



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



**MATHEUS CAIAFFA MOREIRA DE OLIVEIRA**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA FABRICAÇÃO DE ROTOR DE  
DISCOS A PARTIR DE MATERIAL TERMOPLÁSTICO**

**OURO PRETO - MG**  
**2025**

**MATHEUS CAIAFFA MOREIRA DE OLIVEIRA**  
**matheus.caiaffa@aluno.ufop.edu.br**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA FABRICAÇÃO DE ROTOR DE  
DISCOS A PARTIR DE MATERIAL TERMOPLÁSTICO**

Monografia apresentada ao Curso de  
Graduação em Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal de Ouro Preto  
como requisito para a obtenção do  
título de Engenheiro Mecânico.

**Professor orientador:** DSc. Edson Alves Figueira Júnior

**OURO PRETO – MG**  
**2025**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

O48e Oliveira, Matheus Caiaffa Moreira de.  
Estudo da viabilidade da fabricação de rotor de discos a partir de material termoplástico. [manuscrito] / Matheus Caiaffa Moreira de Oliveira. - 2025.  
52 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Edson Alves Figueira Júnior.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Rotores de discos. 2. Mineração. 3. Simulação computacional. I. Júnior, Edson Alves Figueira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Angela Maria Raimundo - SIAPE: 1.644.803



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Matheus Caiaffa Moreira De Oliveira**

### **Estudo da viabilidade da fabricação de rotor de discos a partir de material termoplástico**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 01 de julho de 2025

#### Membros da banca

[Dsc] - Edson Alves Figueira Júnior - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto

[Dsc] - Valério Luiz Borges - Universidade Federal de Uberlândia

[Dsc] - Claudio Marcio Santana - Universidade Federal de Ouro Preto

Edson Alves Figueira Júnior, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/07/2025



Documento assinado eletronicamente por **Edson Alves Figueira Junior, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/07/2025, às 13:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Marcio Santana, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/07/2025, às 19:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0936681** e o código CRC **627BB45B**.

Agradeço a Deus, por mais esta etapa vencida, aos meus pais, pelo apoio, aos meus colegas pelo companheirismo.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço ao orientador Edson Alves Figueira Júnior, pela oportunidade, disponibilidade e suporte durante o desenvolvimento deste trabalho, e ao professor Washington Luiz Vieira da Silva pelas contribuições para o aprimoramento.

*“Amo aquele cuja alma é profunda, mesmo na ferida, e ao que pode perecer de um leve acidente: assim passa de bom grado sobre a ponte.”*

Friedrich Nietzsche

## RESUMO

Bombas centrífugas de pequeno ou grande porte são amplamente usadas em indústrias, como mineradoras e petrolíferas, especialmente para o bombeamento de polpa, um fluido abrasivo que causa grande desgaste nos equipamentos, resultando em altos custos de manutenção. Diante desse cenário, o presente trabalho avalia o desempenho de um rotor de discos aplicado em bomba centrífuga para o bombeamento de fluidos abrasivos, com foco em sua fabricação em material termoplástico como alternativa aos modelos convencionais. O objetivo principal é avaliar a viabilidade de se utilizar um rotor produzido em termoplástico de menor custo, considerando o menor desgaste e a maior durabilidade apresentados pelos rotores de disco em bombeamento de polpa abrasiva. Para a análise, foram aplicados métodos computacionais de simulações estruturais e fluidodinâmicas (CFD). Os resultados indicam que o material suporta adequadamente os esforços aplicados, de acordo com o regime operacional estabelecido, sugerindo um desempenho promissor e viabilidade para fabricação e teste empírico.

**Palavras-chave:** Rotor de discos, Bombeamento de fluidos abrasivos, Mineração, Rotor, Simulação computacional.

## ABSTRACT

Centrifugal pumps are commonly used components in industries such as mining and petroleum, where processes heavily rely on this equipment for pumping slurry, an abrasive fluid that causes significant wear and results in high maintenance costs. Accordingly, the present work aims to evaluate the performance of a disc rotor impeller, applied for abrasive fluid pumping, with a focus on its manufacturing method using thermoplastic material as an alternative to conventional models. The main objective is to assess the feasibility of a lower-cost thermoplastic disc rotor, as this impeller design offers advantages for handling abrasive fluids, exhibiting reduced wear and increased durability. For this analysis, computational fluid dynamics (CFD) and structural simulations were applied. The results indicate that the thermoplastic material can withstand the applied loads under the evaluated conditions, suggesting promising performance and supporting further experimental validation.

**Keywords:** Disk rotor, Abrasive fluid pumping, Mining, Rotor, Computational simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático de uma bomba centrífuga.....	13
Figura 2 – Exemplo de uma curva característica.....	14
Figura 3 – Exemplo de curva característica. ....	15
Figura 4 – Tipos de rotores.....	16
Figura 11 – Desgaste em impelidor após 3 meses. ....	16
Figura 5 – Diagrama de velocidades.....	17
Figura 6 – Bomba de Tesla.....	18
Figura 7 – Esquema de uma camada-limite. ....	19
Figura 8 – Sentido de fluxo no rotor de discos.....	20
Figura 9 – Vetor de velocidades próximo à parede do rotor. ....	21
Figura 10 – Vetores de velocidade em um plano entre as duas paredes do rotor de 5 mm. ....	21
Figura 12 – Impressora 3D tipo FDM.....	23
Figura 13 – Subdivisões da região próxima a parede. ....	26
Figura 14 – Valores de $Y^+$ no rotor da bomba.....	27
Figura 15 – Distribuição de pressão sob o impelidor. ....	27
Figura 16 – Fluxograma das etapas realizadas na pesquisa. ....	30
Figura 17 – Montagem do estudo. ....	31
Figura 18 – Vista lateral do rotor.....	31
Figura 19 – Malha representativa do volume de líquido interno ao rotor.....	33
Figura 20 – Modelo 3D do domínio de fluido.....	33
Figura 21 – Restrições e carregamentos aplicados ao rotor. ....	35
Figura 22 – Função do ângulo de impacto. ....	37
Figura 23 – Campo de velocidades nas paredes do rotor de discos (plano de corte XY).....	40
Figura 24 – Campo de velocidades no interior entre as paredes do rotor (plano de corte XY). .....	41

Figura 25 – Gráfico de distribuição dos valores de $Y^+$ na superfície do rotor. ....	42
Figura 26 – Distribuição de pressão de fluido sob as paredes do rotor. ....	42
Figura 27 – Gráfico de tensões no rotor.....	43
Figura 28 – Gráfico de taxa de erosão sob a superfície do rotor. ....	45
Figura 29 – Comparativo entre modelo preditivo e teste empírico. ....	46
Figura 30 – Protótipo físico do rotor de discos em material termoplástico. ....	46

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Configuração para simulação numérica.....	32
Tabela 2 – Características físicas do rotor. ....	35
Tabela 3 – Configuração para simulação numérica.....	37
Tabela 4 – Tabela de variáveis e indicadores.....	38
Tabela 5 – Primeiros modos de viração do impelidor .....	44

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Cálculo do número de Reynolds.....	19
Equação 2 – Cálculo da altura manométrica a partir da diferença de pressão .....	34
Equação 3 – Cálculo da taxa de erosão adimensional segundo o modelo de Finnie.....	36
Equação 4 – Critério de resistência mecânica de von Mises.....	43

**LISTA DE SÍMBOLOS**

V	Vetor velocidade do movimento absoluto
U	Vetor velocidade de arrastamento
W	Vetor velocidade relativa
$\alpha$	Ângulo entre V e U
$\beta$	Ângulo entre W e U
Re	Número de Reynolds
V	Velocidade média de escoamento
D	Comprimento característico da geometria
$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido
CFD	<i>Computational fluid dynamics</i>
DPM	<i>Discrete phase model</i>
FEA	<i>Finite element analysis</i>
rpm	Rotações por minuto
Pa	Pascal
MPa	Mega pascal
GPa	Giga pascal
m	Metros
mm	Milímetros
kg/m <sup>3</sup>	Kilogramas por metro cúbico
kg/s	Kilogramas por segundo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
1.1	Formulação do problema	9
1.2	Justificativa	10
1.3	Objetivos	11
1.3.1	Geral	11
1.3.2	Específicos	11
1.4	Estrutura do trabalho	11
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>13</b>
2.1	Bombas centrífugas	13
2.2	Rotores	15
2.3	Prototipagem por impressão 3D	22
2.4	Método dos elementos finitos	24
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>29</b>
3.1	Tipo de pesquisa	29
3.2	Materiais e métodos	30
3.2.1	Geometria do impelidor	31
3.2.2	Simulação fluidodinâmica	32
3.2.3	Interação fluido-estrutura unidirecional	34
3.2.4	Modelo de erosão	36
3.3	Variáveis e indicadores	38
3.4	Instrumento de coleta de dados	38
3.5	Tabulação dos dados	38
3.6	Considerações finais do capítulo	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>40</b>
4.1	Pós-processamento	40
4.2	Critério de falha	43
4.3	Desgaste erosivo	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>48</b>
5.1	Conclusão	48
5.2	Recomendações	49

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Formulação do problema

Bombas propulsoras centrífugas são máquinas de fluxo empregadas em diversos setores industriais e domésticos. Segundo Çengel e Cimbala (2018), as bombas são utilizadas quando se necessita adicionar energia a um fluido.

Em diversos processos, o bombeamento de fluidos com características abrasivas é uma necessidade recorrente, a exemplo da extração de areia, de petróleo, bem como no transporte de polpa de minério durante o beneficiamento e em minerodutos, dentre várias outras aplicações.

Para Figueira Jr. (2017), partículas de caráter abrasivo dissolvidas nos fluidos são um agravante para a manutenção de bombas propulsoras, e sua presença proporciona desgaste intenso nos rotores convencionais. Assim segundo o autor, no sentido da manutenção industrial, esses processos são dependentes da durabilidade dos impelidores, responsáveis por transmitir energia cinética ao fluido a ser movimentado.

Para mitigar esse problema, soluções alternativas aos propulsores tradicionais são propostas, como é caso do rotor de discos. Essa variação de impelidor foi descrita na patente 1061142 *Fluid Propulsion* de Nikola Tesla, que trata sobre um dispositivo formado por discos planos acoplados ao motor para propulsão dos fluidos (TESLA, 1913).

Diferentemente dos impelidores convencionais, que, como descrito por Mancintyre (2021), atuam por meio da mudança de direção progressiva do fluido através das pás curvas, o rotor de discos de Tesla (1913) transfere energia via forças viscosas, uma vez que o fluido se adere às superfícies dos discos girantes, promovendo um efeito de arrasto, o que resulta na transmissão de torque.

Segundo Barbosa (1992), a velocidade nula do fluido na camada limite reduz o impacto das partículas abrasivas nas paredes do dispositivo. Devido a este comportamento, Figueira Jr. (2017) conclui as vantagens do modelo para aplicações em que o fluido possui misturas sólidas e particulados.

Figueira Jr. (2017) destaca o desgaste mínimo nos rotores de discos, todavia os rotores de prova foram fabricados em ligas metálicas, incluindo alumínio e aço carbono. Nesse sentido, estudos acerca dos materiais e métodos de fabricação para tal dispositivo são propostas a serem desenvolvidas e aprimoradas.

Segundo Callister (2018), materiais metálicos em geral, possuem maior resistência abrasiva quando comparados a materiais poliméricos, porém para a aplicação proposta, tal resistência pode não se fazer tão necessária quanto a geometria em si, já que seu formato e comportamento fluido-dinâmico previne o possível desgaste abrasivo, logo um estudo acerca desse comportamento é proposto.

Tendo em vista que a impressão 3D vem se tornando um dos principais métodos de fabricação para protótipos diversos dentro da engenharia, através do seu baixo custo de implementação e capacidade de produzir geometrias complexas, juntamente com que é prevista uma menor abrasão para o rotor em relação ao casco da bomba, surge a pergunta:

**Como avaliar a viabilidade de um rotor de discos fabricado em material termoplástico, por simulação computacional, para o bombeamento de fluidos abrasivos?**

## 1.2 Justificativa

O desgaste dos componentes internos das bombas é um grave problema de manutenção, como descreve Heng *et al.* (2022). Nesse cenário de intenso desgaste e falha, o rotor de discos é aplicado como alternativa, como também apontado pelo autor.

A possibilidade, bem como as vantagens, de se projetar e iterar utilizando um método relativamente rápido e pouco custoso como a impressão 3D, descrita por Pîrjan (2013), quando comparada a outras aplicações, apresenta-se como uma solução benéfica para os setores de projeto, e por conseguinte, para a produção e manutenção no geral.

Rotores industriais convencionais são fabricados em materiais de alta resistência à abrasão, entre diferentes ligas especiais, conforme ElJersifi *et al.* (2021), o que eleva os custos de fabricação e manutenção dos equipamentos. A alteração geométrica da peça, unida a um material de custo reduzido em relação aos de alta resistência, torna a proposta alternativa de Figueira Jr. (2017) interessante do ponto de vista econômico e de manutenção.

Definidas as características do modelo a ser desenvolvido e investigada a dependência do material, outros estudos podem ser elaborados, explorando otimizar a geometria e a fabricação, a partir da validação deste experimento.

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Geral

Avaliar a viabilidade de um rotor de discos fabricado em material termoplástico para o bombeamento de fluidos abrasivos por simulação computacional, através da coleta de dados acerca de seu desempenho estrutural.

#### 1.3.2 Específicos

- Realizar fundamentação teórica acerca de bombas centrífugas, rotores e métodos computacionais;
- Elaborar o procedimento metodológico por meio de *software* de simulação computacional CFD;
- Projetar o modelo CAD de rotor de discos a ser simulado;
- Estipular as condições de operação para simular computacionalmente o desempenho hidráulico do rotor e seu desgaste erosivo;
- Simular a interação fluido-estrutura do dispositivo para avaliar sua resposta estrutural;
- Verificar se os resultados viabilizam a utilização de material termoplástico para a aplicação proposta.

### 1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho é segmentado em cinco capítulos com objetivos particulares. O primeiro refere-se à pergunta problema, a justificativa e os objetivos em análise.

A seguir, o segundo capítulo aborda uma revisão dos principais conceitos de bombas centrífugas, contemplando seu princípio de funcionamento, bem como o comportamento dos particulados abrasivos. Além disso, também avalia a utilização dos rotores para bombeamento de fluido abrasivo, baseado na patente de Nikola Tesla.

Dessa forma, o terceiro capítulo discute a metodologia aplicada para a realização do trabalho, contemplando os métodos de modelagem empregados, o funcionamento da simulação e suas condições de contorno, ao passo que investiga o comportamento do desempenho obtido.

Logo após, o quarto capítulo apresenta os resultados e discussões da pesquisa, por meio de gráficos, expondo o comportamento observado e possíveis melhorias para otimização do projeto.

Por fim, o quinto capítulo traz um resumo geral e as conclusões do estudo, encerrando as discussões e explicitando as considerações apresentadas nos testes.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Bombas centrífugas

As bombas desempenham um papel fundamental no transporte de fluidos, com uma ampla variedade de aplicações industriais e civis, sendo essenciais em setores como abastecimento de água, irrigação, mineração, indústria química e petrolífera segundo Girdhar e Moniz (2004). De acordo com os autores, entre os diferentes tipos disponíveis, as bombas centrífugas se destacam por sua ampla aceitação industrial, devido à simplicidade construtiva, eficiência elevada e facilidade de manutenção.

Çengel e Cimbala (2012, p 647) definem uma bomba como sendo uma “máquina de fluido que adiciona energia a um fluido”, transformando energia cinética em potencial. São componentes básicos das bombas centrífugas: eixo, mancal, rotor e carcaça (ÇENGEL E CIMBALA, 2018).

O rotor acelera o fluido, adquirindo assim energia cinética enquanto a carcaça converte a energia cinética do líquido em pressão, de modo a aumentar a velocidade e pressão do fluido na saída da bomba (MACINTYRE, 2008).

A Figura 1 destaca o formato de voluta, característico das carcaças das bombas centrífugas, como descrito por Çengel e Cimbala (2018). Observa-se também o sentido de escoamento do fluido dentro da carcaça.

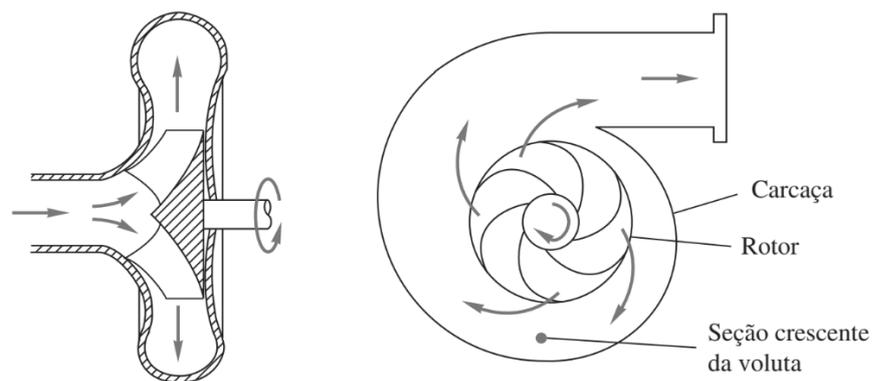


Figura 1 – Desenho esquemático de uma bomba centrífuga.  
Fonte: White (2011, p. 763).

Observa-se, na Figura 1, que o fluido entra pelo centro do arranjo e é acelerado nos sentidos radial e tangencial pela ação do impelidor. O fluxo então é direcionado para a voluta, que por sua vez desacelera o fluido e aumenta sua pressão, e por fim para o duto de saída (WHITE, 2011).

O desempenho de uma bomba é uma relação entre a sua vazão ( $Q$ ) e sua carga ( $H$ ). Essas duas grandezas são relacionadas em uma curva característica (ou de fornecimento, ou de desempenho), que é comparada à curva do sistema, apresentada na Figura 2 (ÇENGEL E CIMBALA, 2018).

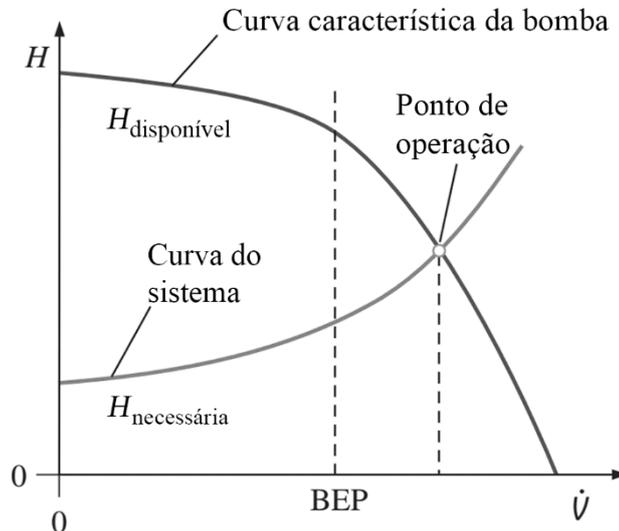


Figura 2 – Exemplo de uma curva característica.  
Fonte: Çengel e Cimbala (2018, p. 798).

É possível observar na Figura 2 que a vazão de uma bomba aumenta ao passo que a carga necessária diminui. Os pontos de encontro da curva com os eixos vertical e horizontal indicam respectivamente a carga máxima e a vazão máxima (chamada de fornecimento livre) que a bomba pode fornecer (ÇENGEL E CIMBALA, 2018).

Çengel e Cimbala (2018) explicam que a carga produzida por uma bomba não é uma constante, variando conforme a vazão, assim como sua eficiência. Os fabricantes desses equipamentos dispõem de tabelas e gráficos que apresentam essa variação.

Ainda segundo os autores Çengel e Cimbala (2018), a eficiência de uma bomba se mostra satisfatória para um determinado intervalo de vazão e de carga. Assim, conforme os autores, para uma certa necessidade de carga e de vazão, uma bomba deve ser escolhida se sua eficiência for satisfatória dentro dos parâmetros dados.

Uma bomba instalada em um sistema de tubulação opera no ponto em que há o encontro entre a curva de sistema e a curva característica. Tal ponto de intersecção é denominado ponto de operação, apresentado na Figura 3 (ÇENGEL; CIMBALA, 2018).

Fox e McDonald (2014) explicam que o ponto de operação ocorre na intersecção entre as curvas do sistema e de desempenho da bomba. Segundo os autores, o ponto intersecção é a única condição em que as vazões e as alturas de carga de ambos se igualam simultaneamente.

A Figura 3 apresenta uma curva característica típica de bombas centrífugas, que relaciona altura manométrica e vazão.

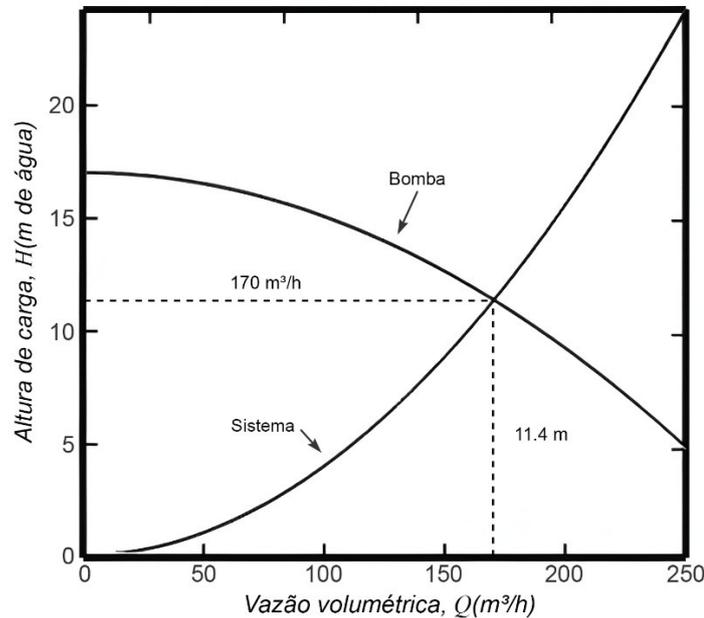


Figura 3 – Exemplo de curva característica.  
Fonte: Fox e McDonald (2014, p. 700).

A carga útil produzida pela bomba no momento em que as linhas se cruzam coincide com a requisição de carga do sistema para a vazão correspondente, assim como a eficiência da bomba é correspondente a essa vazão, como se observa no exemplo da Figura 3. Além dessas duas grandezas, é interessante avaliar também potência e a carga útil de sucção (NPSH) (ÇENGEL E CIMBALA, 2018).

Como discutido anteriormente, o funcionamento das bombas centrífugas envolve o fornecimento de energia ao fluido por meio de um rotor, um elemento girante conectado a um eixo, conforme apontado por Çengel e Cimbala (2018). Sendo esse, o componente diretamente responsável pela transferência de energia ao fluido em bombas centrífugas. A seguir, são apresentadas as principais características dos rotores, suas variações construtivas, bem como suas implicações no desempenho hidráulico das bombas.

## 2.2 Rotores

Também chamado de impelidor ou propulsor, o rotor trata-se do elemento girante que promove a aceleração radial ao fluido, conforme Çengel e Cimbala (2018). O rotor ao girar em alta velocidade, impulsiona o fluido em direção à carcaça da bomba, elevando sua pressão à medida que é deslocado, enquanto o vácuo parcial, que surge, permite a sucção contínua de mais fluido pela entrada (GIRDHAR E MONIZ, 2004).

O desempenho hidráulico da bomba é então fortemente associado às características geométricas e construtivas do rotor, conforme Girdhar e Moniz (2004). Dentre elas, existem diferentes tipos convencionais aplicados em bombas centrífugas, são ilustrados na Figura 4.

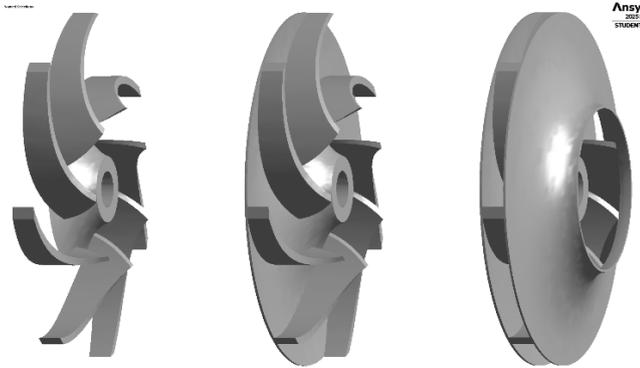


Figura 4 – Tipos de rotores.  
Fonte: Adaptado de Girdhar e Moniz (2004).

Como pode ser observado na Figura 4, rotores podem ser classificados entre abertos, semi-abertos ou fechados, dependendo da presença de tampas e carenagens. As geometrias são selecionadas conforme as características do processo e fluido ser bombeado (GIRDHAR E MONIZ, 2004).

O desgaste dos impelidores de bombas devido à presença de particulados abrasivos é um problema significativo no sentido da manutenção em indústrias, em que os componentes estão sujeitos a condições de operação severas conforme Aiming *et al.* (1995). Conforme o autor, o desgaste promove a perda de componentes, eleva os custos de manutenção, além de ocasionar paradas na produção. A Figura 11 apresenta um exemplo de rotor desgastado.



Figura 5 – Desgaste em impelidor após 3 meses.  
Fonte: Llewellyn *et al.* (2004, p. 593).

Como pode se observar na Figura 11, os equipamentos apresentam desgaste severo. Esse fenômeno, para Aiming *et al.* (1995), é influenciado por diferentes fatores, incluindo características do material de fabricação, da geometria do impelidor, da polpa abrasiva além

das condições operacionais. Assim, o desgaste é resultado do efeito combinado entre a erosão mecânica, causada por impacto, e a abrasão das partículas sólidas, bem como a corrosão química em função dos compostos corrosivos presentes no fluido (AIMING ET AL., 1995).

Dentre os materiais selecionados para essas aplicações, os de maior dureza como os ferros brancos com alto teor de cromo são aplicados segundo Llewellyn *et al.* (2004). O autor aponta ainda para a presença de carbonetos de alta dureza em microestruturas avaliadas, que proporcionam maior resistência ao desgaste. Ainda segundo Aiming *et al.* (1995), o desgaste dos rotores se dá de maneira não uniforme, variando de uma região para outra, devido a diferença entre ângulos de impacto e diferentes padrões de fluxo.

Macintyre (2008) descreve o desempenho dos impelidores através do triângulo das velocidades, apresentado na Figura 5. Essa representação mostra as direções e sentidos dos vetores de velocidade conforme as condições geométricas das pás.

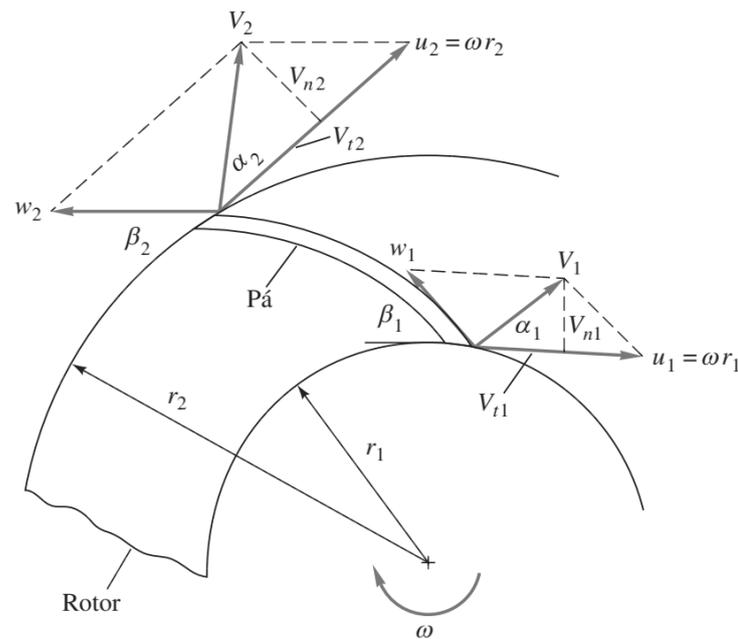


Figura 6 – Diagrama de velocidades.  
Fonte: White (2011, p. 765).

A Figura 5 apresenta os vetores nos pontos de entrada e saída, sendo:

- V: vetor velocidade do movimento absoluto;
- U: vetor velocidade do arrastamento, ou, vetor velocidade circunferencial;
- W: vetor velocidade relativa;
- $\alpha$ : o ângulo formado entre o vetor velocidade absoluta (V) e o vetor velocidade circunferencial (U);

- $\beta$ : o ângulo formado entre o vetor velocidade relativa ( $W$ ) e o prolongamento em sentido oposto do vetor velocidade circunferencial ( $U$ ). Sendo esse ângulo também conhecido como ângulo de inclinação das pás.

Macintyre (2008) desenvolve a relação entre a geometria das pás e a eficiência energética de uma bomba. Segundo o autor, o valor máximo de  $H$  obtido ocorre quando o ângulo  $\alpha_1$  é igual a  $90^\circ$ , enquanto  $\beta_1$  é igual à razão entre  $V_1$  e  $U_1$ . Dessa forma, os ângulos de saída das pás determinam a altura manométrica esperada do equipamento.

A teoria de triângulos de velocidades não se aplica ao rotor de discos patenteado por Tesla (1913), ilustrado na Figura 6, pois diferentemente dos impelidores convencionais, conforme o autor, trata-se de um rotor sem pás, em que o fluido adquire energia através de suas forças viscosas.

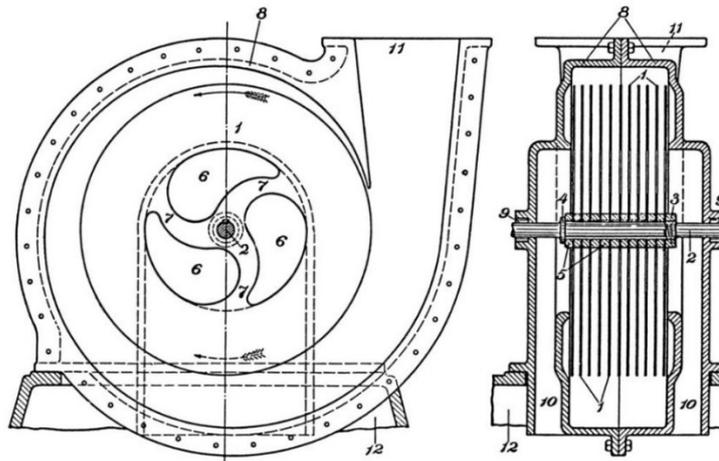


Figura 7 – Bomba de Tesla.  
Fonte: Tesla (1913, p. 1).

A Figura 6 apresenta o dispositivo desenvolvido por Tesla (1913), que permite movimentar o fluido por um caminho com menor turbulência, haja visto a ausência de impacto direto com lâminas. Tal comportamento fluido mecânico é explicado pelo fenômeno da camada limite viscosa entre os discos, que promove o arraste do fluido (TESLA, 1913).

A presença da parede gera uma redução gradativa na velocidade do escoamento, sendo esta, zero na superfície de contato, caracterizando o fenômeno da condição de não escorregamento (FOX E MCDONALD, 2014).

A Figura 7 ilustra o perfil de velocidade do fluido.

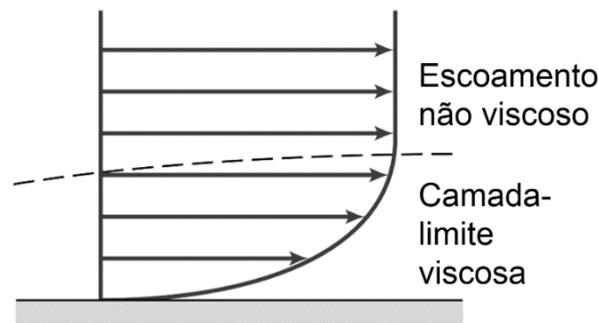


Figura 8 – Esquema de uma camada-limite.  
Fonte: Fox e McDonald (2014, p. 71).

Observa-se, na Figura 7, que os vetores de velocidade tendem à zero à medida que se aproximam das paredes. A influência da parede possui uma zona limite de atuação, denominada camada-limite, conforme descrevem Fox e McDonald (2014). Abaixo dessa linha, ilustrada em pontilhado na Figura 7, o fluido sofrerá influência da parede em seu escoamento, enquanto para além dessa camada o fluido não mais terá velocidade reduzida, podendo atingir a velocidade máxima do escoamento (ÇENGEL e CIMBALA, 2018).

Segundo Fox e McDonald (2014, p. 68): “Podemos estimar se as forças viscosas são ou não desprezíveis em comparação com as forças de pressão pelo simples cálculo do número de Reynolds”. O número de Reynolds é dado pela Equação 1:

$$Re = \frac{\text{Forças inerciais}}{\text{Forças viscosas}} = \frac{V D}{\nu} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (1)$$

Em que:

- $Re$  = Número de Reynolds (adimensional);
- $V$  = Velocidade média de escoamento (m/s);
- $D$  = Comprimento característico da geometria, em um tubo seria o diâmetro (mm);
- $\nu$  = Viscosidade cinemática do fluido ( $m^2/s$ );
- $\mu$  = Viscosidade dinâmica.

Ainda segundo Fox e McDonald (2014), é possível caracterizar o comportamento do escoamento para cada intervalo de valores:

- $Re \leq 2300$  caracteriza um escoamento laminar;
- $2300 < Re < 4000$  caracteriza um escoamento de transição;
- $Re \geq 4000$  caracteriza um escoamento turbulento.

Anselmi *et al.* (2022) descreveram a bomba de Tesla uma turbo-máquina ausente de pás, conhecida por sua maior resistência nos trabalhos com fluidos de difícil bombeamento,

graças ao seu princípio de funcionamento via forças viscosas. O mesmo autor relata ainda que a bomba consiste em discos lisos, paralelos e coaxiais em um eixo, arrançados de modo que haja um espaçamento entre eles. Tal dispositivo impelidor é montado em uma carcaça com poucas folgas nos sentidos radial e axial.

A Figura 8 ilustra o sentido de entrada do fluido no rotor, que entra através dos orifícios próximos ao eixo e logo sai através da voluta na carcaça da bomba (TESLA, 1913).

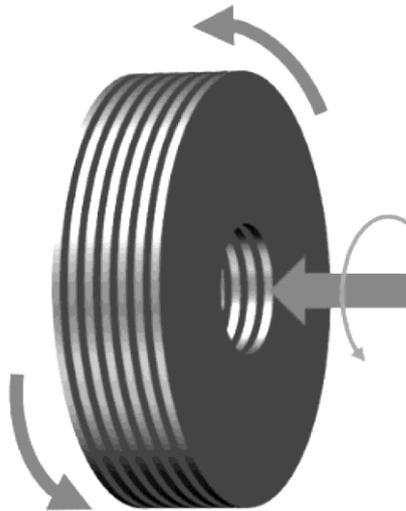


Figura 9 – Sentido de fluxo no rotor de discos.  
Fonte: Heng *et al.* (2022, p. 2).

Nesta configuração, ilustrada na Figura 8, não há necessariamente uma colisão das pás com o fluido, mas sim uma transmissão laminar, sem pulso. Além disso, a bomba ainda é menos suscetível ao fenômeno da cavitação. (ANSELM ET AL. APUD PACELLO E HANAS, 2022).

Ainda segundo Anselmi *et al. apud* Foster (2022), dentre as diversas aplicações possíveis, algumas das mais favoráveis a este modelo são o bombeamento de sangue, dado que o princípio de trabalho possibilita manter a qualidade do sangue, bombeamento de fluidos de múltiplas fases, como extração de petróleo em alto mar ou remoção de lama dos fundos dos rios e o trabalho com fluidos compressíveis, funcionando assim como um compressor, as aplicações com fluidos supercríticos como o CO<sub>2</sub> (ANSELM ET AL. APUD BURN ET AL., 2022).

As Figuras 9 e 10 exibem os vetores de velocidade entre os discos do rotor, observados por Oliveira (2022) em seu estudo com diferentes espaçamentos entre discos.

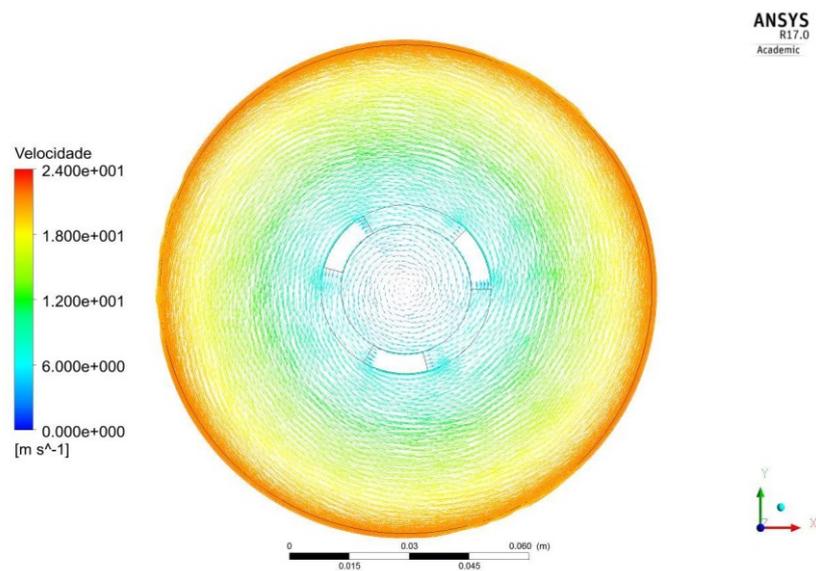


Figura 10 – Vetor de velocidades próximo à parede do rotor.  
Fonte: Oliveira (2022, p. 34).

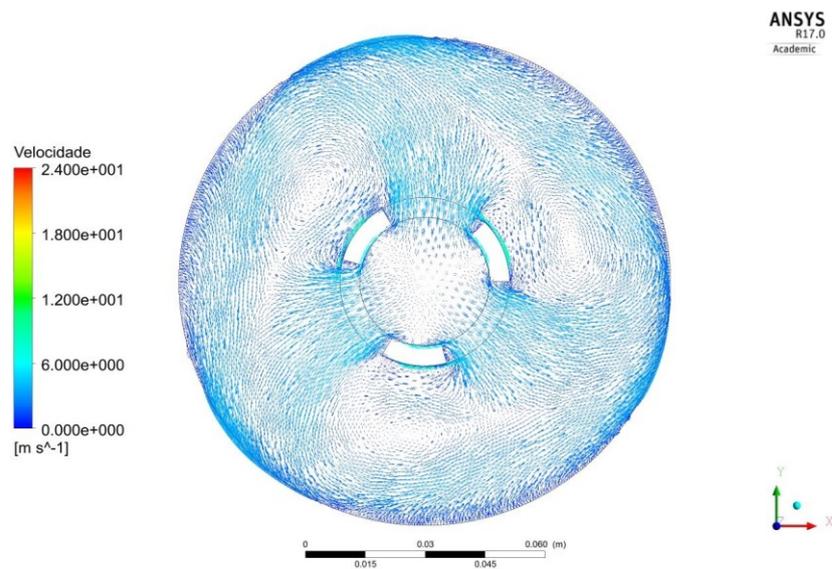


Figura 11 – Vetores de velocidade em um plano entre as duas paredes do rotor de 5 mm.  
Fonte: Oliveira (2022, p. 36).

Nas Figuras 9 e 10, observam-se maiores velocidades absolutas para o fluido aderido às paredes do propulsor e menores velocidades entre discos. Além disso, Oliveira (2022) concluiu que as velocidades internas são maiores para o menor espaçamento entre os discos, dentre as geometrias estudadas.

Dado que a geometria dos rotores pode ser aprimorada, com o intuito de se extrair velocidades de escoamento distintas, conforme abordado por Oliveira (2022), torna-se evidente a possibilidade de iterar e testar diferentes configurações geométricas. Nesse sentido, a manufatura aditiva, cuja aplicação será tratada no tópico seguinte, surge como uma ferramenta promissora para a fabricação de protótipos funcionais.

### 2.3 Prototipagem por impressão 3D

Segundo Zapparoli (2019), a impressão 3D é benéfica no sentido da concepção do projeto, este método permite a confecção de geometrias diversas, inclusive a consolidação de componentes ociosos em uma única peça. Tais vantagens, segundo o autor, viabilizaram diversas reduções de custos, em especial para as aplicações em pequena escala, por se tratar de um método que dispensa moldes, agilizando assim possíveis testes e ensaios durante a concepção de projetos.

A manufatura aditiva, para Wong e Hernandez (2012), consiste em conceber sólidos a partir de desenhos digitais. Os autores apontam que os *softwares* utilizados para a manufatura segmentam os modelos 3D em finas camadas horizontais, sendo assim criadas várias seções transversais do objeto que se deseja fabricar. Essa informação é então transmitida para a impressora, que reproduz as camadas de desenho, uma sobre a outra (ZHENG ET AL., 2021).

Diferentes métodos de fabricação se incluem no campo da manufatura aditiva, que se diferem nos métodos em que as camadas de material são depositadas durante a impressão das peças. A ASTM (2010), ou Sociedade Americana de Testes e Materiais, classificou esses diferentes padrões em 7 categorias, além de suas subdivisões, sendo:

1. Fotopolimerização (*Vat Photopolymerisation*):
  - a) Estereolitografia;
  - b) Produção Contínua em Interface Líquida.
2. Jateamento de material;
3. Jateamento de aglutinante;
4. Extrusão de material:
  - a) Modelagem por Fusão e Deposição;
  - b) Fabricação por filamento fundido.
5. Fusão em leito de pó:
  - a) Sinterização Seletiva a Laser.
6. Laminação de folhas;
7. Deposição de energia dirigida.

A Figura 12 ilustra os componentes de um sistema de impressão FDM, um dos tipos mais comuns e difundidos.

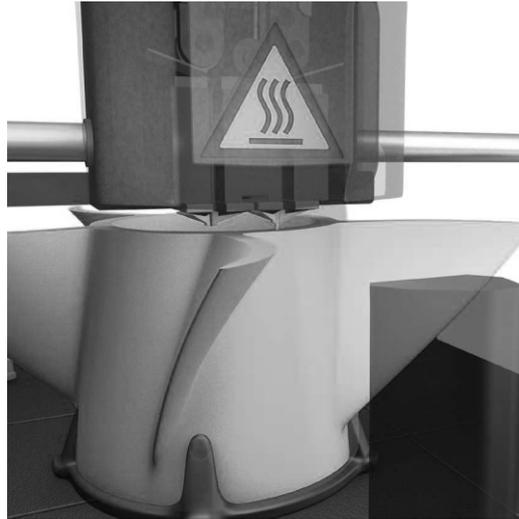


Figura 12 – Impressora 3D tipo FDM.  
Fonte: Hiemenz (2011, p. 1).

A Figura 12 apresenta os elementos básicos de um sistema de impressão do tipo FDM, sendo eles: o bico que deposita o material, a peça durante o processo de impressão, o cabeçote da impressora e a mesa ou base da impressora, sob a qual a peça é sustentada (HIEMENZ, 2011).

Nesta tecnologia, segundo Wong e Hernandez (2012), um filamento de plástico é direcionado a um bocal, capaz de controlar o fluxo de material. O bocal possui a capacidade de aquecer e derreter o material, e é movimentado no espaço por um mecanismo de movimentação cartesiano tridimensional. Conforme descrito pelos autores, o controle da posição se dá por meio do sistema CNC ou controle numérico computadorizado, que se comunica com um *software* de manufatura assistida por computador (CAM).

O objeto é produzido pela deposição do material plástico fundido, que forma camadas à medida que o torna rígido após extrudado pelo bocal. Entre os materiais mais comuns usados para este processo estão os plásticos (PIRJAN; PETROSANU, 2013).

Para Wong (2012), a manufatura aditiva permite a fabricação de peças leves, que possam substituir materiais pesados, mantendo características físicas e de resistência. Além disso, também possibilita a produção de peças que tradicionalmente seriam impossíveis dada a complexidade geométrica.

Segundo Pirjan (2013), as vantagens da impressão 3D se dão por diversas frentes, na criação de formas complexas que são impossíveis de serem obtidos com qualquer outro método de fabricação, na redução de desperdícios, que utiliza somente o material necessário, em oposição a outras técnicas tradicionais subtrativas, possibilidade de se imprimir pequenas partes móveis, no design digital de fácil acesso, cópia, reprodução e compartilhamento via internet, possibilitando ainda acessos remotos, na automação do processo, que independe do operador.

Apesar de suas vantagens, vale salientar também que, o processo de impressão 3D ainda possui limitações. Berman (2012) descreve que a manufatura aditiva possui menor precisão dimensional se comparada a métodos tradicionais. O autor ainda salienta que para a produção em massa, o custo da impressão 3D é desvantajoso, não se beneficiando da economia de escala.

Para Pirjan (2013), a impressão 3D é ideal quando se necessita imprimir um pequeno número de objetos complexos, mas torna-se inviável imprimir muitos objetos simples, se comparados a técnicas de injeção tradicionais. Somado a isso, o custo de um objeto grande impresso em 3D é significativamente maior do que se tivesse sido fabricado tradicionalmente.

Para Zhang *et al.* (2019), apesar da desvantagem no sentido da economia de escala, a impressão 3D auxilia na prototipagem dos moldes a serem usados para as peças produzidas em massa. Ainda nesse sentido de desenvolvimento de produtos, o método dos elementos finitos é amplamente utilizado para teste e validação de componentes (AZEVEDO, 2003).

## 2.4 Método dos elementos finitos

Métodos computacionais são amplamente utilizados na engenharia, especialmente em estruturas, são aplicados para aferir o estado de tensões e deformações em sólidos, com diversas aplicações segundo Azevedo (2003). Conforme o autor, o método FEA (*Finite Element Analysis*) permite avaliar características e refinar modelos, com base em formulações de equilíbrio, deslocamentos, além de métodos de inicialização híbrida.

Conforme afirmado por Alves Filho (2013), o MEF permite avaliações de diversos comportamentos, dentre eles vibratórios, térmicos, estruturais, fluidodinâmicos, eletromagnéticos, entre outros. Nota-se que o método é integrado às tecnologias CAD (*Computer-Aided Design*), o que permite uma ampla aplicação em projetos mecânicos (ALVES FILHO, 2013).

No caso das análises estruturais, comumente se aplicam teorias de falha. Dentre elas, o critério de falha de *von Mises*, também chamado de critério de máxima energia de distorção, é utilizado para prever o início da plastificação em materiais dúcteis. A comparação entre a tensão de *von Mises* com a tensão de escoamento permite verificar se as tensões ultrapassam o limite crítico do material, incorrendo em falha (HIBBELER, 2013).

O FEA substitui o volume contínuo por uma soma de subdomínios, que correspondem aos elementos finitos. Podendo-se tratar de triângulos em análises realizadas em duas dimensões e tetraédricos em análises de três dimensões (AZEVEDO, 2003).

Segundo Gallagher (1975), o método se baseia na discretização, que divide meios contínuos em elementos descritos por equações diferenciais. *Softwares* facilitam a aplicação do

método, possibilitando a discretização do sólido em geometrias menores, ligadas em nós, que formam a malha. O refinamento dessa malha define a precisão do modelo computacional, bem como as condições de contorno. O refinamento dessa malha varia conforme o tamanho de cada elemento e tipos de elementos (ALVES FILHO, 2013).

Estudos acerca do comportamento de rotores e bombas centrífugas também se utilizam do método de elementos finitos, aplicado para diferentes análises. Peng *et al.* (2021) avaliaram o desgaste erosivo em bombas de polpa, a partir de simulações CFD. O trabalho descreveu uma relação entre o aumento do desgaste nas paredes do rotor a uma maior concentração de sólidos e uma menor velocidade do fluido. Essas observações dos autores são relevantes para embasar interpretações acerca dos dados coletados no presente trabalho, especialmente para os gráficos de distribuição das regiões de erosão no rotor.

No contexto da simulação computacional de escoamentos contendo partículas, a previsão de erosão pode ser realizada por meio de modelos consolidados na literatura, como o proposto por Finnie (1960). O modelo desenvolvido pelo autor se utiliza de parâmetros como ângulo de impacto, velocidade, e correlaciona a taxa de erosão com a energia cinética do impacto das partículas nas superfícies sólidas.

*Softwares* CFD como o Ansys Fluent incorporam essa ferramenta por meio do modelo de *Discrete Phase Model* (DPM), que permite rastrear partículas dentro do escoamento e estimar o desgaste a partir dessas correlações empíricas, conforme descrito na documentação do Fluent (ANSYS INC., 2024).

Considerando a dificuldade em prever com exatidão a expressão do fluxo próximo às paredes, o *software* também incorpora modelos de turbulência, desenvolvidos partindo das equações RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). São classificados, principalmente, entre modelos de viscosidade turbulenta (*eddy-viscosity*) e tensão de Reynolds (*Reynolds stress model*), todos usam funções de parede avançadas para modelagem do fluxo próximo a parede (ANSYS INC., 2024).

Existem intensos gradientes de velocidade próximos à parede, além dos efeitos de viscosidade. Durante a simulação se faz necessário contemplar esses efeitos, além da variação de fluxo que ocorre inserida na camada limite. A subdivisão de comportamentos da região próxima à parede é apresentada na Figura 13 (ANSYS INC., 2024).

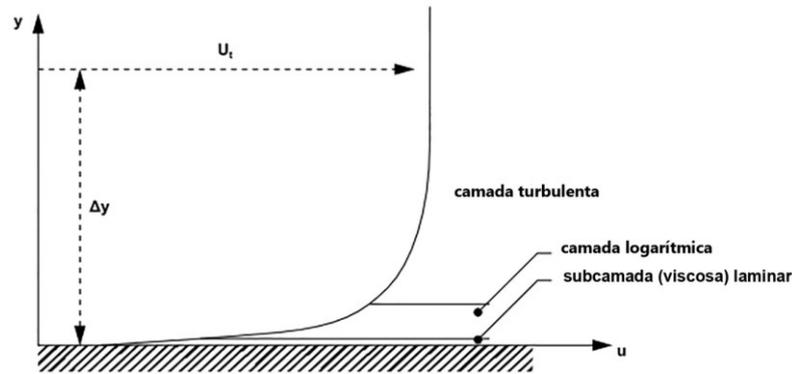


Figura 13 – Subdivisões da região próxima a parede.  
Fonte: Traduzido de ANSYS, Inc. (2024).

Como se observa na Figura 13, existem diferentes camadas próximas à parede. A subcamada viscosa, em que o fluxo se mantém laminar, possui maior predominância dos efeitos de viscosidade, enquanto a camada logarítmica apresenta maior predominância dos efeitos de turbulência (ANSYS INC., 2024).

Dentre os modelos de viscosidade turbulenta, o  $k-\omega$  SST incorpora efeitos de transporte na formulação da viscosidade turbulenta e é um modelo compatível com o método de resolução da camada limite por baixo número de Reynolds (Low-Reynolds-Number), quando utilizadas finas camadas de malha em direção à parede, desde modo apresenta maior robustez para a solução nas regiões próximas à parede, permitindo uma descrição mais precisa da camada limite turbulenta (ANSYS, 2024).

Estudos recentes, como o de Heng et al. (2022), analisaram o desempenho hidráulico de rotores de disco por meio de simulações numéricas validadas experimentalmente. Os autores realizaram simulações CFD com modelo de turbulência SST  $k-\omega$  e, para verificar se a malha resolvia corretamente os efeitos da camada limite na região do rotor, observaram valores de  $Y^+$  nas paredes do impelidor.

A variável  $Y^+$ , que será retomada nos capítulos seguintes, representa a distância da primeira camada de elementos da malha em relação à parede, sendo utilizada para indicar a adequada resolução da camada limite e a confiabilidade dos resultados numéricos, conforme apresentado por Heng *et al.* (2022). A Figura 14 apresenta os valores de  $Y^+$  observados pelos autores.

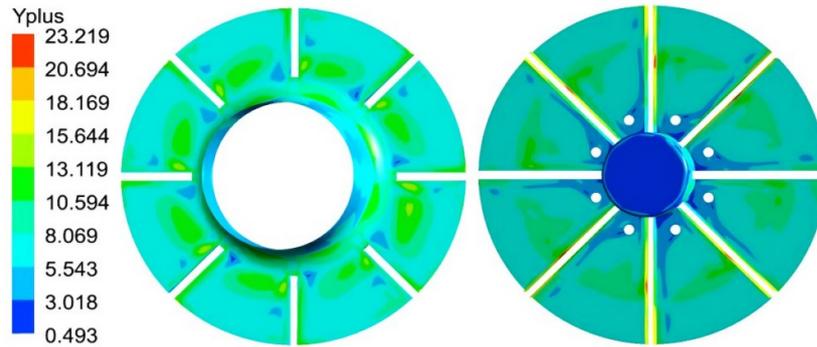


Figura 14 – Valores de  $Y^+$  no rotor da bomba.  
Fonte: Heng *et al.* (2022, p. 9).

Observa-se, na Figura 14, que as regiões destacadas em verde e em ciano representam os valores predominantes de  $Y^+$  em torno de 10, o que indica, segundos os autores Heng *et al.* (2022), resolução suficiente da camada limite, adequado ao modelo de turbulência escolhido e à simulação numérica proposta.

Vale notar ainda o estudo de Yuan *et al.* (2022), os autores utilizaram o método de interação fluido-estrutura acoplada unidirecional em diferentes tipos de impelidores. Os resultados observados pelos autores auxiliam a interpretação e validação dos gráficos de pressão no presente estudo. A Figura 15, apresenta o gráfico de pressão sob o rotor analisado por Yuan *et al.* (2022) em seu estudo de impelidores com pás.

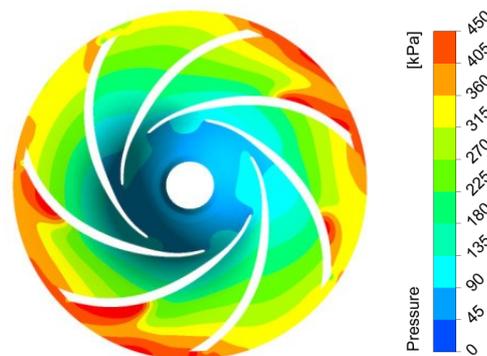


Figura 15 – Distribuição de pressão sob o impelidor.  
Fonte: Yuan *et al.* (2022, p. 10).

Observa-se, na Figura 15, que distribuição da pressão de fluido que atua sob o impelidor, se dá com regiões de menor pressão de fluido sob o centro, por onde o fluido entra, e de maior pressão nas bordas do rotor (YUAN ET AL., 2022).

Com base nos trabalhos discutidos neste capítulo, observa-se que os rotores de discos representam uma alternativa em aplicações com fluidos abrasivos, especialmente devido ao seu comportamento hidráulico. Estudos como os de Heng *et al.* (2022) demonstram a viabilidade do uso do propulsor de discos, que, unida as possibilidades de se empregar a manufatura aditiva,

abrem caminho para a prototipagem de diferentes otimizações geométricas do dispositivo impelidor, tornando a avaliação proposta neste trabalho promissora.

As abordagens anteriores também evidenciam a importância da avaliação estrutural, bem como do desgaste por sólidos em suspensão nos impelidores submetidos a polpas abrasivas, aspectos que fundamentam a metodologia adotada e justificam a modelagem numérica desenvolvida nos capítulos seguintes.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Tipo de pesquisa

Creswell (2021) apresenta que a pesquisa se baseia em um planejamento, que inclui o detalhamento das etapas, dos procedimentos, das propostas e das interpretações. O autor então conclui que tal planejamento permite traçar o melhor caminho pelo qual será trilhada a pesquisa.

Segundo Gil (2022), a pesquisa é um procedimento racional que objetiva a busca por respostas a um tema proposto. Tal procedimento se dá no momento de escassez de informações de uma pergunta problema ou de desordem das mesmas. Lakatos e Marconi (2021) descrevem a atividade de pesquisa uma investigação a partir do emprego do método científico, no sentido da busca por respostas às questões tema.

Para Gil (2019), uma pesquisa pode ainda ser subdividida entre qualitativa e quantitativa. A pesquisa qualitativa aborda um tema pela perspectiva da subjetividade e da influência das variáveis envolvidas, enquanto a pesquisa quantitativa avalia aspectos numéricos, quantificando as variáveis e utilizando métodos estatísticos.

No que diz respeito aos objetivos gerais, uma pesquisa exploratória busca o aprimoramento de ideias e construção de hipóteses. Por outro lado, a pesquisa descritiva almeja identificar características de um dado tema e relacionar suas respectivas variáveis. Por último, a pesquisa de caráter explicativo objetiva determinar os fatores que causaram o fenômeno observado, bem como suas contribuições (GIL, 2022).

Lakatos e Marconi (2021) apresentam que, de modo geral, as ciências utilizam diferentes procedimentos técnicos para a análise de seus objetivos. Segundo os autores, uma pesquisa pode ser de caráter bibliográfica, documental, experimental, de levantamento, estudo de campo, estudo de caso, ex-post-facto e pesquisa-ação.

Ainda segundo os autores Lakatos e Marconi (2021), a pesquisa bibliográfica se baseia em fontes como livros, artigos científicos, teses, entre outras publicações. Segundo Gil (2022), a pesquisa experimental se baseia na definição de parâmetros e condições de contorno, para então serem manipuladas as variáveis de influência no fenômeno e observados os resultados em um ambiente controlado.

Diante disso, este trabalho possuirá caráter bibliográfico e experimental. Já que parte de uma breve revisão bibliográfica acerca dos conhecimentos afins, para então simular computacionalmente a hipótese levantada.

Além disso, também se classifica como uma pesquisa exploratória, visando apresentar o estudo do comportamento de um dispositivo, ainda, uma pesquisa mista, pois propõe avaliar

a influência tanto quantitativa quanto qualitativa de variáveis como altura manométrica, pressão nas superfícies, bem como seu aparente desgaste.

### 3.2 Materiais e métodos

Para a análise do comportamento do dispositivo é utilizado o *software* Ansys Workbench, cujos modelos são estabelecidos a fim de concluir acerca do desempenho do material de fabricação do dispositivo. Assim sendo, a Figura 16 ilustra a estratégia de solução a ser seguida para a realização da pesquisa.

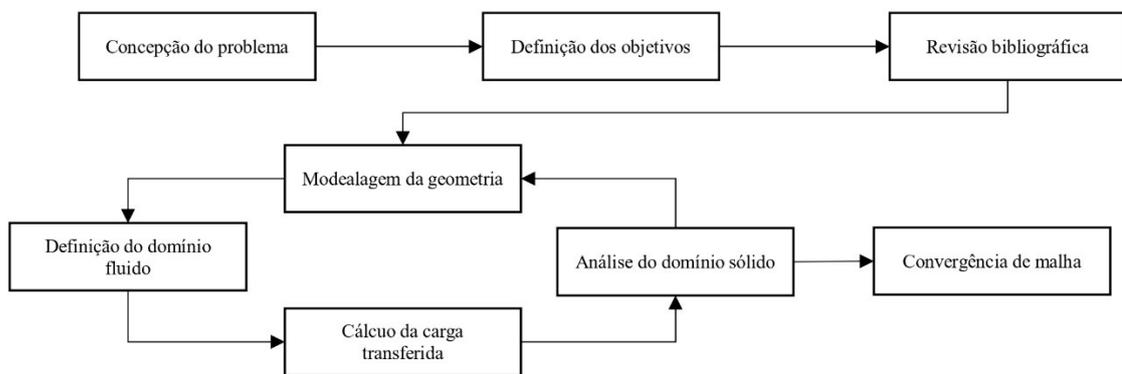


Figura 16 – Fluxograma das etapas realizadas na pesquisa.  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Este trabalho funciona em uma série de experimentos computacionais, como ilustrado na Figura 16, até que se possa ter uma conclusão clara. Nesse sentido, o trabalho se dá nas seguintes etapas:

- Modelagem da geometria: é definida, a partir das dimensões da carcaça da bomba e das condições geométricas, buscando um melhor desempenho fluidodinâmico, a geometria a ser avaliada;
- Simulação: é realizada a simulação computacional em regime estacionário do componente, bem como suas possíveis variações;
- Obtenção de dados: após a realização das simulações, são feitas as leituras dos dados coletados;
- Análise de dados: a partir dos gráficos, tabelas e observações feitas, é realizada a análise e conclusão acerca do experimento.

A rotina da simulação instruída ao software Ansys Workbench é organizada na janela de “Project Schematic” do *software* conforme apresentado na Figura 17.

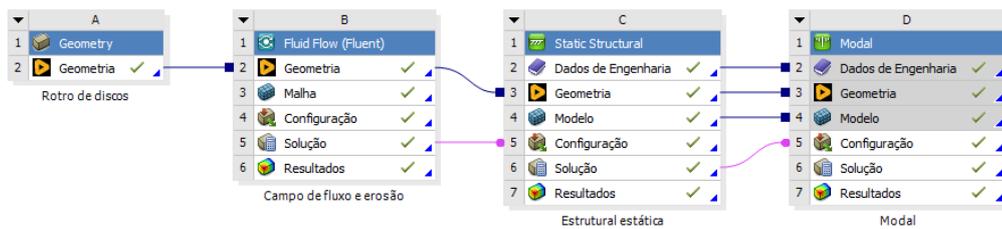


Figura 17 – Montagem do estudo.  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Na Figura 17 é apresentada a sequência de solução realizada pelo *software*, composta por três etapas, em que são definidas as condições de contorno, propriedades dos materiais, bem como modelos físicos para cada tipo de análise.

A primeira etapa consiste na simulação do campo de fluxo, resolvido com inicialização híbrida, em que diferentes métodos de interpolação resolvem equações de Laplace, com 500 iterações até atingirem um baixo nível de erro, para determinar os campos de pressão e de velocidade, que então carrega a análise estrutural estática, para determinar a resposta estrutural do domínio sólido à pressão do campo de fluxo.

As tensões estruturais requeridas por sua vez são carregadas para a análise modal, que se utiliza da massa e da rigidez para se encontrar as frequências de vibração naturais do componente. Assim, o sequenciamento proposto possibilita determinar resposta estrutural do rotor ao campo de escoamento.

### 3.2.1 Geometria do impelidor

A modelagem CAD 3D do rotor é concebida considerando-se dimensões adequadas para acoplamento em bomba centrífuga. A Figura 18 apresenta o modelo, que conta com diâmetro de 97,50 mm e é projetado com distância de 2,5 mm entre discos.

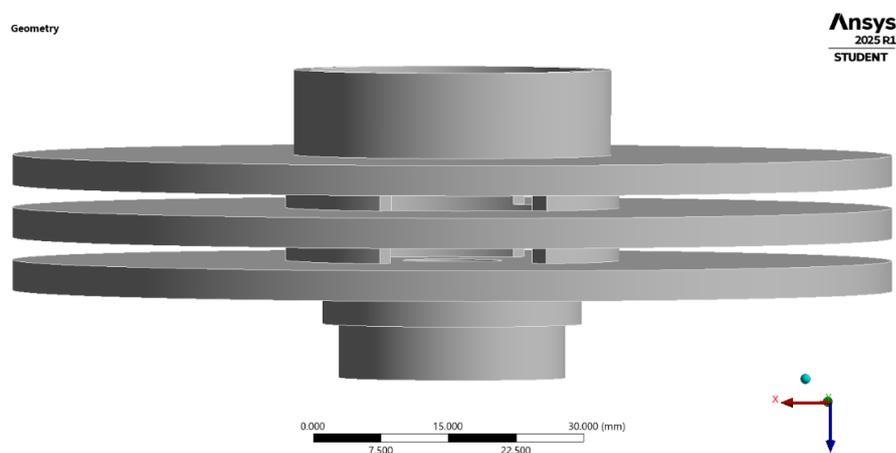


Figura 18 – Vista lateral do rotor.  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Para se avaliar o comportamento do impelidor, ilustrado na Figura 18, é desenvolvido o método computacional através do *software* Ansys Workbench, com abordagem de suas condições operacionais esperadas, incluindo simulações de desempenho hidráulico, comportamento estrutural, bem como desgaste, aplicando-se o método dos elementos finitos.

### 3.2.2 Simulação fluidodinâmica

O modelo consiste em simular o comportamento do fluido ao redor do impelidor e aplicar uma interação fluido-estrutura (FSI). Inicialmente é simulado o comportamento fluidodinâmico, em regime estacionário, através do *software* CFD Ansys Fluent, para se avaliar a altura manométrica atingida pelo conjunto, bem como capturar a distribuição de pressão nas paredes do rotor exercida pelo fluido sendo bombeado. As condições de contorno estipuladas são dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Configuração para simulação numérica.

Condições de contorno	Configuração
Fluido	Água líquida
Modelo de turbulência	k- $\omega$ (SST)
Pressão de operação	101,325 kPa
Aceleração da gravidade	9,81 m/s <sup>2</sup>
Pressão manométrica de entrada inicial	0 Pa
Vazão mássica de entrada	1,12778 kg/s
Pressão manométrica de saída inicial	0 Pa
Parede	Suave sem deslizamento
Interação fluido-estrutura	Pressão total
Velocidade angular do impelidor	3600 rpm

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Para a simulação fluidodinâmica, considera-se a geometria como sendo o domínio fluido no interior da bomba. O volume interno do propulsor foi preparado com uma malha de elementos de tamanho 1,5 mm, aplicando-se o processamento de *inflation* nas superfícies dos discos, com 16 camadas e taxa de crescimento de 1,2, para capturar o efeito da camada limite em resolução suficiente. A Figura 19 apresenta a malha aplicada ao volume interno do rotor de discos.

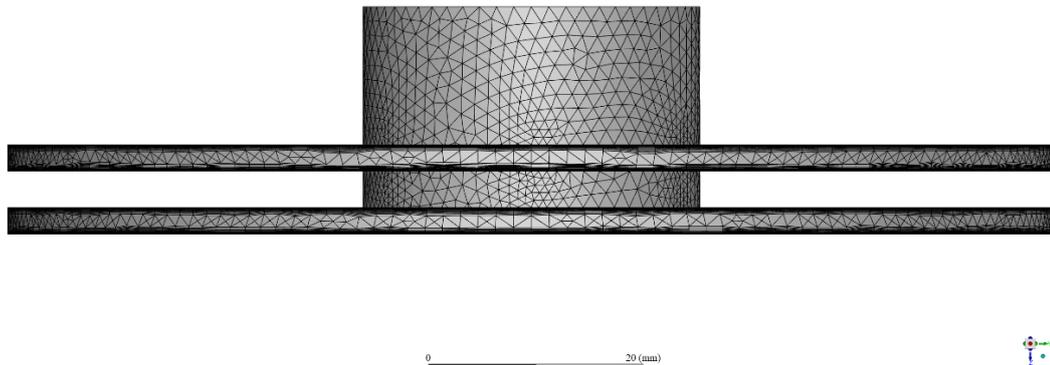


Figura 19 – Malha representativa do volume de líquido interno ao rotor.  
 Fonte: Pesquisa direta (2025).

Na figura 19, pode-se observar que a malha de volume interno de líquido no rotor possui maior concentração de elementos nas paredes, aplicada para resolução da camada limite viscosa. Água líquida é aplicada como fluido de trabalho a todas as regiões do modelo, visto que a geometria em questão corresponde ao volume de fluido interno à bomba.

O volume no interior do propulsor se movimenta em uma velocidade angular de 3600 rpm e o volume de fluido no interior da voluta é estacionário. Dessa forma, ambos os volumes e superfícies de entrada e saída são ilustrados na Figura 20.

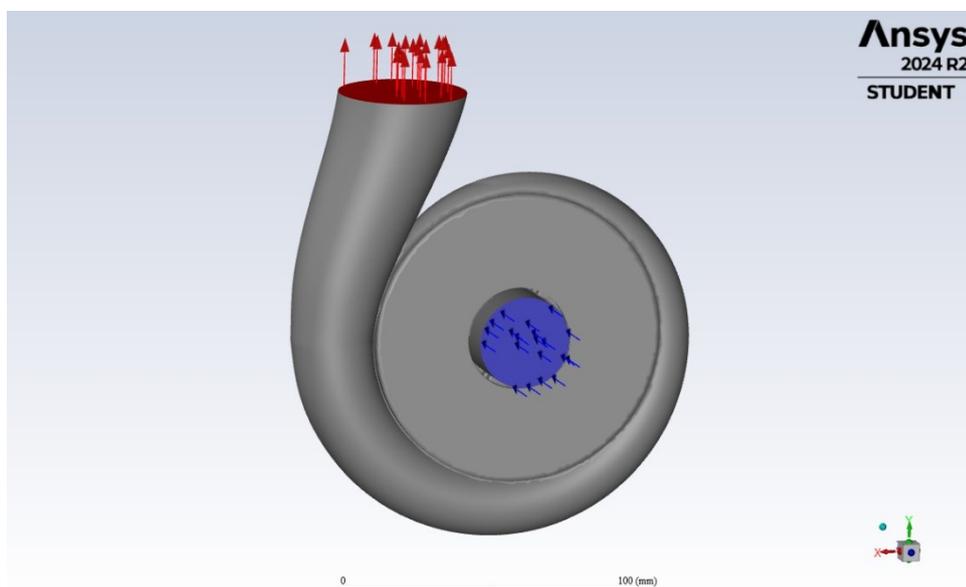


Figura 20 – Modelo 3D do domínio de fluido.  
 Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 20 apresenta o domínio de fluido em estudo, com destaque para as superfícies de entrada e saída da voluta, onde são indicados os vetores de direção e sentido de fluxo.

O campo de fluxo foi resolvido utilizando o modelo de turbulência “k-omega” (*shear-stress-transport*), a escolha do modelo se baseia em sua capacidade de capturar de forma precisa

os efeitos da camada limite e da viscosidade turbulenta, aspectos fundamentais para a análise do rotor de discos em questão.

A pressão manométrica de saída inicial é definida como 0 Pa, considerando assim a saída da voluta como uma abertura. A pressão manométrica de inicialização na entrada foi definida como 0 Pa, sendo essa a pressão estática utilizada para inicializar o campo de fluxo. adotando-se como referência a pressão atmosférica.

Essa abordagem permite aferir a variável de altura manométrica recalçada pela bomba, a partir do gradiente de pressão, para caso em questão de escoamento interno. A Equação 2 é utilizada, considerando a pressão total medida nas superfícies de entrada do rotor e saída da voluta.

$$h = \frac{\{P_{saída} - P_{entrada}\}}{998.2 \frac{kg}{m^3} \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}} \quad (2)$$

Em que:

- $h$  = Altura manométrica (m);
- $P_{saída}$  = Pressão total na superfície de saída da voluta (Pa)
- $P_{entrada}$  = Pressão total na superfície de entrada da voluta (Pa)

### 3.2.3 Interação fluido-estrutura unidirecional

Os resultados de pressão de fluido sob as paredes, obtidos através da simulação fluidodinâmica, são importados para a análise estrutural estática para se aferir a resposta do impelidor.

O material do impelidor é definido como plástico ABS, com uma densidade de 1030 kg/m<sup>3</sup>, limite de escoamento de 27,44 MPa e resistência à tração de 36,26 MPa, conforme a biblioteca do *software*. As configurações relacionadas a restrições e carga estrutural são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características físicas do rotor.

Parâmetros do rotor	Valores
Material do impelidor	Plástico ABS
Densidade	1030 kg/m <sup>3</sup>
Limite de escoamento	27,44 MPa
Resistência à Tração	36,26 MPa
Material do eixo	Aço estrutural

Fonte: Pesquisa direta (2025).

A carga de força centrífuga é gerada automaticamente com base na velocidade de rotação e a densidade do material. Para a configuração da velocidade de rotação, o sistema propulsor é configurado para girar a 3600 rpm. A aceleração da gravidade é configurada com um valor de 9806,6 mm/s<sup>2</sup>, na direção vertical para baixo.

A carga de pressão de fluido é obtida carregando-se os resultados da solução do campo de escoamento e transferindo-os para as superfícies do rotor através da interface de acoplamento unidirecional fluido-estrutura (FSI). A Figura 21 ilustra os carregamentos do domínio estrutural.

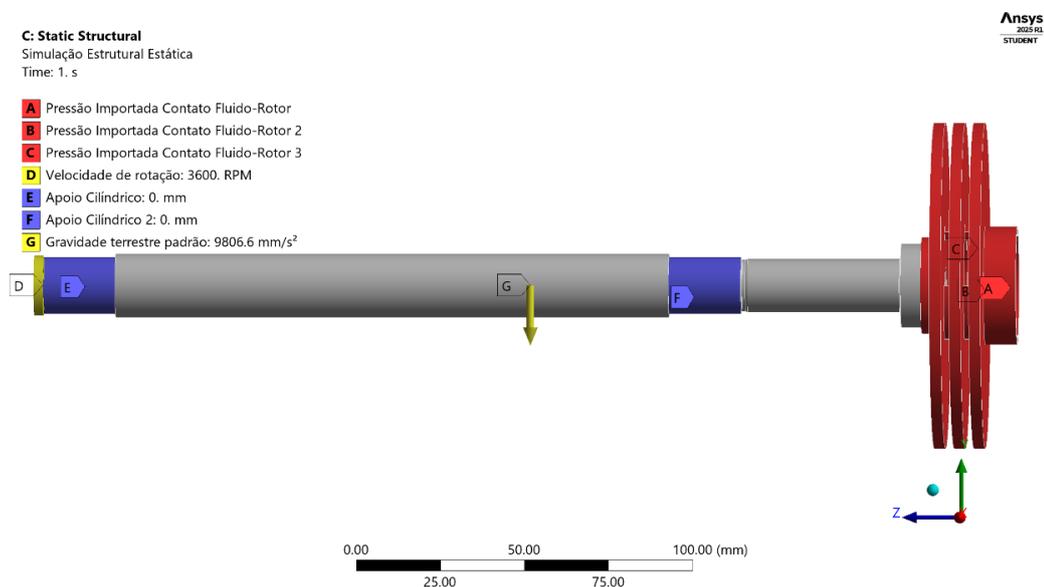


Figura 21 – Restrições e carregamentos aplicados ao rotor.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Nota-se na Figura 21 as regiões de fixação do eixo, bem como as superfícies de contato do impelidor sob influência da pressão de fluido, entre os demais carregamentos aplicados. As tensões e deformações obtidas da análise estática informam as condições de pré-carga para a análise modal, dado que a carga estática impacta a rigidez do sistema, afetando as frequências naturais.

Foram calculadas as frequências naturais dos primeiros modos de vibração e os padrões vibratórios correspondentes. Os padrões modais incluíram torção e oscilação ao longo do eixo rotor, com a análise verificando se as frequências naturais se situavam distantes das frequências de excitação operacional, evitando assim a ressonância.

### 3.2.4 Modelo de erosão

A presença de sólidos em suspensão no fluido foi abordada através do modelo de fluxo bifásico sólido-líquido (DPM – *discrete phase model*). O modelo DPM se adequa para o caso em que escoamento é diluído, com a baixa concentração de partículas, e considera a não criticidade das interações partícula-partícula.

Foram injetadas partículas de 1,45 mm de diâmetro, em distribuição uniforme, com uma vazão mássica de 0.0538 kg/s na face de entrada e com interação com fase contínua ligada, realizada a cada 10 iterações.

A simulação numérica foi aplicada para prever as trajetórias das partículas e a consequente erosão local, através dos modelos de erosão. O *software* possui diferentes modelos de previsão de erosão, incluindo os modelos de Finnie, Oka, McLaury e DNV. Cada modelo incorpora funções específicas para descrever a relação entre o impacto das partículas e o desgaste da superfície.

Vale notar que a capacidade preditiva dos modelos de erosão é limitada, tendo em vista que taxas de erosão relatadas por diferentes autores podem variar significativamente, em ordem de grandeza, para o mesmo material.

A erosão adimensional, descrita pelos modelos, representa a massa de material da parede erodida em razão da massa de partículas impactantes. No modelo Finnie (1960), adequado para materiais dúcteis, o cálculo da taxa de erosão se dá pela Equação 3:

$$E = k V_p^n f(\gamma) \quad (3)$$

Em que:

- E = massa de erosão adimensional;
- k = constante empírica do modelo
- $V_p$  = velocidade de impacto das partículas [m/s];
- n = expoente de velocidade dependente do material;
- $f(\gamma)$  = função adimensional do ângulo de impacto  $\gamma$  [radianos].

O *software* interpreta a erosão adimensional multiplicada pelo fluxo de massa das partículas e dividida pela área local da face. Os valores adotados de densidade e demais constantes aplicadas na simulação de partículas são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Configuração para simulação numérica

<b>Parâmetros da Simulação</b>	<b>Valores</b>
Densidade da partícula erosiva	3170 kg/m <sup>3</sup>
Diâmetro da partícula	1.45 mm
Vazão mássica das partículas	0,0538 kg/s
Formato das partículas	Esfera uniforme
Expoente de velocidade	2,53
Constante (k)	$2.73 \times 10^{-8}$

Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 22 apresenta a função do ângulo de impacto, juntamente com o expoente de velocidade.

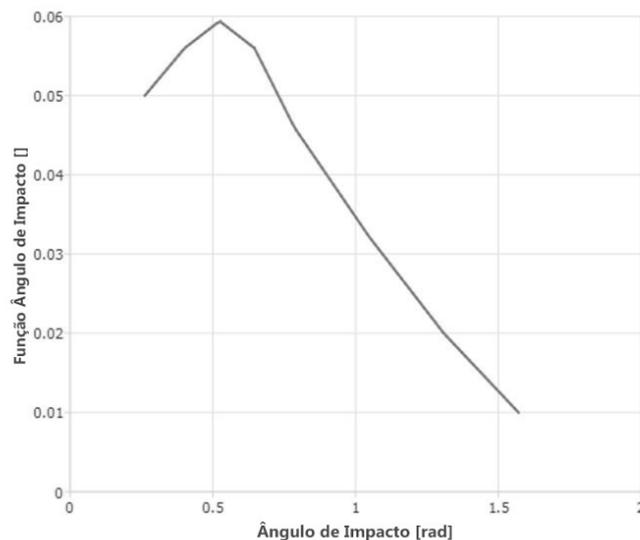


Figura 22 – Função do ângulo de impacto.

Fonte: Adaptado de Miyazaki e Takeda (1993).

Na Figura 22 consta a função utilizada para o plástico ABS, adaptada de Miyazaki e Takeda (1993), que determina os coeficientes de reflexão da fase discreta, sendo o expoente de velocidade igual a 2,53, definido empiricamente.

### 3.3 Variáveis e indicadores

Para Gil (2002), variável é tudo aquilo que assume diferentes valores e diferentes aspectos segundo circunstâncias. Além disso, uma variável se define por classificação ou medida, quantidade variável, conceito operacional, propriedade ou fator, objeto de estudo e passível de mensuração. Pode-se acrescentar ainda que a concepção de hipóteses a partir da observação de um evento é viabilizada pela seleção das variáveis daquele fenômeno (LAKATOS E MARCONI, 2021).

Os indicadores são elementos observáveis que possibilitam a quantificação e qualificação de um determinado conceito (GIL, 2019). Dito isso, as variáveis e indicadores utilizados neste trabalho estão apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 – Tabela de variáveis e indicadores.

Variáveis	Indicadores
Material do dispositivo	Limite de escoamento, densidade, resistência à tração
Desempenho do dispositivo	Altura manométrica, vazão mássica de saída
Parâmetros de entrada	Vazão mássica de entrada, velocidade de rotação
Parâmetros de saída	Altura manométrica, pressão total, tensão equivalente

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Para a análise proposta, os principais indicadores são os parâmetros de saída da bomba e as condições físicas do dispositivo. Considerando que, a hipótese proposta depende do desempenho do rotor e sua durabilidade, haja vista as condições de teste.

### 3.4 Instrumento de coleta de dados

Dada a natureza da análise computacional, a coleta de dados é feita diretamente através do *software* Ansys Workbench.

### 3.5 Tabulação dos dados

O *software* Microsoft Excel foi utilizado para a tabulação dos dados em estudo

### **3.6 Considerações finais do capítulo**

Este capítulo discorreu sobre o método científico e sobre a atividade da pesquisa, bem como os materiais e métodos utilizados no trabalho. Definiram-se então as variáveis, os indicadores, os instrumentos de coleta e também a tabulação de dados.

No próximo capítulo são apresentados os resultados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Pós-processamento

A solução via Ansys Fluent alcançou uma altura manométrica de 6,30 m após 500 iterações, confirmando o desempenho esperado, semelhante aos dados empíricos de Figueira Jr. (2017). Aferida uma vazão mássica de saída de  $-1.1277719 \text{ kg/s}$ , conforme a conservação das massas.

As pressões manométricas de entrada e saída da bomba foram aferidas como  $-59.41 \text{ kPa}$  e  $2.30 \text{ kPa}$  respectivamente. O gráfico de resíduos de iteração apresentou comportamento estável e convergente, demonstrando a robustez da solução numérica. As Figuras 23 e 24 apresentam o diagrama de velocidades de escoamento observados em diferentes planos de corte internos ao rotor de discos.

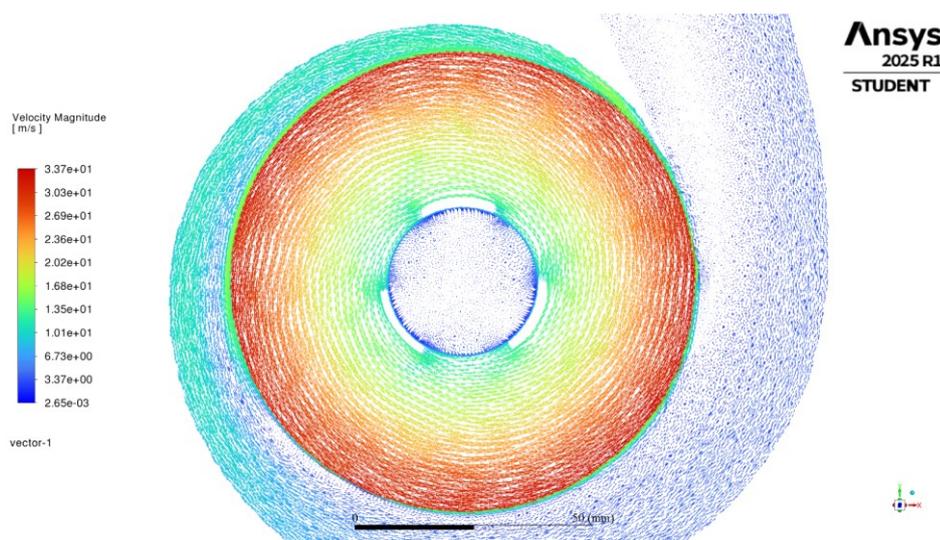


Figura 23 – Campo de velocidades nas paredes do rotor de discos (plano de corte XY).  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

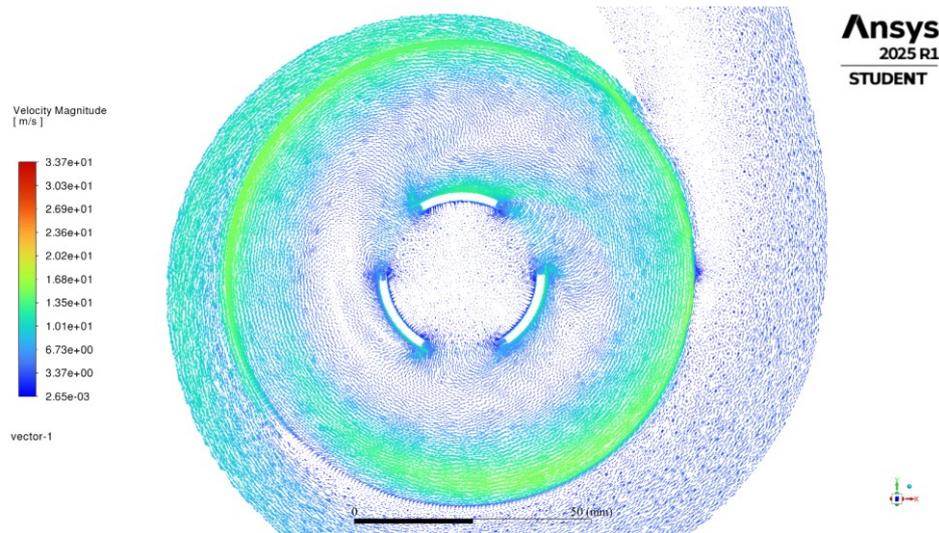


Figura 24 – Campo de velocidades no interior entre as paredes do rotor (plano de corte XY).  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Como se observa nas Figuras 23 e 24, os vetores de velocidade absoluta também se alinham aos resultados apresentados por Oliveira (2022). Foram observados os gráficos de magnitudes de velocidades absolutas em diferentes planos de corte, sendo essas, maiores nas superfícies dos discos e menores à medida que se distanciam. Comportamento este que se mostra em conformidade com o fenômeno da camada limite, observada a aderência de fluido na superfície.

Como discutido anteriormente, a variável adimensional  $Y^+$  representa a distância da primeira camada de elementos da malha em relação à parede, utilizada para avaliar sua resolução para capturar corretamente os efeitos da camada limite. A Figura 25 apresenta os valores de  $Y^+$  obtidos para a malha utilizada, que possui aproximadamente 1,01 milhão de elementos.

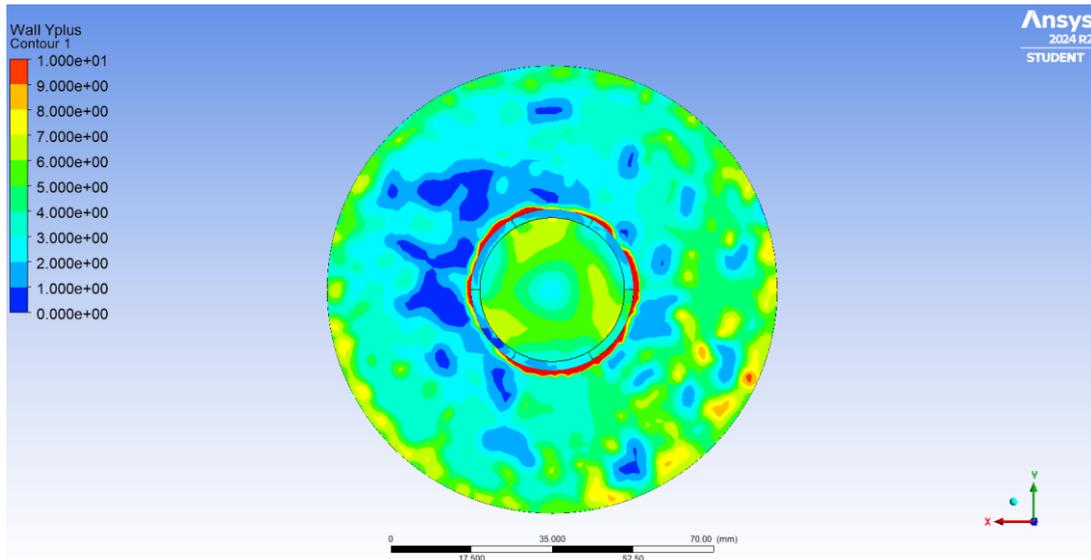


Figura 25 – Gráfico de distribuição dos valores de  $Y^+$  na superfície do rotor.  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A avaliação dos valores de  $Y^+$ , mostrada na Figura 25, indica uma variação entre 0 e 6, o que sugere a captura dos efeitos da camada limite, com resolução adequada da subcamada viscosa. Os valores obtidos foram considerados satisfatórios, tendo em vista o trabalho de Heng *et al.* (2022), que obtiveram valores semelhantes, compatíveis com o modelo de turbulência  $k-\omega$  SST adotado.

A Figura 26 mostra o campo de pressão hidrostática exercida pelo fluido sob o impelidor.

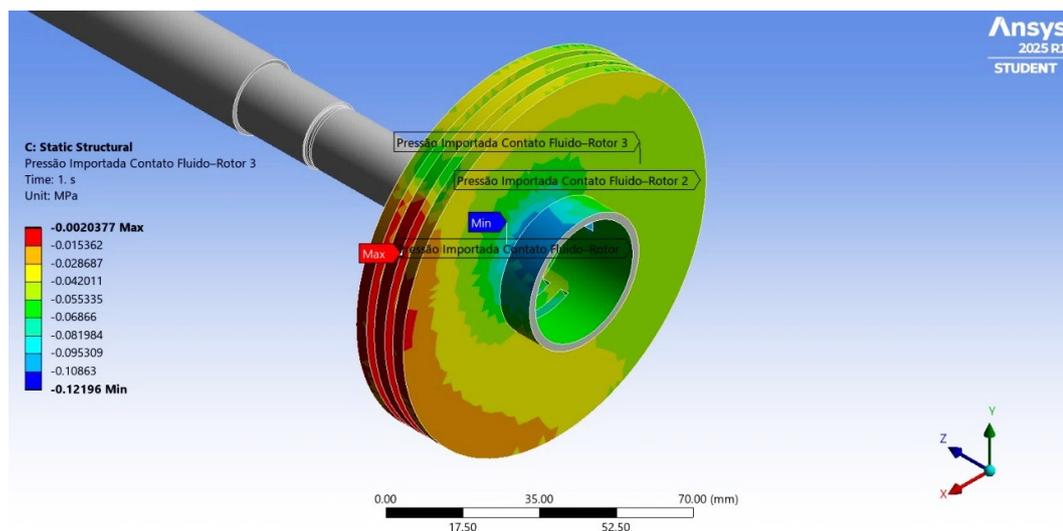


Figura 26 – Distribuição de pressão de fluido sob as paredes do rotor.  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Na Figura 26, podem ser observadas regiões de maior pressão nas bordas do rotor, e menor pressão nas regiões de entrada, este comportamento se assemelha ao observado por Yuan *et al.* (2022), em seu estudo de impelidores com pás.

## 4.2 Critério de falha

A seguir, a Figura 27 apresenta as tensões calculadas no material, bem como a legenda em cores distintas para identificação das respectivas magnitudes em cada região da peça.

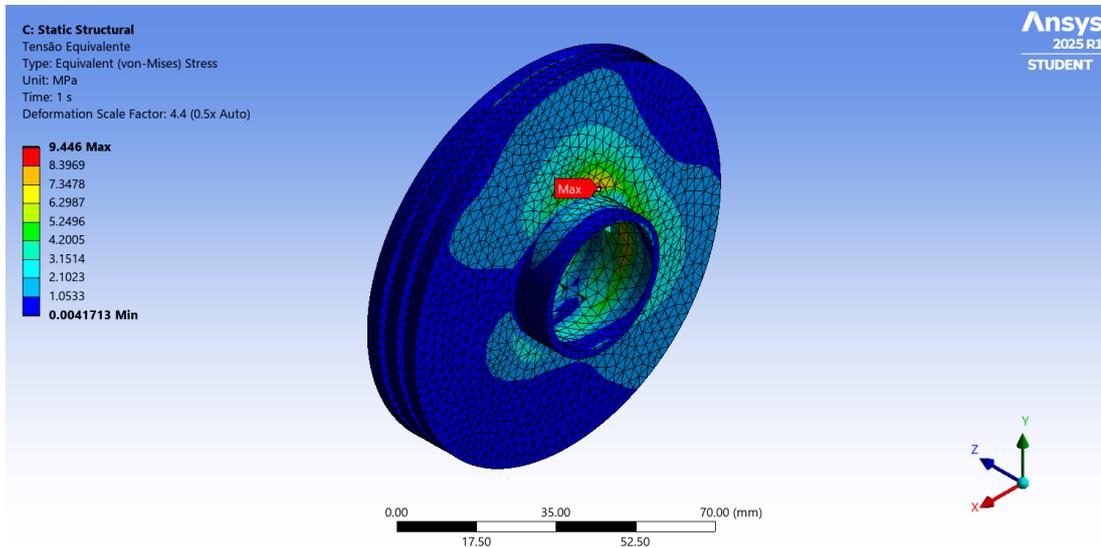


Figura 27 – Gráfico de tensões no rotor.  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Noda-se, na Figura 27, uma tensão máxima de 9,44 MPa. Aplica-se o critério de falha de *von Mises*, considerando o plástico ABS como um material isotrópico com comportamento elástico-plástico, para se avaliar a integridade estrutural do material, a partir dos resultados da simulação FEA.

Considerando que os resultados de tensão, a partir da aplicação do critério de falha de *von Mises*, explicitado na Equação 4, podem-se comparar a máxima tensão equivalente de *von Mises*, como limite de escoamento do plástico ABS, fornecida pela biblioteca do *software*.

$$\sigma_{von\ Mises} < \sigma_e \quad (4)$$

Em que:

- $\sigma_{von\ Mises}$  = Tensão de *von Mises*;
- $\sigma_e$  = Tensão de escoamento.

Os resultados mostram que a tensão máxima está abaixo do limite de escoamento, de 27,44 MPa, sendo aferida uma tensão máxima de aproximadamente 9,44 MPa, conforme o critério de falha apresentado na Equação 4, indicando que o material suporta o a tensão requisitada no regime previsto.

Modos vibratórios e deformações do rotor foram analisados (Tabela 5), incluindo padrões de oscilação e torção. Seria necessário teste físico para comparar se alguma das configurações resultaria em ressonância, confirmando os requisitos de segurança.

Tabela 5 – Primeiros modos de viração do impelidor

<b>Modo de vibração</b>	<b>Frequência natural (Hz)</b>
1	428.3
2	517.8
3	580.8
4	605.8
5	614.0
6	655.3
7	656.5
8	662.9
9	681.1
10	695.3
11	708.8
12	839.5

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Comparativamente, foram realizadas simulações estruturais e modais aplicando-se aço como material do impelidor, mantendo-se os carregamentos do campo de escoamento. Nesse caso, foram observadas tensões levemente maiores requeridas ao impelidor, de 9,74 MPa durante a análise estrutural, devido ao maior carregamento inercial. No entanto, devido ao seu maior limite de escoamento, o material apresenta um fator de segurança superior em comparação ao fator de 2,9049 para o caso do Plástico ABS.

A análise modal revelou ainda frequências naturais mais altas, entre 422.41 Hz a 2311.3 Hz para os primeiros 12 modos de vibração, comportamento esperado conforme a maior rigidez do material.

### **4.3 Desgaste erosivo**

Na sequência, analisa-se o padrão de erosão sob o propulsor, conforme Figura 28, simulado através do modelo de erosão Finnie (1960), que considera o ângulo de impacto e velocidade como parâmetros críticos para definição da taxa de erosão.

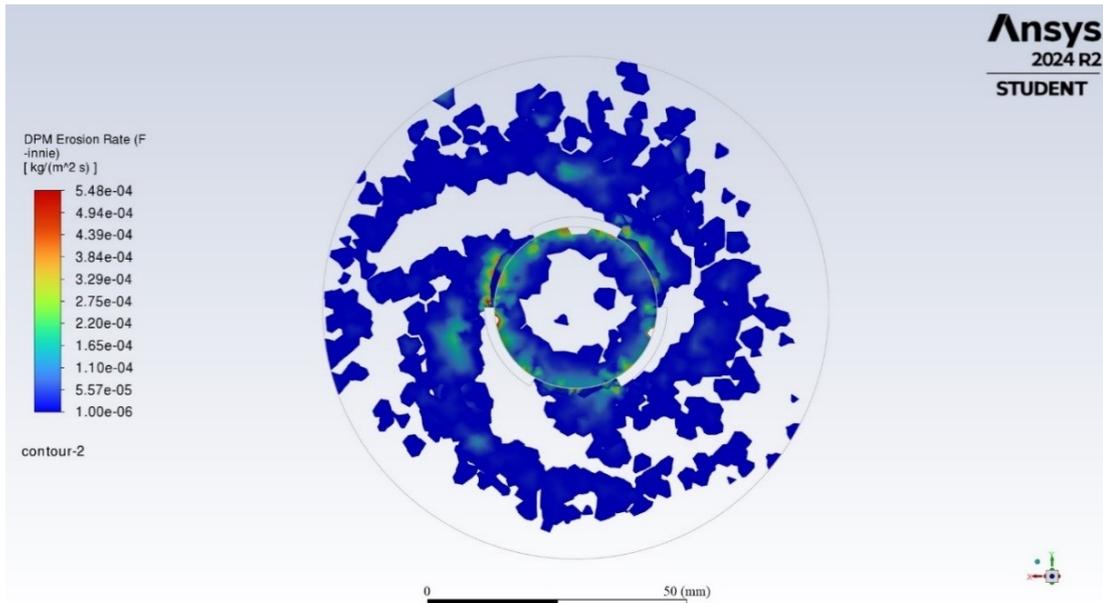


Figura 28 – Gráfico de taxa de erosão sob a superfície do rotor.  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Na Figura 28, é possível observar que nas regiões centrais do rotor, há maior taxa de erosão, atribuído a baixa velocidade e força centrífuga na região, assim causando um acúmulo de partículas sólidas na entrada. Esse comportamento se assemelha ao observado por Peng *et al.* (2021) em seu estudo.

A partir da taxa de erosão ponderada pela área, foi estimada uma perda mássica de 20% em 3 horas e meia de funcionamento, segundo o modelo. Entretanto, dado o nível de imprecisão numérica envolvido, os modelos de erosão avaliados forneceram apenas uma orientação qualitativa.

Nesse sentido, a Figura 29 apresenta a distribuição de desgaste obtida, bem como apresenta a semelhança com observações empíricas.

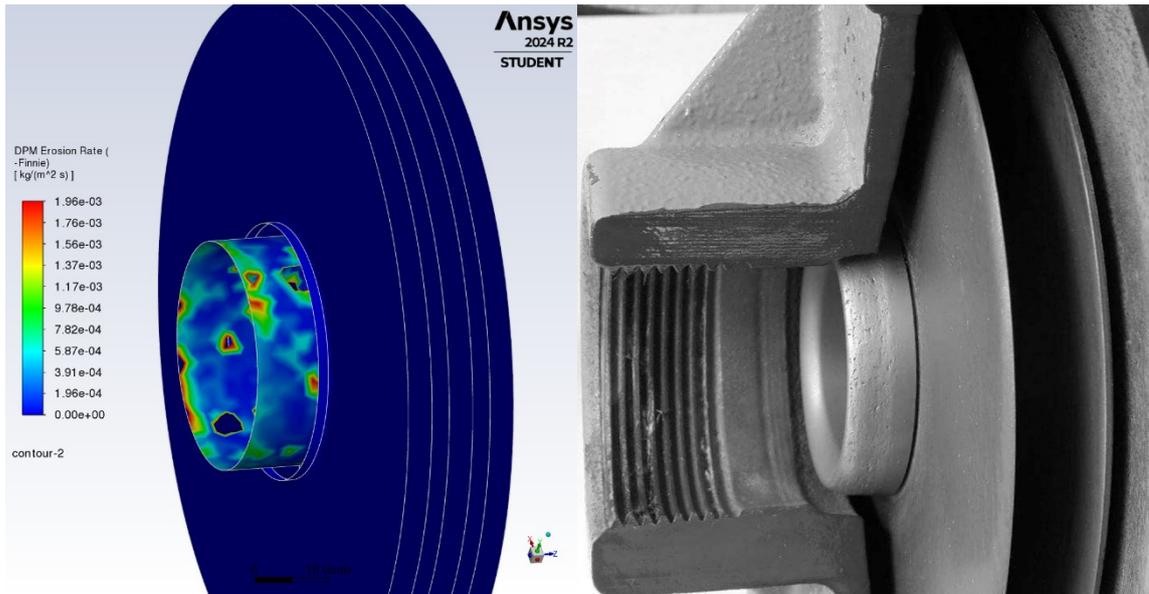


Figura 29 – Comparativo entre modelo preditivo e teste empírico.  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 29 mostra regiões com taxa de erosão mais incisiva na região de entrada do rotor, semelhante ao comportamento observado por Figueira Jr. (2017) em teste empírico, especificamente na parte de sucção. Esse padrão pode ser atribuído à presença de áreas de baixa velocidade na região, que favorece o acúmulo das partículas.

Diante do exposto, observa-se que os resultados, além de se alinharem a demais estudos computacionais semelhantes e seguirem referências metodológicas, fornecem dados suficientes para se avaliar o rotor de discos fabricado em material termoplástico aplicado para o bombeamento de fluidos abrasivos, sendo possível a discussão acerca de sua viabilidade na próxima sessão.

O rotor de discos validado através da simulação foi então impresso para montagem em bomba centrífuga é apresentado na Figura 30.



Figura 30 – Protótipo físico do rotor de discos em material termoplástico.  
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 30 apresenta o dispositivo, concebido em PETG, fabricado em impressora 3D do tipo FDM. Notam-se as dimensões projetadas para acoplamento em bomba centrífuga, de forma a possibilitar testes empíricos.

## 5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 Conclusão

Neste trabalho, foram realizadas simulações estruturais e fluidodinâmicas em rotor de bomba centrífuga, com o objetivo de estudar o comportamento e concluir sobre a viabilidade do rotor impresso em 3D com material termoplástico para aplicação no bombeamento de polpa abrasiva, utilizando o método dos elementos finitos. Os objetivos propostos neste trabalho foram atingidos, dentro das limitações esperadas pela modelagem computacional.

A partir da análise estrutural, foi observado que o rotor de ABS suporta tanto sua própria força centrífuga como a pressão de fluido sob sua superfície. Foram obtidos valores máximos de tensão de 9,44 MPa, abaixo do limite de escoamento do material, de 27 MPa, assim validando seu comportamento estrutural.

A análise modal aponta para frequências naturais elevadas do conjunto, entre 600 hz a 700 hz. No entanto, testes físicos são necessários para avaliar as frequências de operação em condições reais.

As simulações de erosão identificaram regiões de maior desgaste. Embora existam incertezas numéricas, os modelos apontam para regiões em comum a outros estudos. O gráfico de erosão apresentou a não ocorrência de desgaste significativo nas superfícies dos discos, concentrando-se na região de entrada do rotor.

Para este estudo, foram adotadas simplificações no modelo, considerando-se um regime estacionário, como o uso de uma voluta simplificada, ausência de tubo de entrada, de anel de vedação entre outros componentes hidráulicos. Além disso, as partículas também são modeladas de forma simplificada, sem considerar colisões ou quebras. Essas limitações reduzem a precisão absoluta dos resultados, mas não comprometem sua validade como análise preliminar.

O uso de ABS mostrou-se adequado para suportar as cargas previstas, enquanto o desempenho hidráulico, mesmo com simplificações geométricas, se manteve dentro dos parâmetros esperados. Os presentes resultados estruturais, fluidodinâmicos, erosivos e modais demonstraram a viabilidade do projeto, sendo considerados favoráveis para fabricação e teste físico.

Com base nos resultados, a substituição do impelidor metálico por um de plástico mostra-se viável, especialmente razão de seu menor custo e facilidade de prototipagem. Sendo essa uma solução promissora para aplicações específicas de bombeamento.

## 5.2 Recomendações

A partir dos resultados avaliados nesse estudo, sugerem-se as recomendações de futuros trabalhos:

- Realizar testes empíricos com protótipos para validação dos dados simulados, bem como verificar se não há ressonância significativa, considerando as frequências de operação do sistema;
- Refinar o estudo acerca dos modelos preditivos de erosão;
- Aprimorar a geometria do impelidor.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE – Análise Dinâmica**. São Paulo: Érica, 2013.
- AIMING, F.; JINMING, L.; ZIYUN, T. **Failure analysis of the impeller of a slurry pump subjected to corrosive wear**, *Wear*, Volumes 181–183, Part 2, 1995, Pages 876-882.
- ANSEMI, E. P.; FIASCHI, D.; MANFRIDA, G.; NICOTRA, G.; TALLURI, L. **Design and Optimization of a Tesla Pump for Orc Applications**. Cranfield University, Department of Equivalent, City, State, Country, 2022.
- ANSYS INC. ANSYS CFX Documentation. Release 2024 R2. Canonsburg, PA: Ansys Inc., 2024. Disponível em: <https://ansyshelp.ansys.com/>. Acesso em: 8 mai. 2025.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. [S.l.]: American Society for Testing and Materials, 2010. Disponível em: <https://www.astm.org>. Acesso em: 01 set. 2022.
- AZEVEDO, A. F. M. **Método Dos Elementos Finitos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- BARBOSA, M. P. **Estudo Do escoamento No Canal Formado Por Dois Discos Em Rotação**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1992.
- BERMAN, B. **3-D printing: The new industrial revolution**. *Business Horizons*, v. 55, n. 2, p. 155-162, 2012.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. Wiley, 23 fev. 2018.
- ÇENGEL, A. Y.; CIMBALA, M. J. **Fluid Mechanics Fundamentals and Applications**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.
- CRESWELL, J. W. **Projeto De Pesquisa: Métodos Qualitativo, Quantitativo E Misto**. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2021.
- ELJERSIFI, A.; CHBIHI, A.; SEMLAL, N.; BOUAOUINE, H.; NAAMANE, S.. **Failure analysis of a high chromium carbon steel impeller operating in phosphoric acid slurry**. *Wear*, [S.l.], v. 476, p. 203660, 2021.
- FIGUEIRA JR., E. A. **Estudo e concepção de rotores de disco para bombeamento de fluidos abrasivos**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2017.
- FINNIE, I. **Erosion of Surfaces by Solid Particles**. *Wear*, v. 3, p. 87–103, 1960.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro, 2014.
- GALLAGHER, R. H. **Finite Element Analysis: Fundamentals**. 1. ed. Pearson College Div, 1975.

- GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- GIRDHAR, P.; MONIZ, O. **Practical Centrifugal Pumps: Design, Operation and Maintenance**. 1. ed. Elsevier, 2004.
- HENG, Y. *et al.* **An Analysis on Hydraulic Loss in a Co-Rotating Bladed Disc Pump**. Key Laboratory of Fluid and Power Machinery, Ministry of Education, Xihua University, China, 2022.
- HIBBELER, R. C. **Mechanics of Materials**. 9. ed, 2013.
- HIEMENZ, J. **3D Printing with FDM: How it Works**. Stratasys Inc, 2011.
- LLEWELLYN, R. J.; YICK, S. K.; DOLMAND, K. F. **Scouring erosion resistance of metallic materials used in slurry pump service**, *Wear*, Volume 256, Issue 6, Pages 592-599, 2004.
- MACINTYRE, A. J. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2008.
- MACINTYRE, A. J. **Manual de instalações hidráulicas e sanitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: GEN, 2021.
- MARCONI, M. D. A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia de trabalho científico**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021.
- MIYAZAKI, N.; TAKEDA, N. **Solid Particle Erosion of Fiber Reinforced Plastics**. *Journal of Composite Materials*, v. 27, n. 21, 1993.
- OLIVEIRA, G. S. **Simulação Computacional de uma Bomba Centrífuga com Rotor de Discos**. Universidade Federal de Ouro Preto, 2022.
- PENG, G. *et al.* **Numerical and Experimental Study of Hydraulic Performance and Wear Characteristics of a Slurry Pump**. *Machines*, v. 9, n. 12, p. 1-20, 2021.
- PÎRJAN, A. *et al.* **The Impact of 3D Printing Technology on the Society and Economy**. *Journal of Information Systems & Operations Management*, v. 7, n. 2, p. 360-370, 2013.
- PRITCHARD, P. J.; MITCHELL, J. W. **Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics**. 9. ed. Wiley, 2015.
- TESLA, N. **Fluid Propulsion**. Patente nº 1061142, 6 maio 1913.
- VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 16. ed. São Paulo: Atlas, 2016.
- WHITE, F. **Fluid Mechanics**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

WONG, K V.; HERNANDEZ, A. **A Review of Additive Manufacturing**. ISRN Mechanical Engineering, v. 2012, 2012.

YUAN, J.; SHI, J.; FU, Y.; CHEN, H.; LU, R.; HOU, X. **Analysis of Fluid-Structure Coupling Dynamic Characteristics of Centrifugal Pump Rotor System**. Energies, v. 15, n. 6, p. 2133, 2022.