4.41	14.6 - 15.4
Yield strength (elastic limit) (MPa)	87 - 95	76.8 - 84.8	99.2 - 110	77.3 - 90.1	103 - 113
Tensile strength (MPa)	70.3 - 103	96 - 106	124 - 138	93.1 - 107	105 - 116
Specific strength (kN.m/kg)	66.4 - 72.6	57.7 - 63.8	77.5 - 86.3	59.6 - 70.9	79.8 - 87.7
Elongation (% strain)	30 - 150	1.86 - 2.15	1.86 - 2.15	2.5 - 4.2	0.647 - 0.752
Elongation at yield (% strain)				2.5 - 3.5	
Compressive modulus (GPa)	3.76 - 3.95	5.57 - 5.85	13.5 - 14.1	2.83 - 2.97	18.8 - 19.8
Compressive strength (MPa)	118 - 130	92.2 - 102	121 - 134	86.2 - 100	101 - 111
Flexural modulus (GPa)	3.76 - 3.95	5.57 - 5.85	10.3 - 12.4	4.14 - 5.3	19.3 - 19.8
Flexural strength (modulus of rupture) (MPa)	105 - 116	131 - 145	186 - 193	131 - 165	147 - 162
Shear modulus (GPa)	1.36 - 1.43	2.03 - 2.13	5.03 - 5.25	1.72 - 1.81	7.08 - 7.45
Shear strength (MPa)				55.4 - 64.7	
Bulk modulus (GPa)	5.48 - 5.75	7.33 - 7.7	14.2 - 14.9	4.71 - 4.95	18.1 - 19.3
Poisson's ratio	0.39 - 0.41	0.366 - 0.381	0.335 - 0.349	0.364 - 0.379	0.327 - 0.329
Shape factor	4.9	6.5	9.9	5.8	12.1
Hardness - Vickers (HV)	26 - 29	23 - 25	30 - 33	23 - 26	25 - 28
Hardness - Rockwell M	95 - 105		80 - 88		98 - 104
Hardness - Rockwell R	119 - 131	115 - 127	112 - 124	119	110 - 134
Hardness - Shore D				83 - 91	
Elastic stored energy (springs) (kJ/m ³)	981 - 1170	516 - 630	357 - 441	585 - 887	275 - 331
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles (MPa)	28.1 - 41.2	35.4 - 46.1	46 - 59.7	32.1 - 37.4	41.9 - 46.3
Impact & fracture properties					
Fracture toughness (MPa.m ^{0.5})	2.73 - 4.3	3.62 - 4.52	4.29 - 5.33	4.69 - 5.67	1.45 - 1.56
Toughness (G) (kJ/m ²)	2.02 - 4.6	2.32 - 3.54	1.35 - 2.04	4.36 - 6.93	0.108 - 0.126
Ductility index (µm)	0.19 - 0.24	0.17 - 0.21	0.18 - 0.22	0.159 - 0.192	0.13 - 0.16
Impact strength, notched 23 °C	5.91 - 7.15	4.86 - 5.36	6.67 - 7.35	4 - 5.9	4.94 - 5.46

ANEXO I

(kJ/m ²)					
Impact strength, notched -30 °C (kJ/m ²)	5.91 - 7.15	3.64 - 4.4		4.37 - 5.29	
Impact strength, unnotched 23 °C (kJ/m ²)	590 - 600	30.2 - 36.6	28.6 - 31.5	28 - 48.2	
Impact strength, unnotched -30 °C (kJ/m ²)	590 - 600	21.4 - 25.9			
Thermal properties					
Melting point (°C)	322 - 346	246 - 266		237 - 277	240 - 260
Glass temperature (°C)	143 - 157	60 - 84	142 - 158	54 - 66	93 - 107
Heat deflection temperature 0.45MPa (°C)	164 - 208	216 - 266	129 - 170	238 - 260	205 - 253
Heat deflection temperature 1.8MPa (°C)	139 - 182	182 - 228	143 - 146	224 - 246	180 - 228
Vicat softening point (°C)				245	
Maximum service temperature (°C)	239 - 260	173 - 191	111 - 126	107 - 127	171 - 218
Minimum service temperature (°C)	-70 - -50	-58 - -38	-47 - -37	-81 - -71	-120 - -73
Thermal conductivity (W/m.°C)	0.24 - 0.26	0.368 - 0.383	0.51 - 0.531	0.35	1.49 - 1.51
Specific heat capacity (J/kg.°C)	1340	1430 - 1490	1470 - 1530	1510 - 1570	1480 - 1500
Thermal expansion coefficient (µstrain/°C)	50 - 60	34 - 76	31.7 - 33.1	44.2 - 74.9	17.7 - 18.6
Thermal shock resistance (°C)	389 - 477	186 - 417	220 - 249	222 - 406	291 - 327
Thermal distortion resistance (MW/m)	0.00413 - 0.00503	0.00494 - 0.011	0.0156 - 0.0165	0.00467 - 0.00792	0.0805 - 0.0848
Electrical properties					
Electrical resistivity (µohm.cm)	3.3e21 - 3e22	3.3e20 - 3e21	1e7 - 1e8	1e20	1e6 - 1e8
Electrical conductivity (%IACS)	5.75e-21 - 5.22e-20	5.75e-20 - 5.22e-19	0.00000172 - 0.0000172	1.72e-18	0.00000172 - 0.000172
Dielectric constant (relative permittivity)	3.1 - 3.3	3.8 - 4		3.7	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	0.0015 - 0.0017	0.003 - 0.007		0.018	
Dielectric strength (dielectric breakdown) (MV/m)	16.7 - 20	18 - 19.4		20	
Comparative tracking index (V)	175 - 225	200 - 325		450 - 550	
Galvanic potential (V)			0.14 - 0.22		0.14 - 0.22
Magnetic properties					
Magnetic type	Non-magnetic	Non-magnetic	Non-magnetic	Non-magnetic	Non-magnetic
Optical, aesthetic and acoustic properties					
Transparency	Opaque	Opaque	Opaque	Opaque	Opaque
Softness to touch	30.7 - 31.7	28.9 - 29.6	21.6 - 22.2	29 - 31.7	20.7 - 21.4
Warmth to touch	148 - 154	116 - 119	98.8 - 102	117 - 123	58.6 - 59.4

ANEXO I

Acoustic velocity (m/s)	1690 - 1740	2050 - 2100	3250 - 3320	1790 - 2110	3820 - 3920
Mechanical loss coefficient (tan delta)	0.0101 - 0.0106	0.0116 - 0.012	0.00627 - 0.00647	0.0105 - 0.0138	0.00202 - 0.00213
Healthcare & food					
Food contact	Yes	No	No	No	No
Restricted substances risk indicators					
RoHS (EU) compliant grades?	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
REACH Candidate List indicator (0-1, 1 = high risk)	0	0.02	0.02	0.02	0.02
SIN List indicator (0-1, 1 = high risk)	0	0.03	0.02	0.02	0.02
Absorption & permeability					
Water absorption @ 24 hrs (%)	0.1 - 0.14	0.0636 - 0.077	0.182 - 0.22	0.64 - 0.9	0.001 - 0.01
Water absorption @ sat (%)				4 - 4.7	
Humidity absorption @ sat (%)				0.97	
Permeability (O2) (cm ³ .mm/m ² .day.atm)	6.54 - 11.3				
Permeability (CO2) (cm ³ .mm/m ² .day.atm)	27.7 - 41.6				
Processing properties					
Polymer injection molding	Limited use	Acceptable	Limited use	Limited use	Limited use
Polymer extrusion	Acceptable	Limited use	Limited use	Limited use	Unsuitable
Polymer thermoforming	Limited use	Acceptable	Acceptable	Limited use	Unsuitable
Linear mold shrinkage (%)	1 - 1.21	0.1 - 0.4	0.11 - 0.91	0.5 - 1.4	0.0975 - 0.102
Melt temperature (°C)	349 - 399	226 - 299	260 - 343	275 - 304	271 - 327
Mold temperature (°C)	120 - 160	110 - 135	100 - 120	65.6 - 110	
Molding pressure range (MPa)	68.8 - 138	55 - 124	68.8 - 206	68.9 - 138	69 - 103
Durability					
Water (fresh)	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent
Water (salt)	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent
Weak acids	Excellent	Acceptable	Excellent	Unacceptable	Acceptable
Strong acids	Unacceptable	Unacceptable	Excellent	Unacceptable	Limited use
Weak alkalis	Excellent	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable
Strong alkalis	Excellent	Limited use	Unacceptable	Acceptable	Limited use
Organic solvents	Excellent	Limited use	Limited use	Excellent	Limited use
Chem. resistance index (0=worst, 1=best)	0.76	0.71	0.52	0.63	
Env. stress crack index (0=worst, 1=best)	0.65	0.73	0.49	0.58	
Oxidation at 500C	Unacceptable	Unacceptable	Unacceptable	Unacceptable	Unacceptable
UV radiation (sunlight)	Excellent	Fair	Fair	Poor	Fair

ANEXO I

Flammability	Self-extinguishing	Highly flammable	Slow-burning	Slow-burning	Highly flammable
Flammability - typical UL 94 rating	V-0	HB	HB	HB	HB
Oxygen index (%)	34 - 36	19 - 21	24 - 26	21 - 23	17 - 19
Primary production energy, CO2 and water					
Embodied energy, primary production (MJ/kg)	286 - 315	75.7 - 83.5	268 - 295	132 - 146	218 - 240
CO2 footprint, primary production (kg/kg)	15.9 - 17.5	2.72 - 3	17 - 18.7	5.86 - 6.46	13.1 - 14.4
Water usage (l/kg)	534 - 1600	150 - 165	527 - 583	659 - 727	464 - 513
Processing energy, CO2 footprint & water					
Polymer extrusion energy (MJ/kg)	6.06 - 6.69	5.89 - 6.51	5.98 - 6.61	5.92 - 6.53	5.98 - 6.61
Polymer extrusion CO2 (kg/kg)	0.454 - 0.502	0.442 - 0.488	0.449 - 0.496	0.444 - 0.49	0.448 - 0.495
Polymer extrusion water (l/kg)	4.92 - 7.39	4.86 - 7.28	4.89 - 7.34	5.06 - 7.29	4.89 - 7.34
Polymer molding energy (MJ/kg)	25.3 - 27.9	20.6 - 22.8	23.2 - 25.6	21.1 - 23.3	23 - 25.4
Polymer molding CO2 (kg/kg)	1.9 - 2.09	1.54 - 1.71	1.74 - 1.92	1.58 - 1.75	1.73 - 1.91
Polymer molding water (l/kg)	15.3 - 23	13.4 - 20.1	14.5 - 21.7	14.1 - 20.4	14.4 - 21.6
Coarse machining energy (per unit wt removed) (MJ/kg)	1.37 - 1.52	1.17 - 1.29	1.42 - 1.57	1.16 - 1.28	1.25 - 1.39
Coarse machining CO2 (per unit wt removed) (kg/kg)	0.103 - 0.114	0.0876 - 0.0968	0.107 - 0.118	0.087 - 0.096	0.0941 - 0.104
Fine machining energy (per unit wt removed) (MJ/kg)	9.46 - 10.5	7.4 - 8.18	9.93 - 11	7.36 - 8.1	8.27 - 9.14
Fine machining CO2 (per unit wt removed) (kg/kg)	0.709 - 0.784	0.555 - 0.614	0.744 - 0.823	0.552 - 0.608	0.62 - 0.686
Grinding energy (per unit wt removed) (MJ/kg)	18.4 - 20.4	14.3 - 15.8	19.4 - 21.4	14.3 - 15.7	16.1 - 17.8
Grinding CO2 (per unit wt removed) (kg/kg)	1.38 - 1.53	1.07 - 1.19	1.45 - 1.61	1.07 - 1.18	1.21 - 1.33
Recycling and end of life					
Recycle	Yes	No	No	No	No
Embodied energy, recycling (MJ/kg)	96.9 - 107				
CO2 footprint, recycling (kg/kg)	5.39 - 5.96				
Recycle fraction in current supply (%)	1.34 - 1.48	0.1	0.1	0.1	0.1
Downcycle	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Combust for energy recovery	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Heat of combustion (net) (MJ/kg)	30.5 - 32	19.6 - 20.5	30.6 - 32.2	23.3 - 24.5	38.9 - 40.8
Combustion CO2 (kg/kg)	2.83 - 2.97	1.9 - 2	2.88 - 3.02	1.77 - 1.86	3.34 - 3.51
Landfill	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Biodegrade	No	No	No	No	No
Geo-economic data for principal component					

ANEXO I

Principal component		PET		Nylon	
Annual world production, principal component (tonne/yr)		1.88e7		2.69e6	
Reserves, principal component (tonne)		1.23e8 - 1.35e8		8.74e7 - 9.66e7	
Links					
ProcessUniverse	60	59	64	63	59
Producers	15	26	22	52	3
Reference	11	10	11	11	12
Shape	24	24	24	24	24
Full Datasheet					