

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

**SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA ROTOR DE BOMBA DE
COMBUSTÍVEL**

LAURA FERREIRA RÓS CARPANEZ

SÃO CARLOS - SP
2024

SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA ROTOR DE BOMBA DE COMBUSTÍVEL

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

Orientador: Prof. Dr. Lucas Henrique Staffa

São Carlos-SP
2024



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

NOME: Laura Ferreira Ros Carpanez

RA: 744399

TÍTULO: Seleção de materiais para rotor de bomba de combustível

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Lucas Henrique Staffa

CO-ORIENTADOR(A):

DATA/HORÁRIO: 10/01/2024, 10h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Lucas Henrique Staffa	10,0	10,0
Prof. Dr. Juliano Marini	10,0	10,0
Média	10,0	10,0

BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Lucas Henrique Staffa

Documento assinado digitalmente
gov.br LUCAS HENRIQUE STAFFA
Data: 10/01/2024 11:27:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Juliano Marini

Documento assinado digitalmente
gov.br JULIANO MARINI
Data: 10/01/2024 12:26:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTO

Agradeço sinceramente a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão da minha graduação. Primeiramente, aos meus colegas de graduação e amigos, obrigada por tornarem os anos de estudo mais leves e especiais e fazerem de São Carlos uma segunda casa.

Ao meu orientador, agradeço por me aconselhar e me apoiar nesse projeto. À Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) por proporcionar um ambiente de aprendizado acadêmico e profissional.

Por fim, quero expressar minha profunda gratidão à minha mãe, que sempre me incentivou a sonhar alto e não ter medo de nada. Sem a sua dedicação, eu não estaria aqui hoje. Todas as minhas conquistas são suas.

A todos vocês, meu mais profundo agradecimento. Este trabalho e minha graduação não teriam sido possíveis sem seu o apoio e amizade.

RESUMO

Este trabalho se concentra na metodologia de seleção de materiais para aplicação em rotores de bombas de combustível, utilizando a abordagem do Método de Ashby para buscar alternativas ao poli(sulfeto de fenileno) (PPS) com 32,5% de fibra de vidro e 32,5% de carga mineral, um composto amplamente empregado na indústria para essa aplicação. O intuito é superar os desafios associados ao processamento e aplicação desse material, sem comprometer suas propriedades químicas e físicas essenciais. A etapa crítica de injeção utilizando moldes complexos torna-se especialmente desafiadora devido à alta carga mineral, propensa à retenção no molde, resultando em carbonização e prejudicando a eficiência do processo. Esse comprometimento do molde acarreta em extenso retrabalho, invalidando a eficácia da modelagem por injeção e impactando negativamente a fabricação dos rotores. Outro desafio crucial é o inchamento do material causado pela absorção de combustível pela matriz polimérica, sendo particularmente crítico para os rotores, já que mesmo um leve inchamento pode resultar em bloqueios e falhas operacionais sérias. Diante desses desafios, o estudo, além de uma revisão científica substancial, recorre ao software Ansys Granta EduPack para identificar materiais com potencial de superar essas dificuldades, simplificando a tomada de decisões. O objetivo é selecionar um material alternativo para os rotores, mantendo funcionalidade e reduzindo a carga em comparação com o composto de PPS utilizado, enquanto facilita o processamento. Este estudo não apenas propõe soluções alternativas, mas também aborda de maneira direta os desafios específicos relacionados à manufatura deste produto, impulsionando o desenvolvimento de estratégias mais eficazes e sustentáveis na seleção de materiais para a indústria automotiva. Nesse contexto, os resultados da pesquisa revelam que a resina de fenol-formaldeído (PF), reforçada com 45% de fibra de vidro de alta resistência, destaca-se como a opção viável para os desafios apresentados. Além de manter, aprimora o desempenho mecânico, ao mesmo tempo que reduz os custos de produção.

Palavras-chave: Seleção de Materiais. Bomba de Combustível. Rotor. Polímeros. PPS. Critérios de Seleção.

ABSTRACT

This work focuses on the materials selection methodology for application in fuel pump rotors, utilizing the Ashby Methodology to explore alternatives to Polyphenylene Sulfide (PPS) with 32.5% fiberglass and 32.5% mineral filler, a compound widely used in the industry for this application. The goal is to overcome challenges associated with the processing and application of this material without compromising its essential chemical and physical properties. The critical injection stage uses complex molds, becoming particularly challenging due to the high mineral filler content, prone to mold retention, resulting in carbonization and impairing the efficiency of the process. Mold compromise leads to extensive rework, rendering the effectiveness of injection molding ineffective and negatively impacting rotor manufacturing. Another crucial challenge is material swelling, particularly critical for rotors, as even slight swelling can result in severe blockages and operational failures. Faced with these challenges, the study, in addition to a substantial scientific review, turns to the Ansys Granta EduPack software to identify materials with the potential to overcome these difficulties, simplifying decision-making. The objective is to select an alternative material for rotors, maintaining functionality and reducing the filler content compared to the PPS compound used, while facilitating processing. This study not only proposes alternative solutions but also directly addresses specific challenges related to the manufacturing of this product, driving the development of more effective and sustainable strategies in materials selection for the automotive industry. Within this framework, the research results reveal that Phenol Formaldehyde (PF), reinforced with 45% high-strength glass fiber, stands out as a viable option for the challenges presented. Not only does it maintain, but it also enhances mechanical performance while reducing production costs.

Keyword: Material Selection. Fuel Pump. Impeller. Polymers. Polyphenylene Sulfide. Selection Criteria.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de um módulo de combustível.	05
Figura 2 – Esquema de uma bomba de combustível padrão e seus principais componentes.	06
Figura 3 – Foto de um rotor de bomba de combustível.	07
Figura 4 – Esquema representativo do processo de seleção de materiais, segundo a metodologia de Ashby.	15
Figura 5 – Exemplo de um Diagrama de Ashby.	16
Figura 6 – Diagrama de Ashby classificando os materiais de acordo com sua Resistência a Solventes Orgânicos e Resistência à Compressão. Materiais foram classificados como "Inaceitável", "Uso Limitado", "Aceitável" e "Excelente" no eixo X e em escala logarítmica em MPa no eixo Y.	21
Figura 7 – Diagrama de Ashby classificando os materiais de acordo com sua Facilidade de Processamento com Moldagem por Injeção e sua Resistência à Compressão. Materiais foram classificados como "Inaceitável", "Uso Limitado", "Aceitável" e "Excelente" no eixo X e em escala logarítmica em MPa no eixo Y.	21
Figura 8 – Diagrama de Ashby classificando os materiais de acordo com seu preço em Libra Esterlina Britânica por volume em metros cúbicos (GBP/m ³) por Injeção e sua Resistência à Compressão (MPa). Ambas as propriedades estão representadas em escala logarítmica.	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de Tradução.	19
Tabela 2 - Comparação entre o índice de mérito dos materiais selecionados.	23
Tabela 3 - Comparação de propriedades entre os potenciais materiais para rotores de bomba para combustível.	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	01
2	OBJETIVOS	03
2.1	OBJETIVO GERAL	03
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	03
3	REVISÃO DE LITERATURA	04
3.1	A BOMBA DE COMBUSTÍVEL	04
3.2	O ROTOR	07
3.2.1	Composição do Rotor	08
3.2.2	Manufatura do Rotor	09
3.2.3	Inchamento do Rotor	11
3.2.4	Propriedades Mecânicas do Rotor	12
3.3	MÉTODOS DE SELEÇÃO DE MATERIAIS	13
3.3.1	Método de Ashby	14
3.3.1.1	Tradução	15
3.3.1.2	Triagem	16
3.3.1.3	Classificação	16
3.3.1.4	Documentação	17
3.3.2	Ansys Granta EduPack	17
4	METODOLOGIA	19
5	ANÁLISE E RESULTADOS	20
5.1	TRIAGEM	20
5.2	CLASSIFICAÇÃO	20
5.3	DOCUMENTAÇÃO	23
5.3.1	Fenol-formaldeído com Fibra de Vidro de Alta Resistência	24
5.3.2	Cristal Líquido de Poliéster	28
5.3.3	Comparação entre propriedades	29
5.4	SELEÇÃO FINAL	31
6	CONCLUSÃO	33
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

O rotor da bomba de combustível é um componente crucial na indústria automotiva, tradicionalmente produzido através do processo de moldagem por injeção. O material mais comumente utilizado para esse fim é um compósito híbrido de poli(sulfeto de fenileno) (PPS) com 32,5% de fibra de vidro e 32,5% de carga mineral (a composição exata da carga mineral não é revelada pelos fornecedores). Entretanto, a utilização desse material apresenta desafios na fabricação, impactando a eficiência durante a manufatura do rotor e, em casos mais graves, resultando em falhas no desempenho do componente na fase de aplicação.

O processamento do rotor é complexo e crítico devido às aletas de dimensões reduzidas e tolerâncias rigorosas. O alto teor de reforços inorgânicos aumenta a viscosidade do polímero fundido, o que gera uma problemática de fluxo, fazendo com que o material não preencha totalmente o molde e tornando-o propenso a ficar retido no molde durante a moldagem por injeção, especialmente nas regiões das aletas, dificultando a limpeza do molde devido ao aumento da viscosidade causado pela carga mineral. Esse cenário pode levar à carbonização do material, afetando a eficiência do processo de moldagem por injeção diante dessas complexidades operacionais.

Além disso, o material atualmente utilizado apresenta risco de inchamento causado pela absorção do combustível pela matriz polimérica, um problema crítico para o componente em questão devido às suas restritas tolerâncias dimensionais. Mesmo uma leve alteração dimensional pode resultar no travamento da bomba, causando falhas operacionais significativas. Para evitar esse problema, frequentemente é necessário realizar um tratamento térmico conhecido como "recozimento" ou "annealing", cujo objetivo é aumentar a cristalinidade do material, minimizando a probabilidade de inchamento. A cristalinidade mais elevada cria uma estrutura mais ordenada, reduzindo, assim, a absorção de solvente (combustível) que leva ao inchamento. No entanto, introduzir esta etapa no processo de manufatura pode aumentar os custos, estender o tempo de produção e comprometer a eficiência operacional, o que destaca a necessidade crítica de buscar alternativas na seleção de materiais para contornar essas complexidades.

Diante dos desafios intrínsecos ao processamento e aplicação do compósito

híbrido de PPS com fibra de vidro e carga mineral no rotor da bomba de combustível, a seleção de materiais emerge como uma metodologia estratégica para contornar essas dificuldades. O Ansys Granta EduPack desempenha um papel crucial nesse processo, ao fornecer informações detalhadas e métodos sistemáticos, possibilitando a identificação de alternativas que atendam aos requisitos do produto e aprimorem o desempenho e a eficiência do componente. Assim, a busca por materiais mais adequados e a superação dos desafios mencionados demonstram um compromisso com a inovação e a otimização dos processos de fabricação na indústria, visando atender às demandas de um mercado dinâmico e competitivo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal do presente trabalho é investigar e propor alternativas de materiais ao compósito híbrido de poli(sulfeto de fenileno) (PPS), composto por 32,5% de fibra de vidro e 32,5% de carga mineral, atualmente utilizado nos rotores de bombas de combustível com o intuito de superar os desafios de processamento e aplicação, otimizar o seu desempenho mecânico e reduzir custos, melhorando assim sua eficiência operacional.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar materiais alternativos ao compósito híbrido de PPS que atendam aos requisitos estabelecidos para durabilidade em solventes orgânicos, faixas de temperatura de operação e propriedades mecânicas mínimas.
- Avaliar opções de materiais que atendam aos requisitos estabelecidos, considerando a eficiência do processamento, resistência mecânica e resistência química, visando superar as dificuldades enfrentadas com o compósito atual e reduzir os custos de produção.
- Propor o material alternativo mais viável e eficaz para a aplicação em rotores de bombas de combustível, considerando as análises detalhadas, custo-benefício e aprimoramento das propriedades mecânicas.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A BOMBA DE COMBUSTÍVEL

A bomba de combustível elétrica representa um dos componentes críticos no sistema de fornecimento de combustível de veículos automotores e desempenha um papel fundamental no desempenho do motor, uma vez que deve ser capaz de satisfazer os requisitos de diferentes condições operacionais. Sua função primordial é assegurar o abastecimento adequado e a taxa de fluxo necessária de combustível para a injeção, independentemente das variações nas condições de operação do motor (MA et. al., 2012).

As bombas de combustível tiveram sua origem no início do século 20, quando os carros usavam a gravidade para fornecer combustível ao motor. As primeiras bombas de combustível mecânicas permitiram o reposicionamento dos tanques de combustível para a parte traseira dos veículos. Estas utilizavam um diafragma e uma alavanca para retirar combustível do tanque e fornecê-lo ao motor. Posteriormente, na década de 60, com a popularização da injeção de combustível, as bombas de combustível elétricas se tornaram comuns, oferecendo pressão mais alta e atendendo às demandas dos sistemas de injeção, fazendo das bombas mecânicas obsoletas na maioria dos veículos de produção (GMB North America, Inc., 2022).

Em contraste com as primeiras implementações de sistemas de injeção eletrônica de gasolina, nas quais a bomba elétrica de combustível era exclusivamente montada externamente ao tanque (configuração conhecida como "in line"), observa-se, na atualidade, uma predominância na disposição da bomba elétrica de combustível no interior do tanque (conhecida como "in tank"). Esta mudança de abordagem representa um marco significativo na evolução dos sistemas de fornecimento de combustível em veículos.

A bomba elétrica de combustível não é apenas um componente isolado, mas faz parte integrante de um módulo de alimentação de combustível mais amplo, que incorpora diversos elementos; entre os mais importantes estão (MARQUES et. al., 2018):

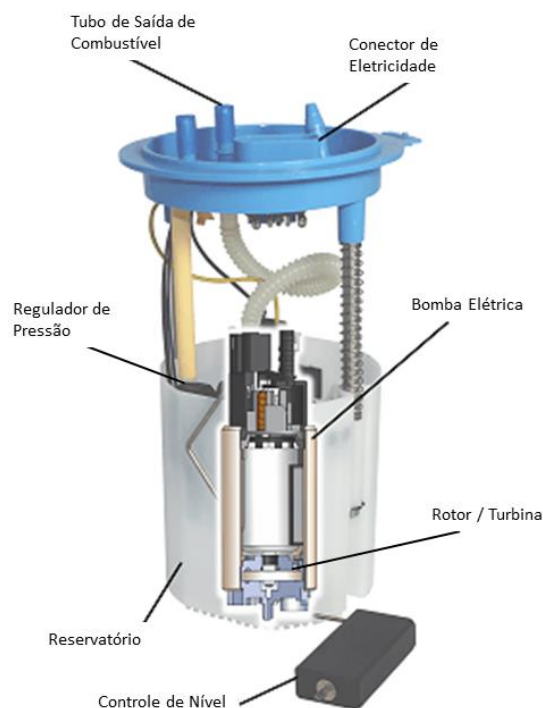
- O reservatório, que desempenha o papel de garantir um suprimento contínuo de combustível, especialmente durante manobras em curvas ou sob

condições de aceleração abrupta;

- O sensor de nível, responsável por monitorar o nível do fluido no tanque e fornecer informações precisas ao sistema de gerenciamento do veículo;
- O regulador de pressão, acionado em caso de uma restrição na linha de suprimento de combustível, que levaria a um aumento excessivo na pressão da bomba. Quando ativada, a válvula de alívio permite o retorno do fluido à entrada da bomba, garantindo o funcionamento adequado e a integridade do sistema;
- O pré-filtro projetado para proteger a bomba elétrica contra a contaminação por impurezas que possam estar presentes no combustível;
- O filtro fino de combustível de alta pressão, essencial para filtrar partículas e garantir que o combustível injetado no sistema de alta pressão seja limpo e livre de impurezas;
- Conexões elétricas e hidráulicas, que compõem o sistema de alimentação como um todo, assegurando a transmissão adequada de energia e fluidos.

A Figura 1 fornece uma representação visual dos principais componentes do módulo de alimentação de combustível, facilitando uma compreensão mais abrangente da complexidade e interconexão dos componentes acima citados.

Figura 1 – Esquema de um módulo de combustível



Fonte: Adaptado de (GMB North America, Inc., 2021).

Para compreender o funcionamento da bomba de combustível elétrica, podemos dividi-la em duas partes distintas: o pacote elétrico e o pacote hidráulico. O pacote elétrico é responsável por fornecer energia para o funcionamento do sistema. Seu princípio de operação assemelha-se ao de um motor elétrico, com uma bobina sujeita a um campo magnético e percorrida por uma corrente elétrica, resultando na geração de um torque que aciona o eixo da bomba. O pacote hidráulico, por sua vez, tem como função de transferir a energia provida pelo pacote elétrico para o fluido de combustível. Seu modo de funcionamento é análogo ao de uma bomba hidráulica, onde o torque produzido pelo pacote elétrico é transmitido para o rotor. Este processo envolve o movimento rotativo sincronizado da bobina, conhecida como induzido, e do rotor. Quando ambos giram, o combustível é aspirado do tanque e conduzido para o interior da bomba. As lâminas no rotor coletam o combustível e o direcionam para uma válvula de retenção e uma conexão de saída. Esta última se conecta aos componentes do sistema de filtro e aos elementos do sistema de injeção de combustível localizados no compartimento do motor do veículo (BLUCHER, 2005). Na Figura 2 é possível os detalhes internos de uma bomba elétrica padrão e uma breve descrição de seus principais componentes.

Figura 2 - Esquema de uma bomba de combustível padrão e seus principais componentes.



Fonte: (Robert Bosch LTDA., 2019)

3.2 O ROTOR

O rotor desempenha um papel fundamental no contexto da operação da bomba ao garantir o fluxo contínuo de combustível a partir do tanque para o sistema de injeção do motor. Trata-se de um componente intrinsecamente vinculado ao mecanismo da bomba, projetado para operar em um estado de rotação contínua.

O rotor é conectado a um motor elétrico permitindo o funcionamento da bomba, tal qual descrito na seção anterior. Representada na Figura 3, a peça consiste em um cilindro com várias lâminas ou aletas inseridas radialmente ao longo de seu comprimento, que desempenham o papel de coletar o combustível e direcioná-lo eficientemente para a saída da bomba. Normalmente, essas aletas são dispostas em espiral ou em formato helicoidal ao longo do cilindro, o que permite que, quando o rotor gira, o combustível seja aspirado e movido através da bomba. A quantidade, forma e inclinação das lâminas são detalhes críticos que afetam o desempenho e a eficiência da bomba (QI et al., 2012).

Figura 3 - Foto de um rotor de bomba de combustível.



Fonte: (Guangzhou Ideal Plastic Technology co.,Ltd, 2021)

A eficácia e confiabilidade do rotor são cruciais, pois qualquer disfunção, deformação ou variação dimensional nesse componente pode ter impactos significativos, comprometendo severamente a operação do veículo. Em particular, no contexto da bomba de combustível, o inchamento do material do rotor emerge como uma disfunção especialmente prejudicial. Esse fenômeno pode comprometer a precisão e o encaixe adequado do rotor nas demais partes da bomba, resultando no mau funcionamento da bomba e prejudicando o fluxo eficiente de combustível

para o motor.

Dessa forma, a seleção cuidadosa de materiais e a conformação precisa do rotor são elementos cruciais para assegurar o desempenho adequado da bomba de combustível, evitando problemas que poderiam comprometer a operação eficiente do veículo. Este trabalho está dedicado a aplicar metodologias de seleção de materiais, visando superar os desafios inerentes e promover a inovação na escolha de materiais para este componente crítico na indústria automotiva.

3.2.1 Composição do Rotor

Os rotores de bombas de combustível geralmente são produzidos a partir de materiais resistentes e duráveis que são capazes de suportar as condições de operação e as demandas específicas da aplicação. Entre suas características, deve ser um material resistente ao desgaste e ao ambiente termomecânico ao qual é submetido, além de ser inerte à compostos orgânicos, devido ao constante contato com combustíveis. Em geral, são utilizados polímeros reforçados com fibra de vidro ou fibra de carbono, visto que a resistência mecânica e a durabilidade são essenciais. Este tipo de composto polimérico oferece excelente resistência à tração e rigidez, tornando-os ideais para aplicações de alto desempenho.

O material mais utilizado para esta aplicação na indústria automotiva é um compósito de poli(sulfeto de fenileno) (PPS) linear com 32,5% de fibra de vidro e 32,5% de carga mineral (MORAN; LAKE; DOLE, 2002). No mercado, o composto de PPS é comercializado sob diferentes *tradenames*, cada um representando uma formulação específica do material, como por exemplo: DURAFIDE(R) PPS, Fortron PPS e THERMEC™ S.

O poli(sulfeto de fenileno) é um termoplástico conhecido por sua resistência à altas temperaturas, retardância de chamas, propriedades mecânicas, estabilidade dimensional e resistência química (Polyplastics Co., Ltd. , 2023). Possui temperatura de fusão (T_m) entre 280–290 °C, temperatura de transição vítrea (T_g) entre 80-90°C e temperatura de uso contínuo entre 200–240 °C. Ao incorporar fibras de vidro e misturas de fibras de vidro/minerais ao PPS padrão, é possível obter propriedades adicionais, como baixa absorção de umidade, além de excelente resistência à fluência, mesmo em temperaturas elevadas.

Quanto ao processamento, o PPS pode ser conformado através de

moldagem por injeção, extrusão (filme, fibra, folha e formas) e moldagem por sopro. Devido à excelente resistência química e resistência à hidrólise, compostos de PPS também são usados em peças automotivas em contato com combustível e óleo, peças de eletrodomésticos em contato com refrigerante e óleo, além de partes em sistemas de fornecimento de água quente.

3.2.2 Manufatura do Rotor

O processamento do rotor é realizado através de moldagem por injeção, um método cíclico que visa moldar uma peça plástica, utilizando pressão para injetar o material na cavidade de um molde. Esse processo é amplamente utilizado na produção em massa de peças plásticas complexas oferecendo excelentes tolerâncias dimensionais a um custo relativamente baixo (MANRICH, 2005).

O objetivo é produzir uma peça livre de vazios, rechupes, empenamentos e tensões residuais, com estabilidade dimensional, resistência e rigidez adequadas para a aplicação desejada. Para isso, deve-se alcançar uma alta qualidade da peça a um custo mínimo, requerendo um fundido que flua livremente no molde e um ciclo de operação o mais curto possível.

Na moldagem por injeção o material, comumente na forma de grânulos ou pó, é colocado na injetora e submetido à um ambiente de alta temperatura e taxas de deformação, até alcançar seu estado de fusão. O polímero fundido é então injetado no molde, onde é então deixado para resfriar e solidificar. Durante o resfriamento, o material fundido entra em contato com as paredes frias do molde, de forma que o calor é transferido lentamente das paredes ao centro do molde até que a peça alcance rigidez suficiente para ser ejetada. Este é um estágio crucial que determina propriedades finais do produto (MANRICH, 2005).

A temperatura do molde e o tempo de resfriamento inadequados podem influenciar significativamente o gradiente de temperatura, resultando em tensões residuais dentro da peça. Essas tensões residuais têm impacto direto na estabilidade dimensional, resistência mecânica e resistência química do produto final. A estabilidade dimensional é crucial para garantir que a peça mantenha suas dimensões originais ao longo do tempo e sob diferentes condições ambientais, assegurando o funcionamento adequado no contexto específico do rotor da bomba de combustível. A resistência mecânica é essencial para suportar as condições

operacionais, enquanto a resistência química é vital para resistir à interação com combustíveis agressivos e outros elementos químicos presentes no ambiente de operação da bomba de combustível. Este aspecto é crucial principalmente se há presença de tensões internas residuais, que pode causar fragilização ambiental - "Environmental Stress Cracking (ESC)".

Nota-se que a temperatura do molde para injeção deste composto ocorre acima da temperatura de transição vítrea do PPS, ou seja, 90°C (Granta Design, 2019). A temperatura elevada facilita a mobilidade molecular e favorece a cristalização durante o resfriamento, contribuindo para propriedades citadas anteriormente. Caso a temperatura do molde esteja abaixo da Tg do material, o produto final apresentaria estrutura amorfa, comprometendo as propriedades do produto final (MACHADO; HARADA, 2015).

Por fim, a abertura do molde permite a remoção da peça moldada, podendo ser auxiliada por pinos ou ejetores. O ciclo é então repetido para a produção de múltiplas peças com alta precisão e consistência.

Para o processamento do rotor, a etapa de injeção é de natureza complexa e crítica. Isso se deve ao fato de que o produto final incorpora aletas de dimensões extremamente reduzidas, sujeitas a tolerâncias rigorosas, resultando na necessidade de um molde extremamente complexo, o que justifica a moldagem por injeção o método de manufatura apropriado para a finalidade desejada. Além disso, a presença de uma carga mineral substancial no material pode acarretar em complicações operacionais, mencionadas a seguir.

Dado o elevado grau de complexidade do molde em questão e a alta viscosidade do material, o material fundido encontra dificuldades ao preencher totalmente o molde de injeção e torna-se propenso a ficar retido, particularmente na região das aletas, onde as dimensões da peça são mínimas. Limpar o molde, por sua vez, visto que, uma vez que o molde tenha sido comprometido, torna-se impróprio para uso subsequente. Isso implica a necessidade de realizar um retrabalho extenso de limpeza mecânica e manual antes de qualquer nova produção. Como resultado, o processo de moldagem por injeção, conhecido por sua eficiência e capacidade de reprodução, torna-se pouco eficaz diante dessas complexidades operacionais, impactando negativamente a fabricação do rotor da bomba de combustível.

3.2.3 Inchamento do Rotor

Além dos desafios que o composto híbrido de PPS pode apresentar durante a etapa de injeção, deve-se considerar um potencial problema significativo no desempenho do produto final: a propensão ao inchamento. Esse fenômeno é particularmente crítico no contexto do rotor da bomba de combustível, dadas as dimensões altamente restritas desse componente. Mesmo um pequeno grau de inchamento pode levar ao travamento da bomba, resultando em falhas operacionais graves, como o bloqueio da bomba e a interrupção do sistema de injeção de combustível.

De acordo com Canevarolo Jr (2002), o inchamento em polímeros é um processo físico que indica a difusão de moléculas de solvente para dentro da massa polimérica. A probabilidade desse fenômeno em polímeros aumenta com a semelhança química entre o material e o solvente (combustível), especialmente em temperaturas mais elevadas. Neste contexto, é importante notar que a cristalinidade é um fator que dificulta o inchamento. Isso ocorre pois o solvente penetra mais facilmente na fase amorfa da estrutura polimérica. Maior cristalinidade e menor proporção de fase amorfa tornam o material mais resistente ao inchaço pelo combustível.

Para evitar esse problema, muitas vezes é necessário realizar um processo adicional conhecido como "recozimento" ou "annealing" após a etapa de injeção. Esse processo consiste em manter a peça já moldada em condições controladas de temperatura e tempo, nas quais ela permanece dentro de um forno em alta temperatura (acima da T_g do PPS) e, em seguida, resfriado lentamente. O processo pode durar algumas horas e tem como objetivo diminuir a quantidade de tensões internas residuais e aumentar o teor de cristalinidade do material, aumentando a resistência à solventes orgânicos (SUZUKI; KATAYAMA; ITO, 2007). A desvantagem desta abordagem, é que a introdução de uma etapa adicional em um processo de produção pode acarretar em aumento de custos, extensão do tempo de produção, comprometendo a eficiência operacional e resultando em tempos de resposta mais longos para atender à demanda.

Também é importante considerar a propriedade de absorção de água dos materiais no projeto de rotores de bombas de combustível. A absorção de água em materiais poliméricos pode levar a um inchamento adicional, alterando as

dimensões e as propriedades mecânicas do rotor. Esse fenômeno pode ser exacerbado em ambientes com umidade elevada ou em contato direto com líquidos, como combustíveis que podem conter certos níveis de água (YANG et al., 2006); (BASCHEK; HARTWIG; ZAHRADNIK, 1999).

Diante do exposto, este trabalho visa buscar um material alternativo para o rotor da bomba de combustível que, além de facilitar o processamento por meio da moldagem por injeção, demonstre uma resistência inerente superior aos solventes orgânicos em comparação ao composto atual de PPS com 32,5% de fibra de vidro e 32,5% de carga mineral, mantendo também uma baixa absorção de água. Dessa forma, busca-se garantir a estabilidade dimensional e o desempenho técnico do produto, removendo a necessidade da etapa de recozimento e almejando uma solução eficaz e economicamente viável para os desafios enfrentados na produção do rotor da bomba de combustível.

3.2.4 Propriedades Mecânicas do Rotor

As propriedades mecânicas são cruciais para assegurar o desempenho e a longevidade dos rotores das bombas de combustível. Durante a operação, esses rotores enfrentam forças de cisalhamento significativas, resultantes do movimento dos fluidos e dos gradientes de pressão no sistema. Uma resistência ao cisalhamento adequada é necessária para garantir que o rotor possa suportar essas forças sem sofrer deformações ou falhas prematuras. Além disso, a resistência ao cisalhamento é importante para manter a estabilidade do rotor sob cargas dinâmicas, como as causadas por vibrações e flutuações de pressão. Estas podem deteriorar o desempenho vibratório e acústico e causar danos ao sistema de propulsão (YU et al., 2020).

A resistência à compressão é igualmente importante, especialmente sob condições extremas de operação, tais como altas temperaturas e vibrações contínuas. Em ambientes de alta temperatura, esta propriedade evita deformações térmicas, contrapondo-se às tensões residuais térmicas e mantendo a integridade estrutural do rotor. Essa característica é fundamental nos componentes dos motores de bombas de combustível, prevenindo falhas que poderiam comprometer seriamente a segurança do sistema de alimentação (SUO et al., 2013).

Nas bombas rotativas, a resistência à compressão é essencial para equilibrar

as forças centrípetas durante a rotação, prevenindo tensões radiais, cisalhamento nas interfaces do material e, conseqüentemente, o descolamento e falhas no rotor (TZENG, 2001).

A resistência à fadiga é outro aspecto crucial, estendendo a vida útil do rotor. Essa propriedade garante que o rotor suporte as tensões repetitivas sem falhas, contribuindo para um *design* otimizado que melhora o desempenho do alternador e assegura uma operação eficiente sob diversas condições (SCHAYES et al., 2015).

Em resumo, a seleção adequada de materiais para rotores de bombas de combustível deve focar em propriedades como resistência ao cisalhamento, compressão e fadiga. Estas características são fundamentais para assegurar a durabilidade, eficiência e segurança dos rotores, influenciando diretamente a confiabilidade e o desempenho da bomba em diversas condições operacionais. A compreensão e a aplicação dessas propriedades na escolha de materiais são decisivas para o desenvolvimento de componentes robustos e confiáveis em sistemas de bombas de combustível.

3.3 MÉTODOS DE SELEÇÃO DE MATERIAIS

A área de seleção de materiais desempenha um papel de extrema relevância no desenvolvimento de projetos de engenharia, *design*, ciência e desenvolvimento sustentável. Este tipo de estudo requer uma análise multidisciplinar, envolvendo diversos fatores, incluindo propriedades químicas, físicas, mecânicas e magnéticas, desempenho do produto de acordo com suas especificações e requisitos técnicos e custos, tanto da matéria-prima como todos os custos envolvidos no processo de produção. No entanto, esse processo pode provar-se complexo, visto o crescente número de materiais disponíveis na atualidade, com mais de 160 mil opções (ASHBY, 2011).

Em geral, o processo é sobretudo incorporado nas fases iniciais de desenvolvimento de um projeto. No entanto, ele não termina com o estabelecimento da produção, visto que os produtos podem muitas vezes falhar em serviço, e essas falhas contêm informações valiosas. É importante coletar e analisar dados de falhas para entender como este produto ou projeto pode ser corrigido ou melhorado. Frequentemente, esses dados indicam a necessidade de selecionar novos materiais para garantir a durabilidade e o desempenho adequados do produto. O projeto a ser

explorado neste trabalho pode ser definido como de caráter adaptativo, ou seja, se baseia em um produto existente, buscando melhorar o desempenho, reduzir custos ou adaptar-se às mudanças nas condições do mercado.

Segundo Ashby (2011), a escolha do material não pode ser considerada isoladamente; ela está intrinsecamente ligada à escolha dos processos de conformação, união e acabamento que serão aplicados a esse material, e o custo desempenha um papel significativo tanto na seleção quanto no modo de processamento. A relação entre função, material, forma e processo é complexa e interativa. A função de um produto influencia a escolha do material, e essa escolha, por sua vez, afeta a viabilidade dos processos, como fundição, moldagem, soldagem e tratamento térmico. Por outro lado, o processo de fabricação determina a forma, o tamanho, a precisão e o custo do produto final. Essas interações são bidirecionais, com a especificação da forma limitando as escolhas de material e processo, assim como a especificação do processo influencia as opções de materiais e formas disponíveis.

Portanto, o escopo deste trabalho envolve a busca por materiais alternativos que atendam aos requisitos do rotor da bomba de combustível, otimizando a fabricação e melhorando o desempenho. Este projeto é motivado pela necessidade de enfrentar desafios críticos na seleção de materiais, aprimorando o desempenho e a eficiência deste componente essencial da indústria automotiva. Em suma, a pesquisa e desenvolvimento nesse campo são essenciais para garantir inovação contínua e avanço tecnológico na produção de componentes automotivos.

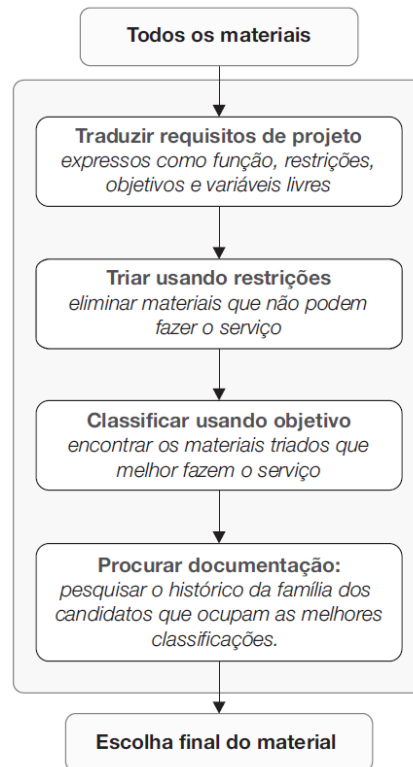
3.3.1 Método de Ashby

O método de Ashby é uma abordagem sistemática e estruturada para a seleção de materiais desenvolvido pelo renomado engenheiro de materiais Michael F. Ashby. Ele oferece uma estrutura sólida para a escolha criteriosa de materiais, levando em consideração as necessidades específicas de um projeto, as restrições, os objetivos e as condições locais (ASHBY, 2011). Esta metodologia ajuda os engenheiros e designers a explorar o vasto universo de materiais disponíveis e encontrar os mais adequados para suas aplicações, resultando em projetos mais bem-sucedidos e eficientes.

O método é dividido em várias etapas interconectadas, cada uma

desempenhando um papel crucial no processo de seleção de materiais, que serão descritas na Figura 4.

Figura 4 - Esquema representativo do processo de seleção de materiais, segundo a metodologia de Ashby.



Fonte: (ASHBY, 2011).

3.3.1.1 Tradução

A primeira etapa da metodologia de Ashby é a tradução, que discrimina as condições de contorno do projeto de seleção: a definição da(s) função(ões) da peça, requisitos, objetivos e variáveis-livres. Nesta fase, os requisitos do projeto, muitas vezes vagos e abstratos, são traduzidos em termos mais concretos e específicos que podem ser aplicados a bancos de dados de materiais. Isso envolve o entendimento das necessidades de desempenho, restrições de custo, requisitos de durabilidade, e outros fatores específicos do projeto e a definição de restrições e objetivos claros que orientarão a seleção de materiais. Com base nos requisitos do projeto, são definidas as propriedades mais críticas. Isso pode incluir resistência mecânica, condutividade térmica, resistência à corrosão, densidade e muitas outras. A escolha cuidadosa das propriedades é essencial, e, quanto mais claro e detalhado

for esse estágio, mais eficaz será a seleção de materiais.

3.3.1.2 Triagem

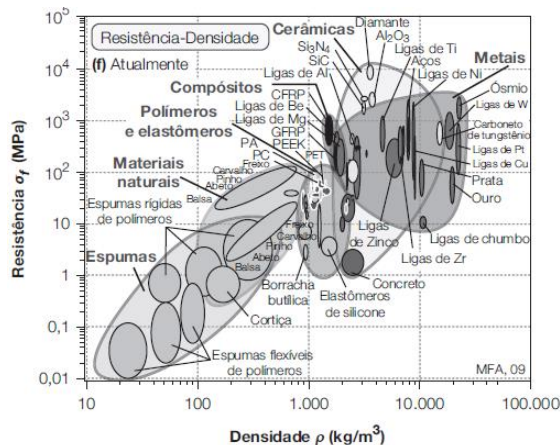
Nesta etapa os materiais que não atendem às restrições estabelecidas são eliminados, o que é essencial para reduzir a lista de materiais candidatos e identificar materiais potenciais que se encaixam nos requisitos do projeto. Por exemplo, se um componente deve operar em altas temperaturas, quaisquer materiais que não possam suportar essas temperaturas são descartados.

3.3.1.3 Classificação

A classificação é a terceira etapa, na qual os materiais sobreviventes são classificados com base em critérios de excelência. Isso envolve medir quão bem um material pode realizar o serviço desejado. Os materiais são classificados de acordo com sua capacidade de atender a critérios específicos.

Nesta etapa, é comumente utilizado o Diagrama de Ashby, apresentado na Figura 5, uma representação gráfica que coloca várias propriedades materiais em relação umas às outras. Isso ajuda a visualizar as relações entre diferentes propriedades e identificar áreas no diagrama onde materiais potenciais podem ser encontrados. É nesta etapa que usualmente aplicamos a maximização do Índice de Mérito para encontrar materiais que melhor desempenham os objetivos do projeto. O diagrama é uma ferramenta poderosa para a visualização e organização de dados complexos.

Figura 5 - Exemplo de um Diagrama de Ashby.



Fonte: (ASHBY, 2011).

3.3.1.4 Documentação

A documentação é a última etapa da metodologia, na qual informações detalhadas sobre os materiais candidatos são coletadas. Isso pode incluir estudos de casos anteriores de uso desses materiais, análises de falhas, informações sobre disponibilidade, preços e outras considerações práticas. A documentação é fundamental para reduzir ainda mais a lista de alternativas e tomar uma decisão final informada.

Além dessas etapas, é necessário reconhecer a importância das condições locais. Isto inclui fatores como experiência local, disponibilidade de fornecedores na região e outros fatores que podem variar de acordo com o contexto do projeto.

Após a análise cuidadosa de todos os requisitos, restrições e critérios, é realizada a escolha final do material, levando em consideração todas as informações reunidas.

3.3.2 Ansys Granta EduPack

O Ansys Granta EduPack é um software amplamente utilizado na tomada de decisões sobre materiais, dispondo de uma abrangente base de dados e informações referentes às características, propriedades e vantagens de diversos materiais, bem como ferramentas para análise, comparação e seleção.

Dentre as funcionalidades deste software destaca-se a capacidade de realizar uma seleção inteligente de materiais, permitindo que o usuário identifique com facilidade as melhores opções para suas aplicações. A ferramenta permite aos pesquisadores pesquisar, filtrar e examinar dados, definir limites para propriedades, bem como gerar gráficos comparativos e eliminar rapidamente candidatos inadequados. Além disso, o software disponibiliza ao usuário uma extensiva base de dados que contém informações sobre uma ampla gama de materiais, entre metais, compostos e polímeros. Assim, é possível identificar compostos semelhantes, compará-los com um material de referência, bem como avaliar o impacto ambiental de determinado produto ou projeto (Ansys, 2023).

A ferramenta torna a seleção de materiais mais ágil e assertiva, permitindo a escolha precisa dos materiais que melhor atendem às demandas de um projeto, desde o início do processo de desenvolvimento. Isso evita iterações dispendiosas e

atrasos, resultando em produtos mais eficientes, econômicos e robustos.

4 METODOLOGIA

A aplicação do método de Ashby norteou-se pelas quatro fases essenciais: tradução, triagem, classificação e documentação. Segundo a metodologia, o primeiro passo envolve a identificação dos atributos dos materiais que estão sujeitos a restrições estabelecidas pelo projeto, conforme descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Tabela de Tradução.

Tabela de Tradução	
Produto	Rotor de Bomba de Combustível.
Função	O rotor tem como função principal gerar pressão e energia necessária para o transporte do combustível do tanque para o sistema de injeção do motor.
Restrições	<ul style="list-style-type: none">- Materiais poliméricos ou de matrizes poliméricas;- Durabilidade à solvente orgânicos: "Aceitável" ou "Excelente";- Temperatura de serviço: -30°C à +70°C- Resistência à compressão > 101 MPa;- Módulo de cisalhamento > 4,63 GPa;- Resistência à fadiga sob 10⁷ ciclos > 35,8 MPa;- Absorção de água em 24 hrs < 0,07 %.
Objetivos	<ul style="list-style-type: none">- Maximizar durabilidade à solvente orgânicos;- Maximizar processabilidade em moldagem por injeção;- Maximizar a resistência à compressão;- Minimizar preço por volume.
Variáveis Livres	Material.

Fonte: Elaborado pela autora.

Com relação às restrições, foram consideradas principalmente as propriedades associadas ao ambiente operacional da bomba de combustível, ou seja a temperatura de operação do tanque de combustível (-30°C à +70°C) e a compatibilidade com solventes orgânicos, o que possibilita a operação em contato com combustíveis, como gasolina ou diesel.

Além disso, é fundamental que o novo material demonstre desempenho mecânico igual ou superior ao PPS atualmente empregado, uma vez que o rotor necessita suportar elevadas rotações e pressões. Para tal avaliação, utilizaremos como critério o limite mínimo de cada resistência à compressão, módulo de Cisalhamento e resistência à Fadiga do PPS (65% de fibra de vidro e carga mineral), de acordo com a base de dados presente no software (Granta Design, 2019). Esse conjunto de regras foi fundamental para garantir uma seleção criteriosa e alinhada aos objetivos do estudo.

5 ANÁLISE E RESULTADOS

5.1 TRIAGEM

Com o auxílio do software Ansys Granta EduPack, versão 2019, foram excluídos da base de dados todos os materiais que não apresentavam as características específicas de acordo com as restrições anteriormente mencionadas. Esse processo resultou na redução do número de candidatos de 903 materiais poliméricos inicialmente listados para 28 potenciais materiais.

5.2 CLASSIFICAÇÃO

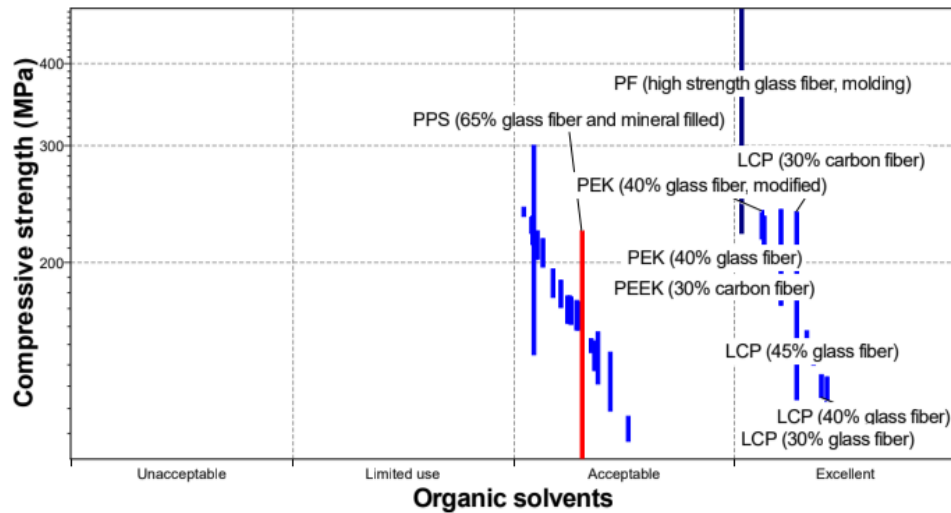
A partir da avaliação inicial, utilizaremos os objetivos para definir os critérios de excelência, que podem ser tanto minimizados quanto maximizados. Isso inclui fatores relacionados à facilidade de processamento e a estabilidade dimensional (evitar inchamento em contato com combustíveis).

Inicialmente, abordaremos nossa característica mais crítica: a resistência do material a solventes orgânicos. Para proporcionar uma visualização mais clara, utilizamos um Diagrama de Ashby, conforme apresentado na Figura 6. Vale ressaltar que os materiais que estariam inicialmente nos campos "Inaceitável" e "Uso Limitado" já foram eliminados durante a fase de triagem.

Pode-se observar que o PPS (65% de fibra de vidro e carga mineral), representado em vermelho, está classificado como "Aceitável". Dado que a resistência a solventes orgânicos pode influenciar diretamente no fenômeno de inchamento, optaremos por selecionar apenas os materiais classificados como "Excelente", visando eliminar o risco de ocorrência deste defeito.

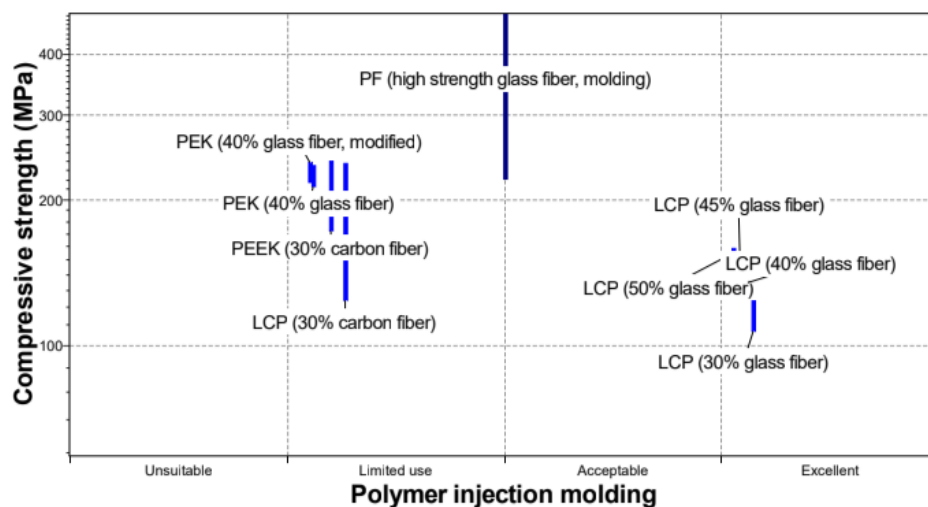
Na Figura 7, analisaremos a facilidade de processamento sob moldagem por injeção dos 9 candidatos restantes. Vale ressaltar que o Ansys Granta EduPack classifica o material atualmente utilizado, PPS (65% de fibra de vidro e carga mineral), como "Uso Limitado" nesta categoria, o que pode explicar as dificuldades enfrentadas na manufatura do rotor, mencionadas na Seção 3.2.2: Manufatura do Rotor. Portanto, ao escolher um material classificado como "Aceitável" ou "Excelente", é possível inferir que os desafios enfrentados no processamento do rotor serão significativamente reduzidos.

Figura 6 - Diagrama de Ashby classificando os materiais de acordo com sua Resistência a Solventes Orgânicos e Resistência à Compressão. Materiais foram classificados como "Inaceitável", "Uso Limitado", "Aceitável" e "Excelente" no eixo X e em escala logarítmica em MPa no eixo Y.



Fonte: (Granta Design, 2019)

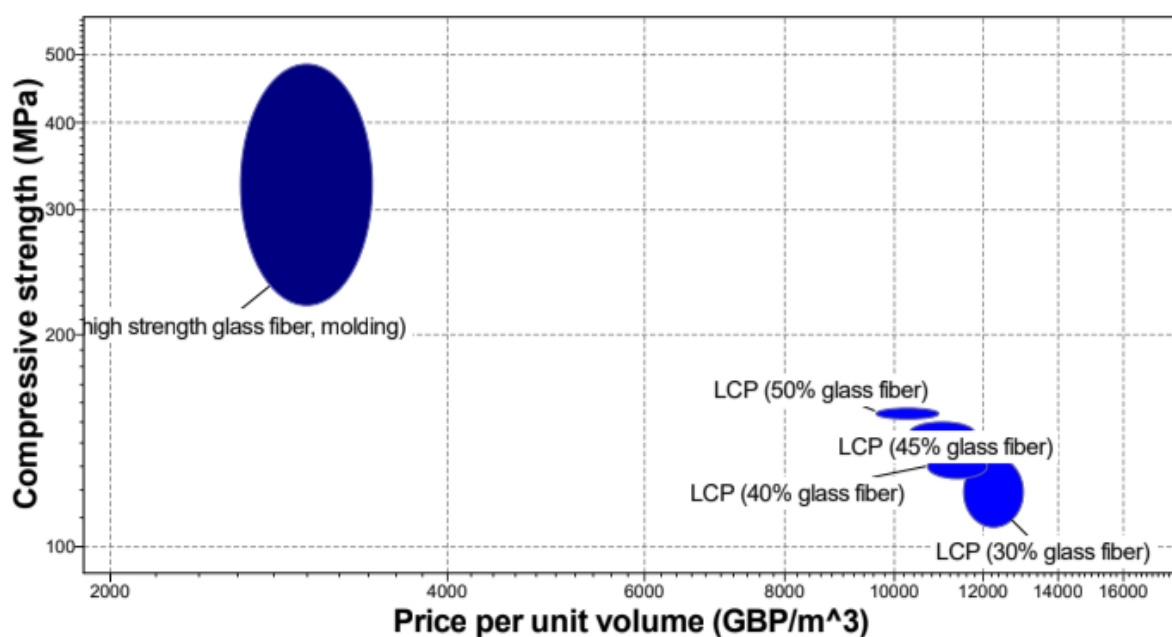
Figura 7 - Diagrama de Ashby classificando os materiais de acordo com sua Facilidade de Processamento com Moldagem por Injeção e sua Resistência à Compressão. Materiais foram classificados como "Inaceitável", "Uso Limitado", "Aceitável" e "Excelente" no eixo X e em escala logarítmica em MPa no eixo Y.



Fonte: (Granta Design, 2019)

Ao escolher os materiais com "Excelente" facilidade de processamento, chegamos a cinco candidatos que serão avaliados a seguir com base em seu custo por volume. Estes materiais foram então dispostos em um novo diagrama de Ashby, representado na Figura 8 com intuito de maximizar a Resistência à Compressão e minimizar o preço por volume. Embora o fator econômico não desempenhe um papel tão crucial na resolução dos desafios abordados neste trabalho, é importante destacar que o preço da matéria-prima é uma propriedade extremamente significativa e, em alguns casos, decisiva, especialmente quando se trata de processos de fabricação em larga escala na indústria.

Figura 8 - Diagrama de Ashby classificando os materiais de acordo com seu preço em Libra Esterlina Britânica por volume em metros cúbicos (GBP/m³) por Injeção e sua Resistência à Compressão (MPa). Ambas as propriedades estão representadas em escala logarítmica.



Fonte: (Granta Design, 2019)

Os materiais representados no diagrama também foram classificados de acordo com suas principais propriedades e organizados na Tabela 2. Além disso, foi calculado o índice de mérito para cada material. Este índice é uma métrica que permite avaliar quão bem um material atende aos critérios específicos de desempenho de uma determinada aplicação.

A fórmula geral para calcular o índice de mérito (IM) em um Diagrama de Ashby é a seguinte:

$$IM = \frac{(Propriedade\ 1)^n}{(Propriedade\ 2)}$$

Na equação acima, "Propriedade 1" representa a característica do material que se deseja maximizar (neste caso, a Resistência à Compressão), "Propriedade 2" é a característica que se deseja minimizar ou controlar (Preço por Volume), e "n" é um expoente que reflete a importância relativa de cada propriedade. O valor de "n" é determinado com base nas necessidades e prioridades específicas do projeto. Para este estudo, assumimos que "n" é igual a 1, indicando que ambas as propriedades têm igual importância.

Tabela 2 - Comparação entre o índice de mérito dos materiais selecionados.

Material	PF (FV de alta resistência)	LCP (50% FV)	LCP (45% FV)	LCP (40% FV)	LCP (30% FV)
Média de preço por unidade de volume (€3 GBP/m ³)	3,02	9,87	11,05	11,4	12,25
Resistência média à compressão (Mpa)	352	155	145	130	120,5
Índice de Mérito	116,6	15,7	13,1	11,4	9,8

Fonte: Adaptado de (Granta Design, 2019). PF (FV de alta resistência) representa Fenol Formaldeído (PF) com Fibra de Vidro de Alta Resistência e LCP representa o compósito de cristal líquido de poliéster com diferentes porcentagens de Fibra de Vidro (FV) em sua composição.

Pode-se observar que o material mais barato e com melhores resistências mecânicas é o Fenol-Formaldeído (PF) com Fibra de Vidro de Alta Resistência. Para a fase de documentação, vamos selecionar também um segundo candidato, o "Cristal Líquido de Poliéster (50% de Fibra de Vidro)", ou LCP 50%. Dentro do grupo dos quatro compostos de LCPs apresentados no diagrama da Figura 8, o composto com maior quantidade de carga de reforço apresenta maior resistência à compressão e menor custo.

5.3 DOCUMENTAÇÃO

Nesta etapa, foram coletadas informações detalhadas sobre os materiais candidatos, buscando dados que incluam o histórico de desempenho em aplicações

similares, análises de falhas anteriores, disponibilidade no mercado e custos associados.

Quanto as considerações locais, apesar de desempenharem um papel importante na decisão final, elas não serão consideradas neste caso, visto que o escopo deste projeto visa a aplicação em rotores que possam ser comercializados para o mercado automotivo global.

5.3.1 Fenol-formaldeído com Fibra de Vidro de Alta Resistência

O composto de fenol-formaldeído (PF), frequentemente conhecido por nomes comerciais como Bakelite ou Durez, é um material termofixo que consiste principalmente em resina de fenol-formaldeído (PF) fortalecida com 30 a 60% de fibras de vidro de alta resistência como reforço, geralmente na forma de fibras curtas com menos de 5 mm (Granta Design, 2019). Este material é amplamente utilizado em várias indústrias, incluindo automotiva, construção civil e marcenaria, desempenhando um papel essencial na fabricação de componentes automotivos, como pastilhas de freio, bombas de combustível e peças de transmissão.

A resina fenol-formaldeído é produzida sinteticamente a partir da reação entre fenol e formaldeído, sendo apreciada por sua versatilidade e estabilidade. Sua natureza termofixa resulta em estruturas moleculares reticuladas permanentemente ligadas, conferindo ao PF robustez contra o desgaste e tornando-o ideal para situações que exigem força e durabilidade.

A capacidade das resinas de fenol formaldeído de resistir a altas temperaturas é crucial para aplicações em ambientes de operação intensa, como os encontrados em rotores de bombas de combustível. Esta resistência ao calor garante que o material mantenha sua integridade estrutural e funcionalidade em temperaturas que podem chegar perto de 190°C. Além disso, a robustez mecânica do PF, incluindo alta resistência à tração e à compressão, é vital para componentes que enfrentam estresse mecânico contínuo, como é o caso dos rotores de bombas de combustível. Esta resistência mecânica assegura que os componentes suportem o estresse sem falhar ou deformar, contribuindo para a confiabilidade e eficiência do sistema de combustível (SHEN-QING, 2011).

A estabilidade dimensional do PF é outra característica notável que desempenha um papel fundamental na sua aplicação em rotores de bombas de

combustível. A capacidade do material de manter suas dimensões originais sob condições variáveis de temperatura e pressão é essencial para peças de precisão. Alterações dimensionais em componentes como rotores podem afetar adversamente o desempenho e a eficiência do sistema de combustível. A estabilidade dimensional do PF, portanto, não apenas contribui para uma vida útil mais longa das peças, mas também reduz a necessidade de manutenção frequente, garantindo um desempenho consistente ao longo do tempo (S. et al., 2022).

Embora as resinas PF sejam conhecidas por sua estabilidade dimensional, resistência térmica e elétrica, elas podem ser quebradiças, o que demanda reforços como a fibra de vidro para melhorar suas propriedades. A adição de fibra de vidro na resina fenólica resulta em mudanças significativas no comportamento mecânico do material. O efeito de reforço do vidro na resina fenol formaldeído resulta em um aumento na resistência à tração, resistência ao impacto, módulo de tração e resistência à flexão (SREEKALA et al., 2002). A adição de fibra de vidro à resina fenólica geralmente resulta em um aumento no módulo de elasticidade, indicando um material mais rígido. Por exemplo, foi observado que as resinas fenólicas reforçadas com fibra de vidro têm um aumento significativo no módulo de elasticidade dinâmico e na resistência, em uma proporção importante com a taxa de deformação (BARRE; CHOTARD; BENZEGGAGH, 1996). Em relação à resistência ao inchamento, a combinação de PF com materiais como fibra de vidro e aditivos inorgânicos resulta em uma redução significativa deste fenômeno. Isso é particularmente importante em componentes de bombas de combustível, onde o alterações dimensionais podem comprometer a eficiência e a segurança do sistema (CHANG, 2002).

A moldagem por injeção de resina fenólica reforçada com fibra de vidro é um processo complexo que emprega várias técnicas específicas para alcançar as propriedades mecânicas e físicas desejadas nos produtos finais. A etapa de reticulação ou cura que ocorre dentro do molde durante a moldagem por injeção de resina fenólica reforçada com fibra de vidro é um aspecto crítico do processo, responsável pela formação da estrutura final do material. Esse estágio envolve reações químicas complexas onde as moléculas de resina se ligam através de ligações cruzadas, transformando a mistura líquida ou semi-sólida em um sólido tridimensional rígido e termoestável. O processo de cura da resina fenólica ocorre

através do aquecimento, induzindo uma reação radical que leva a uma excelente rigidez térmica (KUMANOTANI et al., 2007).

No contexto da moldagem por injeção de compósitos de resina fenólica, é vital evitar a cura prematura do material dentro do barril de fusão da máquina de injeção. Se a resina começar a curar no barril, ela pode solidificar, causando obstruções e outros problemas que afetam a qualidade do produto moldado e a eficiência do processo. Para lidar especificamente com este desafio, o controle da energia mecânica específica (SME) é usado como um parâmetro de controle durante o processo de composição usando uma extrusora de dupla rosca. A SME é uma medida da energia mecânica aplicada ao material por unidade de massa durante o processamento em extrusoras ou outros equipamentos de mistura. Ajustando a SME, é possível controlar com maior precisão o grau de mistura, dispersão e o início da reação de cura da resina, ajudando a manter a fluidez do material e evitando a cura prematura (MAERTENS et al., 2021).

Adicionalmente, a otimização do processo de mistura e homogeneização dos componentes da resina crucial para garantir um composto uniforme e de alta qualidade. Uma mistura homogênea é fundamental para alcançar uma boa capacidade de fluxo, ou seja, a facilidade com que o material fundido pode fluir dentro do molde durante a injeção. Além disso, o uso de aditivos estabilizantes adequados ajudam a controlar a reação de cura da resina, assegurando que ela ocorra no momento e local adequados — dentro do molde e não antes. A escolha e a combinação corretas desses agentes são cruciais para evitar a cura prematura da resina, o que poderia levar a obstruções no equipamento de injeção ou produtos finais com propriedades mecânicas inferiores (ZHI-YANG, 2005).

Nesse contexto, as fibras picadas são frequentemente adicionadas junto com a resina na unidade de plastificação do injetor. Técnicas como Sheet Molding Compound (SMC) e Bulk Molding Compound (BMC) são utilizadas para melhorar as propriedades mecânicas dos produtos moldados. O SMC, por exemplo, envolve adicionar fibras curtas picadas de vidro a resina e outros aditivos para criar um composto moldável, resultando em peças moldadas com excelente força e rigidez (KIM; IM, 1997). Este método é amplamente utilizado na indústria automotiva e de construção devido à sua capacidade de produzir peças leves de geometria complexa e resistentes mecanicamente. Por outro lado, o BMC é uma técnica

similar ao SMC, mas geralmente usada para produzir peças com geometrias mais complexas e detalhadas. É uma massa moldável que contém resina, fibras, enchimentos e outros aditivos. O BMC é adequado para a produção de peças elétricas, automotivas e industriais que exigem precisão dimensional e estabilidade térmica (NHUNG et al., 2017). Ambas as técnicas são vitais na fabricação de componentes de compósitos reforçados com fibra de vidro, e a escolha entre SMC e BMC geralmente depende das especificações do produto final, requisitos de desempenho e considerações de custo.

Ao otimizar a mistura e ajustar a composição química da resina, é possível obter um material com excelente capacidade de fluxo e cura rápida, adequado para processos de moldagem por injeção eficientes e confiáveis. Essa precisão e controle são especialmente cruciais na fabricação de componentes críticos como rotores de bombas de combustível, onde a resistência mecânica, a estabilidade térmica e a precisão dimensional são essenciais. As propriedades superiores fornecidas pelos compostos fenólicos reforçados com fibra de vidro, alta resistência química, estabilidade em altas temperaturas e excelente resistência ao desgaste, os tornam ideais para essas aplicações. A seleção cuidadosa do processo de moldagem, juntamente com o controle rigoroso das variáveis de processo, permite a produção de rotores que atendem aos padrões exigentes da indústria de combustíveis, garantindo desempenho e confiabilidade no bombeamento de combustíveis em diversas condições operacionais.

Para aplicação em rotores de bombas de combustível, os compostos de fenol formaldeído já foram utilizados e destacados por apresentar menor inchamento em comparação com resinas de PPS. Testes mostraram que um composto de resina fenólica Novalac com fibra de vidro, sílica, argila e outros aditivos conseguiu reduzir o inchamento e aumentar a resistência mecânica do rotor (YU, 2018). Para este material, nota-se que redução do fenômeno de inchamento ocorre quando o rotor contém 55% em massa ou menos de resina fenólica e 45% em massa ou mais de carga inorgânica. A densidade de ligações cruzadas na estrutura também contribui para prevenir a permeação de combustível, fortalecendo a resistência ao inchamento. Na moldagem por injeção, a processabilidade e fluidez do material é maximizada, permitindo uma moldagem suave, especialmente quando o rotor contém 20% em massa ou mais de resina fenólica e 80% em massa ou menos de

carga inorgânica. Além disso, o rotor moldado por injeção é mais resistente e apresenta eficiência de operação e facilidade na etapa de montagem da bomba. Portanto, recomenda-se que resinas para rotores de bombas de combustível tenham de 20% a 55% de PF e de 45% a 80% de carga inorgânica (YU, 2018). O composto proposto, com uma matriz de resina fenólica (PF) e 45% de vidro, atende a esses requisitos.

Em resumo, o composto de fenol-formaldeído (PF) reforçado com fibras de vidro destaca-se como uma escolha notável com histórico positivo para a produção de rotores de bombas de combustível, proporcionando robustez contra o desgaste, isolamento térmico excepcional e resistência a uma variedade de produtos químicos em ambientes desafiadores, além de proporcionar resistência ao inchamento e maior durabilidade (YU, 2018).

5.3.2 Cristal Líquido de Poliéster

O Cristal Líquido de Poliéster (LCP) com 50% de fibra de vidro, denominado LCP-GF50, pertence à família de materiais plásticos, sendo classificado como termoplástico e semicristalino. Reconhecido pelos nomes comerciais Rodrun, Sumikasuper e Vectra, o LCP-GF50 é composto por 50% de poliéster (PE) aromático e 50% de fibra de vidro, apresentada na forma de fibra curta, com comprimento inferior a 5mm. Essa combinação confere ao material propriedades específicas, aproveitando as características do cristal líquido polimérico, como resistência mecânica e térmica notáveis, juntamente com a adição de fibra de vidro para reforço estrutural e maior durabilidade.

Os cristais líquidos poliméricos se destacam como resinas de alto desempenho devido à capacidade de formar regiões de estrutura altamente ordenada enquanto estão na fase líquida. Oferecem rigidez acentuada, baixo coeficiente de expansão térmica e capacidade inerente de retardamento de chama. Peças compostas com LCP mantêm estabilidade dimensional mesmo em temperaturas elevadas. Principais aplicações da LCP incluem indústrias automotiva, elétrica, eletrônica e de máquinas industriais (RESINEX Group, 2023).

O Cristal Líquido de Poliéster (LCP) reforçado com fibra de vidro para aplicação em rotores ou impulsores de bombas de combustível apresenta vantagens mecânicas significativas. Estudos indicam que o LCP reforçado mostra

alta resistência mecânica e um coeficiente de transferência de calor baixo, adequado para essas aplicações (DERONZIER; BERTOLINI, 1997).

Os LPCs também podem ser utilizados para melhorar as características físicas de compósitos de polipropileno reforçados com fibras de vidro, impactando significativamente as propriedades mecânicas e de resistência ao calor, aumentando a resistência à tração e a resistência ao impacto (LI et al., 2015). O reforço do LCP com fibras de carbono ou de vidro também demonstrou melhora em sua resistência ao desgaste em testes de desgaste deslizante contra aço liso, fator importante para rotores de bombas de combustível, que estão sujeitos a constantes atritos e desgastes durante o uso (VOSS; FRIEDRICH, 1986).

Os cristais líquidos poliméricos estão disponíveis em diversas formas, desde compostos sinterizáveis de alta temperatura até aqueles moldáveis por injeção. Na década de 1970, foram produzidos vários cristais líquidos poliméricos (LCPs) que exibiam ordem na fase de fusão (líquida), assemelhando-se aos cristais líquidos não poliméricos. No entanto, a introdução comercial de resinas de cristal líquido polimérico ocorreu em 1984, quando esses polímeros não podiam ser moldados por injeção. Hoje em dia, os cristais líquidos poliméricos podem ser processados por fusão em equipamentos convencionais em alta velocidade, com excelente replicação de detalhes do molde e uso eficiente de material reciclado (UL LLC, 2023). No entanto, a moldagem por injeção de Cristal Líquido de Poliéster (LCP) reforçado com fibra de vidro é um processo complexo e pode apresentar alguns desafios. Alguns dos desafios específicos incluem a reprodutibilidade do processo de moldagem por compósito líquido, que apresenta desafios em termos de consistência da produção (KONSTANTOPOULOS et al., 2019).

Em suma, o uso de LCP reforçado com 50% de fibra de vidro apresenta excelentes propriedades, como alta resistência mecânica, estabilidade térmica e resistência ao desgaste. Essas características, alinhadas com a capacidade de manter a integridade estrutural em condições operacionais desafiadoras, fazem dele uma escolha promissora diante das demandas de desempenho e durabilidade dos rotores de bombas de combustível modernos.

5.3.3 Comparação entre propriedades

A avaliação comparativa entre os três materiais para aplicação em rotores de

bomba para combustível destaca características distintas que influenciam diretamente no desempenho e na durabilidade do componente. Atualmente, o PPS (65% de fibra de vidro e carga mineral) é utilizado, proporcionando resistência mecânica, porém, enfrentando desafios na manufatura. Em contrapartida, a resina de fenol-formaldeído (PF) reforçado com fibra de vidro apresenta propriedades excepcionais de resistência química e térmica. Já o cristal líquido de poliéster (LCP) com 50% de fibra de vidro combina as vantagens do cristal líquido polimérico, como estabilidade dimensional em altas temperaturas, com a adição de fibra de vidro para reforço estrutural, no entanto apresentando maior custo.

Tabela 3 - Comparação de propriedades entre os potenciais materiais para rotores de bomba para combustível.

Material	PPS (65% de carga mineral)	PF (FV de alta resistência)	LCP (50% FV)
Família	Termoplástico	Termofixo	Termoplástico
Material Base	PPS (sulfeto de polifenileno)	Resina de fenol formaldeído	Poliéster de Cristal Líquido (LCP)
Aditivos	Fibra de vidro e carga mineral	Fibra de vidro	Fibra de vidro
Quantidade de aditivos (%)	65	30 - 60	50
Densidade média (g/m ³)	1,9	1,85	1,77
Temperatura de operação	-55 à 240	-43 à 220	-50 à 215
Temperatura de fusão (°C)	285	-	303
Temperatura de transição vítrea (°C)	85	220	120
Módulo de cisalhamento médio (GPa)	5,395	6,77	7,845
Resistência à Fadiga sob 10 ⁷ ciclos (MPa)	49,7	36	62,4
Absorção de água em 24 hrs	0,02 - 0,07	0,03 - 1,2	0,0025 - 0,0027
Durabilidade à solvente orgânicos	Aceitável	Excelente	Excelente
Processabilidade em moldagem por injeção	Uso Limitado	Aceitável	Excelente
Resistência média à compressão (MPa)	162	352	155
Média de preço por metro cúbico (e3 GBP/m ³)	6,24	3,02	9,87

Fonte: Adaptado de (Granta Design, 2019).

A Tabela 3 apresenta uma comparação abrangente entre três materiais potenciais para rotores de bomba para combustível, considerando características

como família de material, preço médio, resistência à compressão, facilidade de injeção e resistência a solventes orgânicos.

Avaliando mais detalhadamente as propriedades dos materiais, o PPS (65% de carga) destaca-se como um termoplástico com uma média de preço metro cúbico de 6,24 e uma resistência média à compressão de 162 MPa. No entanto, sua facilidade de injeção é classificada como "Uso Limitado", apresentando certos desafios no processo. Por outro lado, a resina de fenol-formaldeído (PF), reforçada com fibra de vidro de alta resistência, pertence à categoria de termofixos, com um preço médio de 3,02 por metro cúbico (e^3 GBP/m³) e uma notável resistência média à compressão de 352 MPa. Sua facilidade de injeção é classificada como "Aceitável", indicando uma abordagem mais viável durante o processo. Já o cristal líquido de poliéster (LCP) com 50% de fibra de vidro pertence à família dos termoplásticos, com uma média de preço por unidade de volume de 9,87. Apresenta uma resistência média à compressão de 155 MPa, sendo sua facilidade de injeção classificada como "Excelente". Notavelmente, ambos PF e LCP exibem uma excelente resistência a solventes orgânicos em comparação com o PPS.

A escolha entre esses materiais dependerá não apenas das propriedades mecânicas, mas também das considerações econômicas e do processo de fabricação específico para rotores de bomba para combustível. Essa composição confere ao LCP-GF50 propriedades mecânicas e térmicas notáveis, sendo uma solução para superar os desafios enfrentados pelo material atualmente utilizado. Por outro lado, a resina de fenol-formaldeído apresenta menor custo e melhor resistência mecânica sob compressão, fatores cruciais para o desempenho do produto. Apesar de sua facilidade de injeção e resistência a solventes orgânicos não serem tão boas quanto as do LCP, ainda representam uma melhoria significativa em comparação ao PPS, nosso material original. Portanto, a resina de fenol-formaldeído (PF), reforçada com fibra de vidro de alta resistência pode ser uma opção viável para os desafios apresentados.

5.4 SELEÇÃO FINAL

A partir da análise de todas as informações coletadas durante esse processo, resta definir um ou mais materiais alternativos para o compósito híbrido de PPS. A escolha entre esses materiais dependerá não apenas das propriedades mecânicas,

mas também das considerações econômicas e do processo de fabricação específico para rotores de bomba para combustível. Essa composição confere Ao cristal líquido de poliéster (LCP) com 50% de fibra de vidro propriedades mecânicas e térmicas notáveis, sendo uma solução para superar os desafios enfrentados pelo material atualmente utilizado.

Por outro lado, a resina de fenol-formaldeído apresenta menor custo e melhor capacidade mecânica, fatores cruciais para o desempenho. Apesar de sua facilidade de injeção e resistência a solventes orgânicos não serem tão boas quanto as do LPC, ainda representam uma melhoria significativa em comparação ao PPS, nosso material original. Portanto, observa-se que a resina de fenol-formaldeído (PF), reforçada com fibra de vidro de alta resistência, apresenta-se como uma opção ideal para os desafios apresentados, não só mantendo como melhorando a performance mecânica, além de reduzir os custos de produção.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho se destaca pela aplicação da metodologia de seleção de materiais, com foco na otimização dos rotores de bombas de combustível, peças cruciais na indústria automotiva. Utilizando o Método de Ashby como estratégia principal, buscou-se identificar alternativas ao composto de poli(sulfeto de fenileno) (PPS) com 32,5% de fibra de vidro e 32,5% de carga mineral, material convencionalmente utilizado nesse contexto. A análise foi conduzida visando preservar as propriedades químicas e físicas essenciais para o desempenho eficiente e duradouro desses componentes. Os desafios de eficiência, durabilidade e processabilidade foram abordados em cada etapa, guiando a seleção para alcançar resultados mais avançados.

O emprego do software Ansys Granta EduPack, aliado à sua base de dados robusta, representou uma contribuição significativa a este estudo. Essa ferramenta possibilitou a identificação eficiente de materiais com potencial, simplificando a complexidade do processo decisório. Além disso, a revisão científica substancial realizada proporcionou um embasamento teórico sólido para as escolhas feitas durante a seleção de materiais.

A comparação entre os candidatos, detalhadamente explorada ao longo deste trabalho, revelou nuances importantes. O PPS, material usado atualmente, foi colocado em perspectiva com a resina de fenol-formaldeído (PF), reforçada com fibra de vidro de alta resistência, e o cristal líquido de poliéster (LCP) com 50% de fibra de vidro. A análise detalhada incluiu fatores como custo, resistência mecânica, facilidade de injeção e resistência a solventes orgânicos.

Diante do exposto, conclui-se que a resina de fenol-formaldeído (PF), reforçada com 45% de fibra de vidro de alta resistência, se destaca como a opção viável para os desafios apresentados. Além de manter, aprimora o desempenho mecânica, ao mesmo tempo que reduz os custos de produção.

REFERÊNCIAS

Ansys. **Ansys Granta EduPack**. [S.l.], 2023. Enhance your Materials Teaching. Ansys Granta EduPack—formerly CES EduPack—is a unique set of teaching resources that help academics enhance courses related to materials across engineering, design, science and sustainable development. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

ASHBY, M. **Seleção de Materiais no Projeto Mecânico**. [S.l.]: Elsevier Editora Ltda., 2011.

BARRE, S.; CHOTARD, T.; BENZEGGAGH, M. **Comparative study of strain rate effects on mechanical properties of glass fibre-reinforced thermoset matrix composite**. Composites Part A-applied Science and Manufacturing, v. 27, p. 1169–1181, 1996.

BASCHEK, G.; HARTWIG, G.; ZAHRADNIK, F. **Effect of water absorption in polymers at low and high temperatures**. Polymer, v. 40, p. 3433–3441, 1999.

BLUCHER, E. **Manual de Tecnologia Automotiva**. 25. ed. [S.l.]: BOSCH, 2005.

CHANG, X. Pf poplar flakeboard from steam-injection-vacuum pressing. **China Wood- Industry**, 2002.

DERONZIER, J.; BERTOLINI, G. **Plate heat exchangers in liquid-crystal polymers**. Applied Thermal Engineering, v. 17, p. 799–808, 1997.

GMB North America, Inc. **Lo importante que debes saber de la Bomba de Gasolina**. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://gmb.net/es/lo-importante-que-debes-de-saber-de-la-bomba-de-gasolina/>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

GMB North America, Inc. **Major Innovations In Fuel Pump Design Since 1900**. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://gmb.net/blog/major-fuel-pump-design-innovations/>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

Granta Design. **Granta Edupack**. [S.l.], 2019. Version 2019. Disponível em: <<https://www.grantadesign.com/products/edupack/>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

Guangzhou Ideal Plastic Technology co.,Ltd. **Fuel Pump PPS Impeller**. [S.l.], 2021. Copyright © 2021 Guangzhou Ideal Plastic Technology co.,Ltd - Plastic CNC Machined Parts-All Rights Reserved. Disponível em: <<https://www.plastic-cnc-injection.com/fuel-pump-pps-impeller.html>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

KIM, S.; IM, Y. **Three-dimensional thermo-viscoplastic analysis of compression molding of sheet molding compounds with fiber volume fraction prediction.** Journal of Materials Processing Technology, v. 63, p. 631–636, 1997.

KONSTANTOPOULOS, S. et al. **Liquid composite molding reproducibility in real-world production of fiber reinforced polymeric composites: a review of challenges and solutions.** Advanced Manufacturing: Polymer Composites Science, v. 5, p. 85 – 99, 2019. 36

KUMANOTANI, J. et al. **Studies on phenolic resins. vii. the preparation of a new type of self-crosslinking phenolic resin and the reaction mechanism of the crosslinking.** Journal Polymer Science Part C: Polymer Symposia, v. 16, p. 1705–1716, 2007.

LI, Y. et al. **Structure and properties of glass fiber reinforced polypropylene/liquid crystal polymer blends.** Journal of Macromolecular Science, Part B, v. 54, p. 1144 – 1152, 2015.

MA, Z. L.; ZHANG, Z. D. **Research and design of electric fuel pump testing system.** Advanced Materials Research, 2012.

MACHADO, José Fernando Albuquerque; HARADA, Júlio. **Tecnologia de Moldagem por Sopro, Injeção e Extrusão Plásticos.** 1. ed. São Paulo: [s.n.], 2015.

MAERTENS, R. et al. **Compounding of short fiber reinforced phenolic resin by using specific mechanical energy input as a process control parameter.** v. 5, p. 127, 2021.

MANRICH, Silvio. **Processamento de Termoplásticos:** rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes. Artliber Ed., 2005.

MARQUES, S.; SILVA, G.; FARIA, A. **O impacto do uso de combustível adulterado nos motores elétricos de corrente contínua de ímãs permanentes em eletrobombas de combustível.** 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2023.

MORAN, Kevin; LAKE, Paul; DOLE, John. **Using polyphenylene sulphide in high-performance pumps.** World Pumps, Volume 2002, Issue 434, 2002, Pages 27-31, ISSN 0262-1762. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(02\)80264-4](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(02)80264-4). Acesso em: 3 dez. 2023.

NHUNG, L. et al. **Integration of a multi-scale homogenization model into finite element software for predicting mechanical properties of bulk molding compound (bmc) composite.** International Journal of Mechanical Engineering and Applications, v. 5, p. 26, 2017.

Polyplastics Co., Ltd. . **Low Fuel Swelling PPS DURAFIDE®6165A7S**. [S.I.]. Disponível em: <<https://www.polyplastics.com/en/product/lines/pps6165a7s/index.html>>. Acesso em: 3 dez. 2023.

QI, L. et al. **Design and research of a centrifugal compressor for automotive fuel cell systems**. Advanced Materials Research, v. 510, p. 123–127, April 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.510.123>>. Acesso em: 3 dez. 2023.

RESINEX Group. **LCP – Polímeros de Cristais Líquidos**. [S.I.], 2023. © 2023 RESINEX Group, Portugal. Disponível em: <<https://www.resinex.pt/tipos-de-polimeros/lcp.html>>. Acesso em: 14 dez. 2023.

Robert Bosch LTDA. **BOSCH CATALOGO BOMBA COMBUSTÍVEL 2019-2020**. [S.I.], 2019. Disponível em: <https://www.boschaftermarket.com/xrm/media/images/countryspecific/br/downloads19/pdf9/catlogo_bombas_combustvel_2019.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2023.

ROTH, R. A. **PUMP IMPELLER**. Detroit, Mich., 1993. v. 45, n. 5,209,630, 5546 p. United States Patent. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US5209630A/en>>. Acesso em: 13 nov. 2023.

S., S. M. et al. **A review on phenol-formaldehyde biocomposites**. Current Applied Polymer Science, 2022.

SCHAYES, C. et al. **Rotor design optimization through low cycle fatigue testing**. Procedia Engineering, v. 133, p. 233–243, 2015.

SHEN-QING, W. **Thermal modifying methods and progress of phenol-formaldehyde resin**. Journal of Materials Engineering, 2011.

SREEKALA, M. et al. **The mechanical performance of hybrid phenol-formaldehyde-based composites reinforced with glass and oil palm fibers**. Composites Science and Technology, v. 62, p. 339–353, 2002.

SUO, T. et al. **Compressive behavior of c/sic composites over a wide range of strain rates and temperatures**. Carbon, v. 62, p. 481–492, 2013.

SUZUKI, J.; KATAYAMA, K.; ITO, H. **Automotive Fuel Hose**. 2007. Patent JP4001098B2. Issued in Japan.

TZENG, J. **Mechanics of composite rotating machines for pulsed power applications**. IEEE Transactions on Magnetics, v. 37, p. 328–331, 2001.

UL LLC. **Polímero de Cristal Líquido (LCP)**. [S.I.], 2023. © 2023 UL LLC, All Rights Reserved. Disponível em: <<https://www.ulprospector.com/plastics/es/generics/17>>. Acesso em: 13 dez. 2023.

VOSS, H.; FRIEDRICH, K. **Wear performance of a bulk liquid crystal polymer and its short-fibre composites**. Tribology International, v. 19, p. 145–156, 1986.

YANG, H.-S. et al. **Water absorption behavior and mechanical properties of lignocellulosic filler–polyolefin bio-composites**. Composite Structures, v. 72, p. 429–437, 2006.

YU, D. **Impeller for a Regenerative Turbine Fuel Pump**. [S.I.], 2018. Worldwide applications.

YU, H. et al. **Propulsion performance and unsteady forces of a pump-jet propulsor with different pre-swirl stator parameters**. Applied Ocean Research, v. 100, p. 102184, 2020.

ZHI-YANG, B. **Preparation of glass fiber reinforced phenolic injection molding materials and its properties**. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2005.