



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



LUIS OTÁVIO DE MATOS PASSOS

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
COMPOSTOS POLIMÉRICOS A SEREM APLICADOS COMO
REVESTIMENTO EM ROTORES DE BOMBA DE POLPA**

**OURO PRETO - MG
2024**

LUIS OTÁVIO DE MATOS PASSOS

luisotaviomp@gmail.com

**ANÁLISE COMPARATIVA DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
COMPOSTOS POLIMÉRICOS A SEREM APLICADOS COMO
REVESTIMENTO EM ROTORES DE BOMBA DE POLPA**

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. Vinícius Carvalho Teles

**OURO PRETO – MG
2024**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P289a Passos, Luis Otavio De Matos.

Análise comparativa de propriedades mecânicas de compostos poliméricos a serem aplicados como revestimento em rotores de bomba de polpa. [manuscrito] / Luis Otavio De Matos Passos. - 2024.

47 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Vinícius de Carvalho Teles.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Bomba de polpa. 2. Materiais compostos. 3. Borracha. 4. Borracha - Borracha neoprene. 5. Borracha- Borracha clorobutílica. 6. Resistência à abrasão. 7. Resiliência (Ecologia). I. Teles, Vinícius de Carvalho. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Luís Otávio de Matos Passos

Análise comparativa de propriedades mecânicas de compostos poliméricos a serem aplicados como revestimento em rotores de bomba de polpa

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

Aprovada em 08 de fevereiro de 2024

Membros da banca

Dr. Vinícius Carvalho Teles - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Edson Alves Figueira Júnior - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Diogo Antônio de Sousa - Universidade Federal de Ouro Preto

Vinícius Carvalho Teles, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 08/02/2024



Documento assinado eletronicamente por **Vinícius Carvalho Teles, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/02/2024, às 16:06, 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, informando o código verificador **0666739** e o código CRC **FBBACB73**.

A toda minha família dedico mais esta etapa vencida, meus pais e irmã, pelo apoio.

A UFOP e a Escola de Minas.

A vida estudantil e a Ouro Preto.

AGRADECIMENTO

Ao meu orientador DSc. Vinícius de Carvalho Teles, pelo incentivo e orientação neste trabalho.

Aos meus pais, irmã e namorada, por me apoiar desde o início da graduação.

Aos professores do curso de engenharia mecânica por suas importantes contribuições para o aprimoramento do trabalho.

Aos membros da banca DSc. Edson Alves Figueira Júnior e DSc. Diogo Antônio de Sousa.

Aos colegas do curso pela amizade e apoio durante a graduação.

Aos moradores do alojamento estudantil pelos vários momentos inesquecíveis juntos.

A vida estudantil de Ouro Preto.

*“A vida me ensinou a nunca desistir
Nem ganhar nem perder mas procurar evoluir”.*

Alexandre Magno Abrão (Chorão)

RESUMO

No setor de extração de matérias-primas, é comum a aplicação de revestimentos nos equipamentos, a fim de protegê-los em ambientes adversos e, conseqüentemente, estender sua vida útil. Entre os diversos revestimentos disponíveis, a borracha destaca-se devido à sua maleabilidade, que permite sua aplicação em geometrias complexas, e sua versatilidade na formulação de diferentes compostos com propriedades distintas. Nesse contexto, o presente estudo propõe uma análise comparativa das propriedades mecânicas de três compostos de borracha, buscando identificar o mais adequado para ser empregado como revestimento em rotores de bombas de polpa. Os compostos avaliados são borracha natural, neoprene e clorobutílica. Foram realizados ensaios em conformidade com normas específicas, obtendo informações sobre a resistência à abrasão, resiliência, dureza, alongamento/ruptura e rasgo de cada composto. Os resultados revelaram similaridade na dureza dos três compostos. No entanto, as demais propriedades analisadas demonstraram um desempenho superior no composto de borracha natural, destacando-o como a escolha mais eficiente para revestimento de rotores de bomba de polpa, conforme esta pesquisa. Apesar de apresentar valores inferiores, o composto de borracha neoprene demonstrou boas propriedades de resiliência, alongamento/ruptura e rasgo. Por sua vez, o composto de borracha clorobutílica evidenciou bom desempenho apenas no alongamento/ruptura. É crucial ressaltar que, apesar das conclusões deste estudo, a literatura destaca que cada tipo de borracha pode apresentar melhor desempenho em aplicações específicas, como aquelas relacionadas à manipulação de polpa. É sugerido, portanto, a realização de estudos de campo em pesquisas futuras para validar os resultados obtidos em laboratório.

Palavras-chave: Bomba de polpa. Composto. Borracha Natural. Borracha Neoprene. Borracha Clorobutílica. Resistência à abrasão. Resiliência. Dureza. Alongamento/Ruptura. Rasgo.

ABSTRACT

In the raw material extraction sector, it is common to apply coatings to equipment to protect them in adverse environments and consequently extend their lifespan. Rubber stands out among various coatings due to its flexibility, allowing it to be applied in complex geometries, and its versatility in formulating different compounds with distinct properties. In this context, the present study proposes a comparative analysis of the mechanical properties of three rubber compounds, seeking to identify the most suitable for use as a coating on slurry pump rotors. The evaluated compounds are natural rubber, neoprene, and chlorobutyl rubber. Tests were conducted in accordance with specific standards, providing information on the abrasion resistance, resilience, hardness, elongation/rupture, and tear strength of each compound. The results showed a similarity in the hardness of the three compounds. However, the other analysed properties demonstrated superior performance in the natural rubber compound, positioning it as the most efficient choice for coating slurry pump rotors, according to this research. Despite lower values, the neoprene rubber compound exhibited good properties of resilience, elongation/rupture, and tear strength. On the other hand, the chlorobutyl rubber compound showed good performance only in elongation/rupture. It is crucial to emphasise that, despite the conclusions of this study, the literature highlights that each type of rubber may perform better in specific applications, such as those related to slurry handling. Therefore, conducting field studies in future research to validate the laboratory results is recommended.

Keywords: *Slurry Pump. Natural Rubber. Neoprene Rubber. Chlorobutyl Rubber. Abrasion Resistance. Resilience. Hardness. Elongation/Rupture. Tear Strength.*

LISTA DE SÍMBOLOS

\emptyset	Diâmetro
#.....	Espessura
δ	Densidade
δ_L	Densidade do Líquido
ME.....	Massa Emergida
MI.....	Massa Imergida
ΔV	Perda Volumétrica
Δm	Perda Mássica

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bomba de polpa aplicada em linha de mineração.....	6
Figura 2 – Fluxo de material.....	7
Figura 3 – (a) Rotor radial, (b) semi-axial e (c) axial.....	8
Figura 4 – Rotor de dupla sucção	9
Figura 5 - (a) Rotor fechado; (b) Rotor semi-aberto e (c) Rotor aberto	9
Figura 6 – (a) Perda de massa (kg) em decorrer do tempo de aplicação do rotor (h) e (b) Análise microscópica do desgaste do rotor	11
Figura 7 – Revestimento de bomba de polpa desgastada precocemente.....	12
Figura 8 - Modelagem 3D no Solidworks de um rotor de borracha com alma metálica fundida	13
Figura 9 – Reticulação por vulcanização.....	16
Figura 10 – (a) Abrasômetro de rolo e (b) Modelo de ensaio de abrasão	17
Figura 11 – Resiliômetro	18
Figura 12 – Durômetro de escala Shore A	19
Figura 13 - Corpo de prova para ensaio de alongamento/ruptura	19
Figura 14 - Corpo de prova para ensaio de rasgo	20
Figura 15 - Fluxograma de estudo dos compostos de borracha	22
Figura 16 - Prensa e matriz para vulcanização de corpos de prova.....	24
Figura 17 - (a) Postiço metálico e (b) Cortador.....	25
Figura 18 - (a) Desenho dos cortadores (b) Dimensionais conforme tipo de cunha	29
Figura 19 - Desenho com dimensional do cortador com cunha tipo C	30
Figura 20 - Gráfico de coluna com os resultados de resistência à abrasão	34
Figura 21 - Gráfico de coluna com os resultados de resiliência.....	36
Figura 22 - Gráfico de coluna com os resultados de dureza.....	37
Figura 23 - Gráfico de coluna com os resultados de alongamento/ruptura.....	39
Figura 24 - Gráfico de coluna com os resultados de rasgo.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Normas e materiais utilizados em cada ensaio realizado	22
Tabela 2 - Formulações dos compostos de borracha.....	23
Tabela 3 - Dimensões dos corpos de prova	26
Tabela 4 - Variáveis e indicadores estudados.....	31
Tabela 5 - Massa emergida e imergida dos compostos de borracha	32
Tabela 6 – Valores obtidos de densidade dos compostos de borracha.....	33
Tabela 7 - Massa inicial, final e a diferença dos compostos de borracha após o ensaio no abrasômetro de rolo	33
Tabela 8 - Perda volumétrica dos compostos de borracha	34
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de resiliência.....	35
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de dureza.....	37
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de alongamento/ruptura	38
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de rasgo.....	40
Tabela 13 - Comparação direta de todos os ensaios realizados.....	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Objetivos	4
1.3.1	Geral	4
1.3.2	Específicos	4
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Bomba de polpa	6
2.2	Desgaste	10
2.3	Desgastes em bombas de polpa	10
2.4	Aplicação de elastômeros em bombas de polpa	12
2.4.1	Elastômeros estudados	15
2.5	Vulcanização	16
2.6	Propriedades mecânicas do revestimento do rotor	16
3	METODOLOGIA.....	21
3.1	Tipo de pesquisa	21
3.2	Materiais e métodos	21
3.3	Preparação das amostras	23
3.4	Ensaios	26
3.4.1	Ensaio de resistência à abrasão	26
3.4.2	Ensaio de resiliência	27
3.4.3	Ensaio de dureza	28
3.4.4	Ensaio de alongamento/ruptura	28
3.4.5	Ensaio de rasgo	29
3.5	Variáveis e indicadores	30
3.6	Instrumentos de coleta de dados	31
3.7	Tabulação de dados	31
3.8	Considerações finais do capítulo	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32

4.1	Resultado do ensaio de resistência à abrasão	32
4.2	Resultado do ensaio de resiliência.....	35
4.3	Resultado do ensaio de dureza.....	36
4.4	Resultado do ensaio de alongamento/ruptura	38
4.5	Resultado do ensaio de rasgo.....	39
4.6	Comparação final dos resultados	41
5	CONCLUSÃO.....	43
5.1	Proposta para realização de trabalhos futuros	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
	ANEXO I.....	47

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

A exposição dos equipamentos, utilizados em processos de extração de matérias primas, a ambientes severos caracterizados pela presença de agentes abrasivos, corrosivos, químicos e biológicos pode resultar no seu desgaste. De acordo com Máscia (2002, p. 9) em seu estudo tribológico na mineração:

O desgaste é um fenômeno que ocorre em diversas situações. Como exemplo de peças e sistemas sujeitos a desgaste, citam-se: peças e componentes com movimentação relativa em equipamentos, bombas de polpas, britadores, rolamentos, engrenagens, freios, etc. [...] Análises de sistemas podem ser usados para identificação de parâmetros de sistemas tribológicos; dependendo destes parâmetros do tribosistema, diferentes mecanismos de desgaste podem ocorrer.

Segundo Leite e Marques (2009), observa-se, em empresas que realizam essas atividades, uma constante procura por soluções para esse problema, uma vez que, o desgaste pode resultar em danos consideráveis em seus componentes e equipamentos, representando um dos principais fatores de depreciação de capital e de fontes de despesas com manutenção. Dessa forma, nota-se nessas indústrias, um interesse cada vez maior na otimização econômica dos processos de produção de modo que, a cada dia, é dada uma maior atenção a todos os fatores que interferem nos custos, na qualidade final do produto e no meio ambiente (LEITE; MARQUES, 2009).

Uma solução para minimização desse problema consiste na aplicação de revestimentos. Eles atuam como uma camada de proteção contra abrasão, impacto e agentes corrosivos, evitando o contato direto da superfície com o agente tribológico causador do desgaste (CARVALHO, 2007). Eles podem ser classificados em: rochosos (como por exemplo o Basalto), cerâmicos, elastômeros (como o Poliuretano e a Borracha por exemplo) e resinas de aplicação em superfícies (CARVALHO, 2007).

A escolha do material do revestimento é feita levando-se em conta a viabilidade no custo e a possibilidade de aplicação sobre a peça a ser revestida (ASHBY, 2017). Tal processo pode ser realizado, por exemplo, em chutes de transferência, utilizando placas de desgaste a fim de minimizar os danos estruturais causados pela abrasão e/o impacto do material (SANTOS, 2017) ou em tubulações de minerodutos nas quais observa-se um fluxo

considerável de materiais abrasivos, erosivo e corrosivos que podem causar o seu desgaste (VIDAL, 2011).

A borracha é um dos revestimentos mais aplicados na mineração, visto que, suas propriedades mecânicas podem ser alteradas de acordo com a sua composição química (LUNA *et al.*, 2015). Além disso, a aplicação de um composto de matriz polimérica (CMP), de borracha mais um sólido metálico ou cerâmico, como revestimento contribui para que ele tenha uma melhor performance, tendo em vista que sua propriedade mecânica se torna diversificada (OLIVEIRA, 2015). Outra vantagem consiste na maleabilidade desse composto o que permite a aplicação em geometrias complexas, como por exemplo, revestimento em peças de bombas de polpa (SILVA, 2011), objeto de estudo nesse projeto.

Na mineração, a bomba de polpa é um equipamento frequentemente utilizado. A mesma pode ser definida como uma bomba centrífuga na qual é adaptada para aplicação de polpas de minério. Este equipamento tem como aplicação o transporte de tal material quando se há a necessidade de pressão residual ou quando não é possível transportar o material por gravidade.

Os rotores, dentre os componentes presentes em uma bomba de polpa, podem apresentar revestimento, uma vez que o intenso fluxo de material pode resultar em desgaste, podendo afetar significativamente o seu desempenho operacional (FLORENCIO, FARIA E HUEBNER; 2019). Tendo em vista que esse revestimento pode ser de diversos compostos de borracha, o presente trabalho teve como intuito estudar três materiais, sendo a borracha natural, borracha neoprene e borracha clorobutílica, e analisar suas características para aplicação. Acertar a composição ideal da borracha para diferentes aplicações é complexo e requer ensaios químicos e mecânicos até que se chegue em um resultado satisfatório. Portanto, o estudo tem como objetivo responder a seguinte pergunta:

Dentre os compostos de borracha natural, neoprene e clorobutílica, qual apresenta melhores propriedades mecânicas para ser aplicado como revestimento de rotores para bombas de polpa?

1.2 Justificativa

Um dos principais fatores que interferem diretamente na linha de produção das empresas é o desgaste de peças e equipamentos, uma vez que, esse processo, pode resultar na

depreciação de capital e em despesas com manutenção (RATIA; MIETTUNEN; KUOKKALA, 2013). De acordo com Xenos (1998), visando minimizar esses problemas e encontrar as causas fundamentais das falhas, as indústrias buscam desenvolver melhorias na performance de seus equipamentos através da implementação de métodos desenvolvidos por meio da elaboração dos planos de manutenção. Ainda, segundo Xenos (1998, p. 26):

[...] ao invés de simplesmente retornar os equipamentos às suas condições originais após a ocorrência das falhas, é preciso melhorar continuamente os equipamentos, alterando, conforme necessário, seu projeto, seus padrões de operação e manutenção. Para isso, é muito importante investigar exaustivamente as causas fundamentais das falhas.

Seguindo a ideia de melhoria contínua, a pesquisa e desenvolvimento (P&D) apresenta papel fundamental na elaboração desses planos de manutenção uma vez que, possibilita o redescobrimento na forma de atuação, corrigindo falhas, melhorando o desempenho de equipamentos e otimizando a produção. Como afirma Adreassi e Sbragia (2000, p. 72),

No atual quadro econômico em que as empresas se inserem, marcado pela alta competitividade, qualidade dos produtos e concorrência acirrada, cada vez mais o êxito empresarial depende da capacidade de inovação tecnológica da empresa, colocando novos produtos no mercado, com custo-benefício maior para o cliente, qualidade melhor e em velocidade maior do que a de seus concorrentes. Dentro desse contexto, observa-se que pesquisa e desenvolvimento (P&D), a mais clássica das atividades inovativas, assume destaque, influenciando ativamente o processo de inovação tecnológica das empresas e dominando o estado da arte das novas tecnologias.

Tendo em vista que o desgaste interfere no quadro econômico empresarial e que a indústria objetiva otimizar a produção com a aplicação de melhorias contínuas em equipamentos, o presente estudo se justifica, portanto, pela perspectiva fundamentada de aportar subsídios para se encontrar as melhores propriedades mecânicas para os revestimentos que são aplicados em rotores de bomba de polpa, utilizados nas atividades extração mineral, visando melhorar o seu desempenho e a sua durabilidade.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Determinar entre os compostos de borracha natural, neoprene e clorobutílica, qual apresenta melhores propriedades mecânicas para ser aplicado como revestimento de rotores para bombas de polpa.

1.3.2 Específicos

- I. Avaliar as seguintes propriedades mecânicas dos compostos poliméricos: resistência à abrasão, resiliência, dureza, alongamento/ruptura e rasgo;
- II. Comparar, com base nos resultados obtidos, as performances das propriedades mecânicas de cada composto polimérico;
- III. Determinar, entre os compostos de borracha estudados, qual apresenta melhores propriedades mecânicas para ser aplicado como revestimento em rotores de bomba de polpa.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, sendo que o primeiro, denominado “Introdução” apresenta, através de tópicos a formulação do problema, a justificativa da problemática, os objetivos (geral e específico) a serem conquistados e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo, denominado “Revisão Bibliográfica”, possui como objetivo apresentar conceitos referentes ao rotor de uma bomba de polpa, os desgastes que os mesmos sofrem durante o funcionamento, e aos tipos de borracha que serão avaliados (natural, neoprene e clorobutílica).

No terceiro capítulo, “Metodologia”, foi apresentado em qual tipo de pesquisa este trabalho se enquadra, os materiais utilizados e a preparação das amostras para a realização dos ensaios em laboratório, com o intuito de avaliar as propriedades mecânicas dos compostos de borracha que serão avaliados. Além disso, neste capítulo foi apresentado os instrumentos de coleta de dados e a forma de tabulação dos mesmos.

No quarto capítulo, “Resultados e Discussões”, foram apresentados os resultados obtidos de cada ensaio (resistência à abrasão, resiliência, dureza, alongamento/ruptura e rasgo) referentes aos compostos de borracha natural, clorobutílica e neoprene. Este capítulo também apresentou um comparativo dos valores encontrados e discutiu como as características dos compostos de borracha interfeririam (de forma positiva ou negativa) na aplicação estudada.

Por fim, o capítulo denominado “Conclusão” apresentou qual composto de borracha possui melhores resultados em suas propriedades mecânicas e, como consequência, é o melhor para se utilizar como revestimento de bomba de polpa em uma empresa com foco na extração de matéria prima. Neste capítulo também é apresentado algumas recomendações para a continuação da pesquisa em trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Bomba de polpa

As bombas de polpa (Figura 1), segundo Silva (2011), são bombas centrífugas adaptadas em vários aspectos para aplicação às polpas de minério. Elas são amplamente utilizadas para o beneficiamento e transporte de polpa na mineração, quando, na linha de mineroduto, há a necessidade de pressão residual ou quando não é possível transportar o material por gravidade.



Figura 1 - Bomba de polpa aplicada em linha de mineração
Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

Na Figura 1 observa-se uma bomba de polpa aplicada em campo. Ela apresenta como função lançar o material até uma altura manométrica predeterminada, para que ele continue com seu processamento e beneficiamento.

O dimensionamento está diretamente ligado com as propriedades fluidodinâmicas da polpa. Um dos principais estudos para a realização desse processo é a reologia, sendo a mesma definida como a ciência que estuda a deformação e o escoamento de matérias sob ação

de uma força, com base em análises em sua partícula, granulometria, temperatura e pressão (BISCO, 2009).

Dentre as peças presentes nas bombas de polpa, o rotor apresenta grande importância para o seu funcionamento. Através da força centrífuga ele é capaz de energizar mecanicamente o material bombeado fazendo com que sua trajetória axial seja desviada para a direção radial (CARVALHO, 1999), conforme ilustrado na Figura 2:

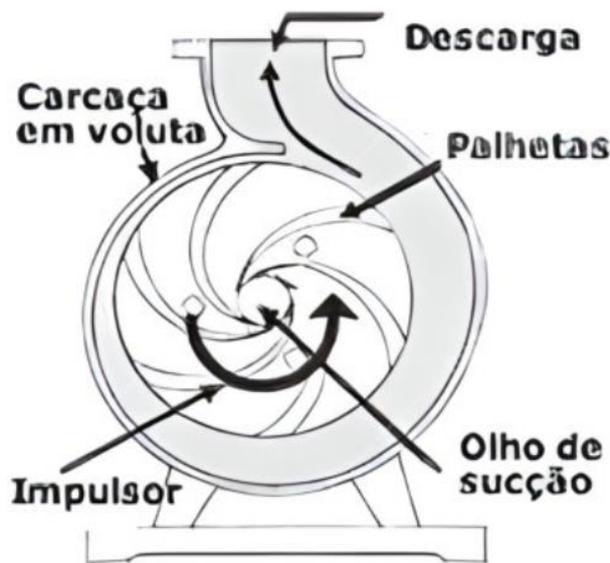


Figura 2 – Fluxo de material
Fonte: Eletrobrás *et.al*, 2009.

O fluxo de material na bomba de polpa, demonstrado na Figura 2, começa pela sucção da polpa de minério presente na linha de mineroduto. A entrada do material ocorre na direção normal a onde está indicado o olho de sucção. Devido a rotação do rotor (impulsor) e a sua geometria de palhetas, o material presente na bomba é energizado mecanicamente de forma centrífuga, o que o faz passar em toda a carcaça em voluta até que saia no bocal de descarga.

Segundo Silva (2011), os rotores podem ser classificados de acordo com:

- A trajetória do fluido:
 - Radial: Recebe o material no sentido axial e altera a trajetória do mesmo para o sentido radial (Figura 3);

- Axial: Recebe o material no sentido axial e não altera a trajetória do mesmo (Figura 3);
- Semi-axial: Recebe o material no sentido axial e altera a trajetória do mesmo parcialmente (Figura 3).

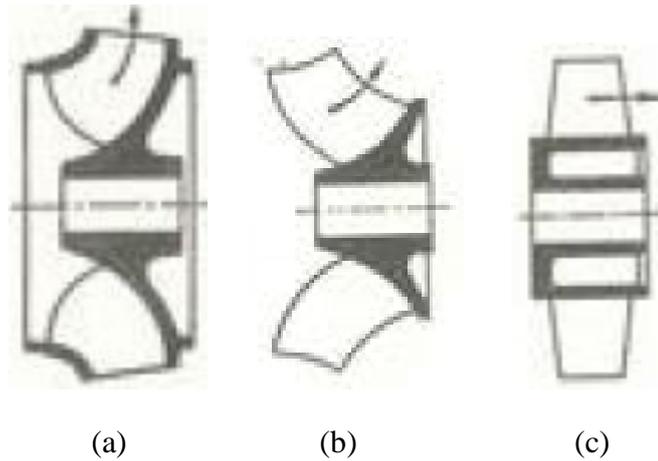


Figura 3 – (a) Rotor radial, (b) semi-axial e (c) axial
Fonte: Pfleiderer e Petermann, 1979.

- A recolha do fluido:
 - Sucção simples: Recebe o material apenas em um sentido e o desloca em sentido a sua descarga (Figura 2);
 - Dupla sucção: Recebe o material de 2 sentidos opostos e os desloca em sentido a sua descarga (Figura 4).

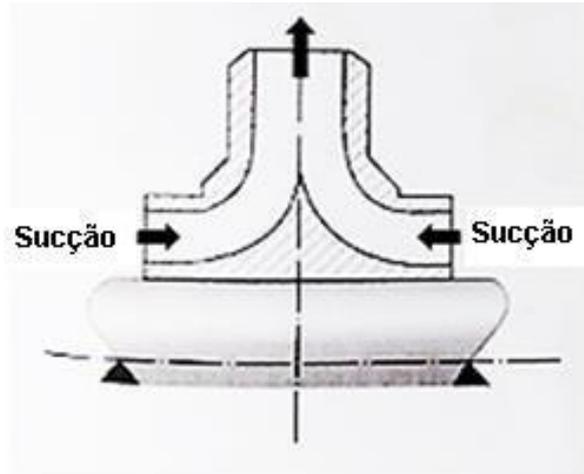


Figura 4 – Rotor de dupla sucção
Fonte: SILVA, 1999.

- Geometria da peça:
 - Fechado: Apresentam aletas fixadas entre dois anéis/paredes do rotor (Figura 5);
 - Semi-aberto: Apresentam aletas fixadas em um anel/parede traseiro do rotor (Figura 5);
 - Aberto: Apresentam aletas fixadas no cubo do rotor. O mesmo não apresenta anéis/paredes (Figura 5).

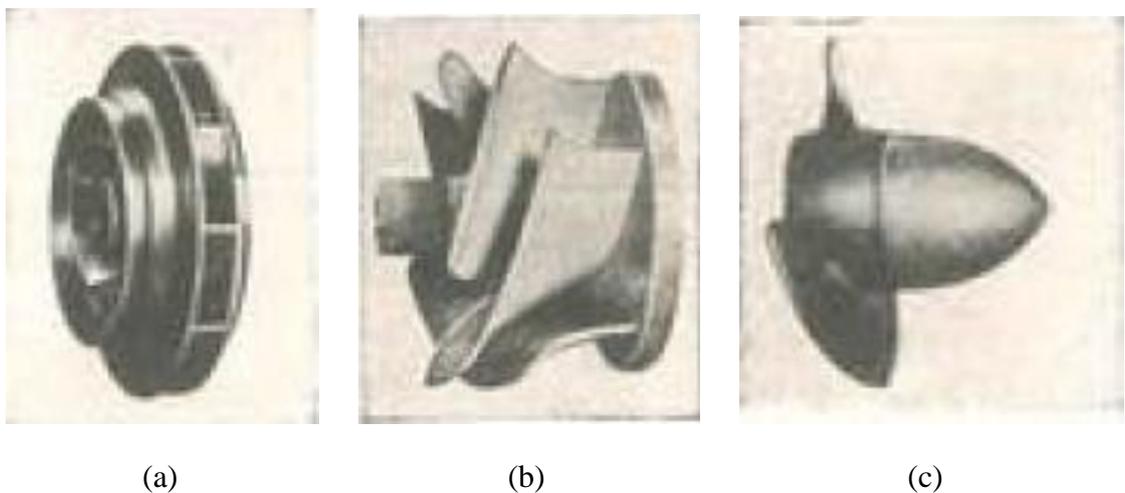


Figura 5 - (a) Rotor fechado; (b) Rotor semi-aberto e (c) Rotor aberto
Fonte: Pfeleiderer e Petermann, 1979.

2.2 Desgaste

O desgaste pode ser definido como o processo gradual de deterioração ao longo do tempo devido ao uso, exposição a intempéries, corrosão, fadiga, entre outros fatores (GAHR, 1987). Esse fenômeno é praticamente inevitável e afeta uma ampla gama de objetos e estruturas. Tal fenômeno pode resultar em perda de eficiência, falhas operacionais e eventual quebra ou inutilização do equipamento.

Para lidar com o desgaste, é necessário descobrir a natureza do fenômeno, de forma a empregar técnicas de manutenção para sanar o mesmo (MÁSCIA, 2002). Dentre as técnicas, estão os tratamentos de superfície e aplicação de revestimentos em equipamentos. O objetivo é minimizar o impacto do fenômeno, prolongando a vida útil dos objetos e sistemas e garantindo sua eficiência e segurança contínuas.

2.3 Desgastes em bombas de polpa

Peças de bomba de polpa estão expostas a ambientes severos de desgaste devido as próprias características de aplicação da bomba e do material bombeado. Outras pesquisas comprovam tal desgaste existente, como por exemplo o estudo feito por Khalid e Sapuan (2007), que realizaram um estudo de desgaste em um rotor de bomba de polpa feito de metal duro, onde deixara-o girar em uma solução de polpa de água e partículas sólidas. O estudo concluiu que houve perda de material de acordo com o decorrer de sua aplicação, como demonstra a Figura 6.

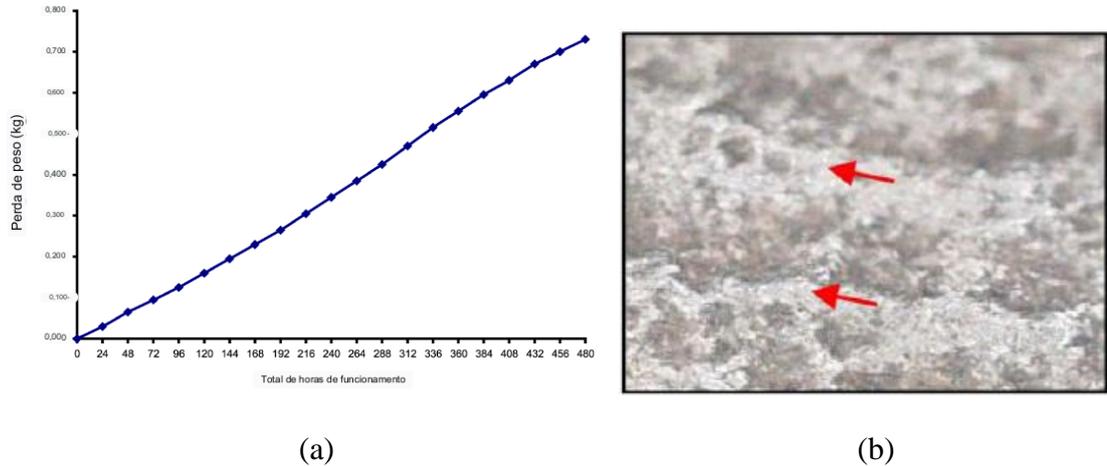


Figura 6 – (a) Perda de massa (kg) em decorrer do tempo de aplicação do rotor (h) e (b) Análise microscópica do desgaste do rotor
 Fonte: Adaptado de Khalid e Sapuan, 2007.

O gráfico presente na Figura 6 (a) apresenta a perda contínua de material do rotor, sendo a massa medida a cada 24 horas de funcionamento da bomba. Foi notado que o rotor teve uma perda de mais de 700g após 480 horas de uso. Na Figura 6 (b), apresenta a análise superficial do item estudado, concluindo-se que o maior desgaste ocorre na borda do impulsor, sendo o material removido de forma tangencial.

Além das características da polpa, há outros fatores podem desgastar as peças de bomba durante sua operação. Em um estudo feito por Florencio, Faria e Huebner (2019), foi realizado uma análise de desgaste precoce de um revestimento da bomba de polpa, como mostra a Figura 7.



Figura 7 – Revestimento de bomba de polpa desgastada precocemente
Fonte: Florencio, Faria e Huebner, 2019.

Na Figura 7, é possível ver o revestimento de bomba de polpa desgastado de forma precoce. Este revestimento apresentou uma vida útil quase 5 vezes menor do que o esperado. O estudo concluiu que a falha precoce ocorreu devido ao desbalanceamento do equipamento, uma vez que tal problema ocasionou o contato do rotor com o revestimento.

2.4 Aplicação de elastômeros em bombas de polpa

Para minimizar o desgaste, os componentes de bombas podem ser revestidos, geralmente com elastômeros (Figura 8) ou ligas metálicas de alta dureza, com o objetivo de garantir a sua proteção (FLORENCIO; FARIA; HUEBNER, 2019).

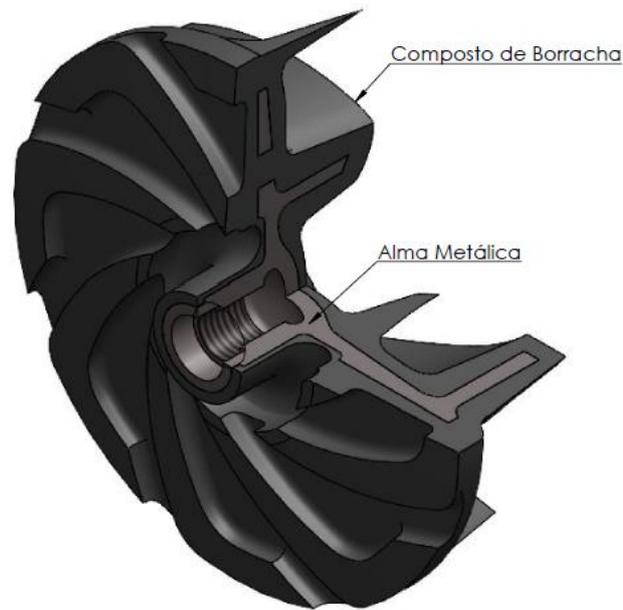


Figura 8 - Modelagem 3D no Solidworks de um rotor de borracha com alma metálica fundida
 Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

Observa-se na Figura 8 a modelagem 3D de um rotor para bomba de polpa feito de borracha e com uma alma metálica fundida. A alma metálica do rotor apresenta como função dar rigidez estrutural. Já a borracha, aparece como uma camada de revestimento em torno da alma metálica, apresentando a função de proteger e resistir aos desgastes recorrentes do fluxo de material durante a aplicação do rotor.

De acordo com Pedrinha (2022) os elastômeros podem ser definidos como sendo uma liga polimérica que admite uma grande deformação sem apresentar ruptura. Dentre eles, temos os compostos de borracha desenvolvidos com o intuito de se adquirir propriedades químicas e mecânicas que permitam uma melhor aplicação do revestimento. Ainda de acordo com a autora, são aplicados “ingredientes” no composto, em quantidades expressadas em *phr* - *parts of hundred of resin/rubber* (partes por 100 de resina/borracha), para que se alcance as propriedades desejadas, que podem ser classificados em:

- Peptizantes: São conhecidos também como plastificantes químicos que tem a função de diminuir a viscosidade do composto para que o mesmo, durante sua preparação, absorva os demais ingredientes. A ação dos peptizantes deve ocorrer apenas no início de preparação do composto para que ele não interfira nas suas propriedades finais;

- Agentes de vulcanização: Agentes responsáveis pela transformação do comportamento da borracha (de plástico para elástico) durante o processo de vulcanização. Os principais grupos de agentes de vulcanização são: enxofre, doadores de enxofre e agentes não sulfurosos;
- Aceleradores: Substâncias que são aplicadas para diminuir o tempo de vulcanização do composto de borracha, aumentando a velocidade de processo e diminuindo seu custo;
- Ativadores: Responsáveis diretos da ativação da vulcanização. Dentre as substâncias aplicadas, o óxido de zinco e o ácido esteárico são os mais empregados;
- Retardadores: Substâncias aplicadas para diminuição do risco de pré-vulcanização de um composto;
- Agentes de proteção: Utilizado para proteger o elastômero do processo de envelhecimento. Também conhecido como antidegradantes, tais substâncias podem ser classificadas como físicas (formam uma barreira física que protege o polímero da ação do oxigênio e do ozônio) e químicas (agentes que reagem com o agressor, impedindo sua reação com o polímero);
- Auxiliadores de processo: Substâncias adicionadas para auxílio no processo de produção no composto, otimizando tempo e custo;
- Cargas: Ingredientes usados para reforçar as propriedades mecânicas desejadas no elastômero e auxiliar no processo de produção. As cargas podem ser divididas em dois grupos: cargas pretas, representados pelos negro-de-fumo; e as cargas claras reforçantes ou não representadas pelos demais itens que não sejam negro-de-fumo;
- Óleos e plastificantes: Substâncias que não modificam quimicamente a borracha, mas modificam características físicas da composição. As principais substâncias aplicadas são óleos minerais, ésteres e plastificadores poliméricos;
- Agentes de coloração: Pigmentos e corantes;
- Ingredientes especiais: Substâncias usadas em casos especiais, como por exemplo, agentes de expansão (utilizados para obter borracha esponjosa ou microporosa), retardantes de chama (usado para diminuir a velocidade de propagação de chama e ou torná-la extingüível) e odorantes (essências de cheiros);

- Elastômero: Principal ingrediente para realização do composto de borracha. Existem diversos tipos de borracha que são possíveis aplicar para a produção do elastômero, sendo que cada tipo de elastômero apresenta suas vantagens de aplicação.

2.4.1 Elastômeros estudados

Neste trabalho, foi estudado diferentes compostos com a variação dos elastômeros, sendo eles a borracha natural, borracha neoprene e borracha clorobutílica. De acordo com Pinheiro *et al.* (2016), cada composto, teoricamente, apresenta pontos positivos e negativos. Baseando-se na tabela apresentada em ANEXO I, podemos destacar que, a borracha natural tem como melhor propriedade sua resiliência; a borracha neoprene sua resistência à óleos e intempéries; e a borracha clorobutílica sua impermeabilidade a gases.

A borracha natural é obtida através da extração de látex da seringueira. De acordo com Rippel e Bragança, (2009) o composto feito de tal material apresenta boas características mecânicas, como resiliência, elasticidade, flexibilidade, resistência à abrasão, ao impacto e à corrosão. Ainda de acordo com o autor, a borracha natural apresenta boa adesão e impermeabilidade, propriedades isolantes elétricas, impermeabilidade a líquidos e gases, capacidade de dispersar calor e maleabilidade a baixas temperaturas.

Neoprene foi o primeiro composto de borracha sintético a ser desenvolvido. De acordo com Pinheiro *et.al* (2016), o composto deriva do petróleo e é obtido através de uma síntese química, gerando o cloropropeno (principal matéria do composto) e, posteriormente, realizando sua polimerização. Ainda de acordo com o autor, suas principais características são a boa resistência a penetração de água e óleo, à intempérie, ao envelhecimento e aos agentes químicos. Apresenta boas características mecânicas e boa elasticidade tanto a baixas quanto a altas temperaturas.

Borrachas clorobutílicas são borrachas sintéticas preparadas a partir da cloração da borracha butílica (IIR). A borracha clorobutílica apresenta uma série de vantagens em relação a borracha butílica, sendo uma delas a velocidade de vulcanização. Ela também se destaca em relação a sua viscosidade e estabilidade. As principais características são a sua elevada impermeabilidade aos gases e ao ar, flexibilidade a baixas temperaturas, alta resiliência, resistência ao vapor e calor seco, ao envelhecimento provocado por intempérie e pelo ozono,

a ataques químicos e gorduras vegetais, isolamento elétrico e resistente a propagação de chamas (PINHEIRO *et al*, 2016).

2.5 Vulcanização

A vulcanização é um processo químico de reticulação descoberto por Charles Goodyear no qual é formada uma rede tridimensional, alterando (de forma irreversível) o comportamento predominantemente plástico para elástico (OLIVEIRA, 2015). Como ilustrado na Figura 9, tal processo ocorre quando se adiciona enxofre na borracha a uma determinada temperatura e pressão. A vulcanização é importante para esses compostos, uma vez que, apenas após este processo a borracha apresenta as propriedades mecânicas desejadas para sua aplicação (PEDRINHA, 2022).

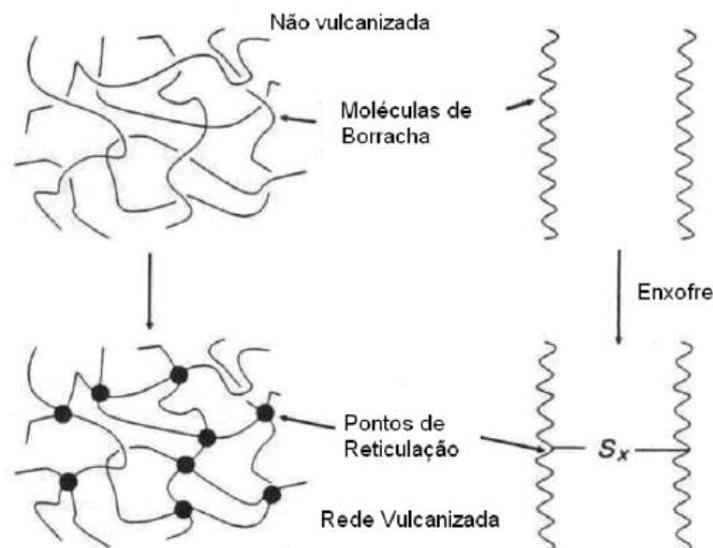


Figura 9 – Reticulação por vulcanização
Fonte: Oliveira, 2015.

2.6 Propriedades mecânicas do revestimento do rotor

Existem diversos fatores que podem interferir na escolha do revestimento utilizado no rotor de bomba de polpa, dentre eles o tipo de polpa, as características da partícula e a velocidade da bomba (SILVA, 2011). Pensando nesses aspectos, o revestimento deve

apresentar, principalmente, as seguintes propriedades mecânicas para que se tenha uma boa eficiência: resistência à abrasão, resiliência, dureza e alongamento/ruptura.

A abrasão é conceituada como a remoção (ou deslocamento) de material promovida pela interação de partículas duras em movimento relativo com uma superfície (GAHR, 1987). Durante o desgaste abrasivo, as partículas abrasivas são pressionadas contra a superfície, resultando na perda gradual de material.

A resistência à abrasão do composto de borracha para revestimento de peças de bomba é avaliada através da análise de atrito do corpo de prova do composto com um rolo de superfície áspera e abrasiva, envolvendo a fricção e o desgaste das amostras (Figura 10).

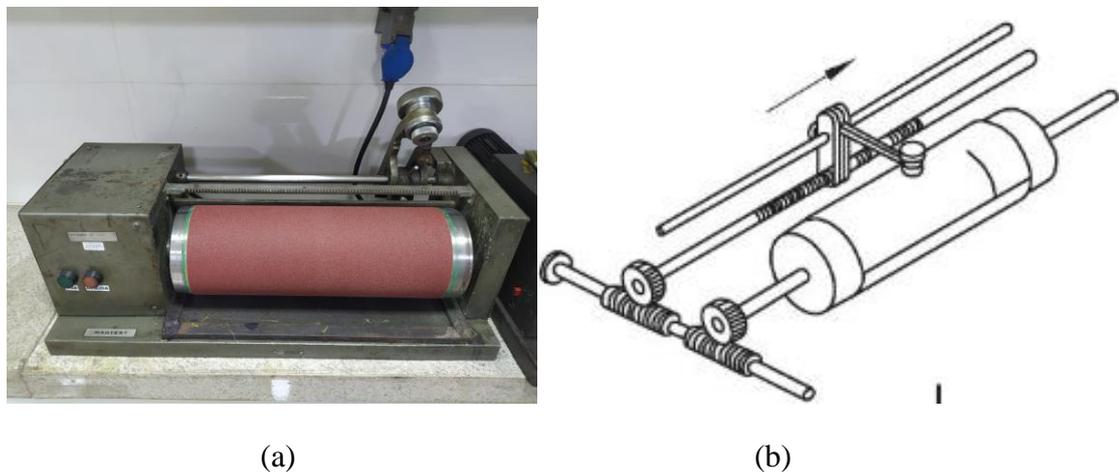


Figura 10 – (a) Abrasômetro de rolo e (b) Modelo de ensaio de abrasão
Fonte: Pesquisa Direta, 2023 e Norma NBR ISO 4649, 2014.

O corpo de prova translada no sentido longitudinal do abrasômetro, demonstrado na Figura 10, com uma força padrão que pressiona o mesmo sobre a superfície do rolo, que rotaciona em seu próprio eixo. O procedimento é realizado seguindo a norma DIN ISO 4649 (2014). O resultado é dado pela diferença de volume do composto (antes / após o ensaio).

Pelo fato de que a polpa bombeada passa pelo equipamento em um fluxo turbulento (SILVA, 2011), o revestimento é exposto aos impactos de partículas do material, tendo-se assim a importância do mesmo apresentar boas propriedades de resiliência, ou seja, capacidade de absorver impactos durante a atuação da bomba de polpa. A análise de resiliência é feita em um equipamento denominado resiliômetro, como mostra a Figura 11.



Figura 11 – Resiliômetro
Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

O resiliômetro (Figura 11) avalia a resiliência de um composto de borracha com o uso de uma massa de aço, padronizada conforme norma DIN 53512 (2000), que é deixada cair de uma altura específica sobre uma amostra do composto de borracha. A resiliência é medida pela diferença na altura de rebote da massa antes e após o impacto com a amostra de borracha. Quanto maior a altura de rebote, maior a resiliência do material, avaliando assim o quanto de energia foi absorvida.

A dureza do revestimento é importante para que ele apresente resistência a penetração de partículas do material bombeado em seu corpo. Nos elastômeros essa propriedade é avaliada através do durômetro (Figura 12), um equipamento com uma haste que penetra a superfície da peça e indica um valor em escala “Shore”. A escala Shore possui mais de uma classe, sendo as classes A e D as mais aplicadas para corpos de prova de borracha (a classe A para análise de borrachas mais “macias” e a classe D para borrachas mais “duras”). A análise de dureza dos corpos de borracha segue a norma ASTM D2240 (2021) para padronização de resultados.



Figura 12 – Durômetro de escala Shore A
Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

As propriedades de alongamento, ruptura e rasgo avaliam a capacidade do revestimento se manter íntegro, garantindo que não haja exposição da estrutura do rotor diretamente com o material bombeado. O ensaio de alongamento/ruptura é feito em um dinamômetro no qual traciona o corpo de prova (Figura 13), conforme norma ASTM D412-16 (2021), com o intuito de alongar o mesmo até a sua ruptura. Semelhante ao ensaio de tração convencional.



Figura 13 - Corpo de prova para ensaio de alongamento/ruptura
Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

A Figura 13 apresenta um corpo de prova de dimensional 115 x 25 x #3 mm, realizado com a vulcanização de mantas retangulares e posteriormente cortadas com cortadores que apresentam os dimensionais exigidos no ensaio de alongamento/ruptura, conforme norma ASTM D412-16 (2021).

O ensaio de rasgo se assemelha ao ensaio de alongamento/ruptura, sendo o mesmo preso no dinamômetro e tracionado. O que diferencia os ensaios é a geometria do corpo de prova (Figura 14), que apresenta um formato curvo, com base na norma ASTM D624 (2020), e é analisado a força necessária para se propagar um rasgo nele. No ensaio de alongamento/ruptura, o resultado é dado com base no percentual que o corpo de prova se alongou em seu corpo até a sua ruptura. Já no ensaio de rasgo, o ensaio é avaliado em N/mm.



Figura 14 - Corpo de prova para ensaio de rasgo
Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

A Figura 14 apresenta um corpo de prova de dimensional 102 x 19 x #3 mm, realizado com a vulcanização de mantas retangulares e posteriormente cortadas com cortadores que apresentam os dimensionais exigidos no ensaio de alongamento/ruptura, conforme norma ASTM D624 (2020).

3 METODOLOGIA

3.1 Tipo de pesquisa

O presente trabalho apresenta características metodológicas de uma pesquisa de abordagem quantitativa, de natureza aplicada e objetivo descritivo, apresentando procedimentos experimentais.

De acordo com Gerhardt e Silveira (2009), uma pesquisa com abordagem quantitativa envolve a apresentação de valores, gráficos, tabelas e/ou porcentagens para se quantificar dados. Em relação à natureza da pesquisa, as autoras definem como “aplicada” o tipo de pesquisa que visa aplicar os conhecimentos estudados para solucionar problemas específicos. Quanto ao objetivo, elas definem como “descritivo” o tipo de pesquisa que descreve um fenômeno ou objeto de estudo e analisa a relação dentre suas variáveis. Por fim, a pesquisa de procedimento experimental é definida como uma pesquisa realizada a partir da definição de formas de controle e de observação das delimitações de um objeto de estudo.

Portanto, o trabalho (baseando-se nas abordagens metodológicas definidas acima) apresenta o intuito de realizar estudos comparativos com base em resultados de ensaios laboratoriais relacionados as propriedades mecânicas dos compostos de borracha natural, borracha neoprene e borracha clorobutílica. Com os resultados obtidos e comparados, será possível avaliar qual composto apresenta melhores características para ser aplicado como revestimento em rotores de bombas de polpa para uso na indústria de mineração.

3.2 Materiais e métodos

A metodologia aplicada neste estudo consistiu em fabricar três tipos de compostos de borracha, sendo eles o composto de borracha natural, borracha neoprene e borracha clorobutílica. Com estes compostos, foram realizados ensaios para que suas propriedades mecânicas sejam avaliadas e comparadas. Desta forma, auxilia-se na seleção do mais adequado para ser aplicado como revestimento nos rotores de bomba de polpa. A Figura 15 apresenta o fluxograma seguido pelo estudo.

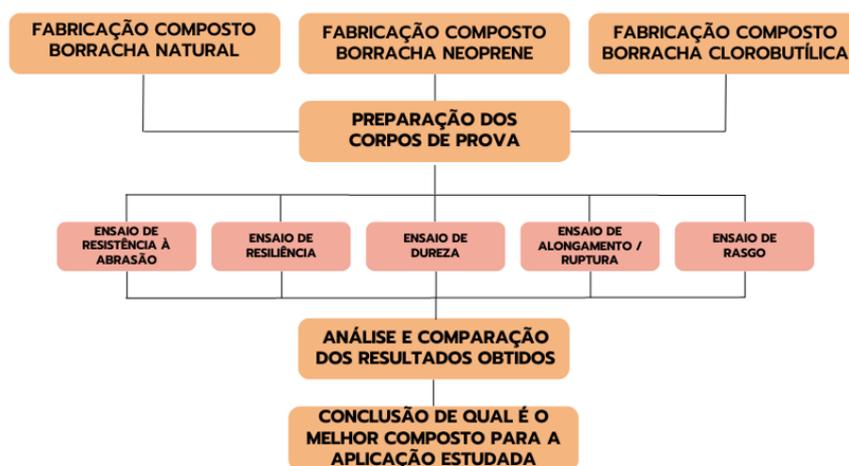


Figura 15 - Fluxograma de estudo dos compostos de borracha
Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

Para se obter os resultados referentes as propriedades mecânicas que são desejadas pelo trabalho, ensaios foram realizados em laboratório conforme norma específica de cada um, utilizando os materiais apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Normas e materiais utilizados em cada ensaio realizado

ENSAIO	NORMA	MATERIAIS
Resistência à Abrasão	DIN ISO 4649	<ul style="list-style-type: none"> • Abrasômetro de rolo; • Corpo de prova do composto de borracha; • Balança analítica digital; • Becker; • Água destilada.
Resiliência	DIN 53512	<ul style="list-style-type: none"> • Resiliômetro; • Corpo de prova do composto de borracha.
Dureza	ASTM D2240	<ul style="list-style-type: none"> • Durômetro; • Corpo de prova do composto de borracha.
Alongamento/Ruptura	ASTM D412-16	<ul style="list-style-type: none"> • Dinamômetro; • Corpo de prova do composto de borracha.

Rasgo	ASTM D624	<ul style="list-style-type: none"> • Dinamômetro; • Corpo de prova do composto de borracha.
-------	-----------	---

Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

3.3 Preparação das amostras

Os compostos de borracha apresentam formulações diferentes, com base em estudos realizados anteriormente pela indústria na qual foram realizados os ensaios para esta pesquisa. Os compostos foram desenvolvidos de forma a serem comercialmente viável, com o intuito de serem aplicados como revestimentos em equipamentos utilizados na mineração em geral. As formulações são apresentadas na Tabela 2. A porcentagem foi omitida a pedido do fabricante.

Tabela 2 - Formulações dos compostos de borracha

IB 5004 Borracha Natural	TI 5001 Borracha Clorobutílica	CI 5001 Borracha Neoprene
Borracha Natural	Borracha Clorobutil	Borracha Neoprene
Borracha Polibutadieno	Borracha Natural	Borracha Natural
Óxido de Zinco	Estearina	Estearina
Estearina	Antioxidante 6 PPD	Óxido de Magnésio
Antioxidante 6 PPD	Negro de Fumo 660	Seriatic WB 32
Seriatic WB 16	Sulfato de Bário	Antioxidante 6 PPD
Negro de Fumo 339	Vaselina	Resina Unilene A80
Enxofre	Negro de Fumo 220	Negro de Fumo 339
Acelerador CZ	Óleo Plastificante NML	Óleo Plastificante DOP
Acelerador MBTS	Enxofre	Enxofre
Inibidor PVI	Acelerador ZBDC	Acelerador DPG
	Acelerador MBTS	Acelerador TMTD
	Óxido de Zinco	Óxido de Zinco

Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

Nas formulações apresentadas na Tabela 2, é possível notar que todos os compostos apresentam a borracha natural. Isso ocorre porque a adição de borracha natural auxilia no escoamento do composto na matriz, de forma a mesma apresentar melhor performance durante o processo de vulcanização. É válido ressaltar que a borracha natural apresenta baixo percentual nos compostos TI 5001 e CI 5001.

As amostras foram fabricadas através do uso de uma matriz feita de aço carbono e uma prensa, conforme mostra a Figura 16.



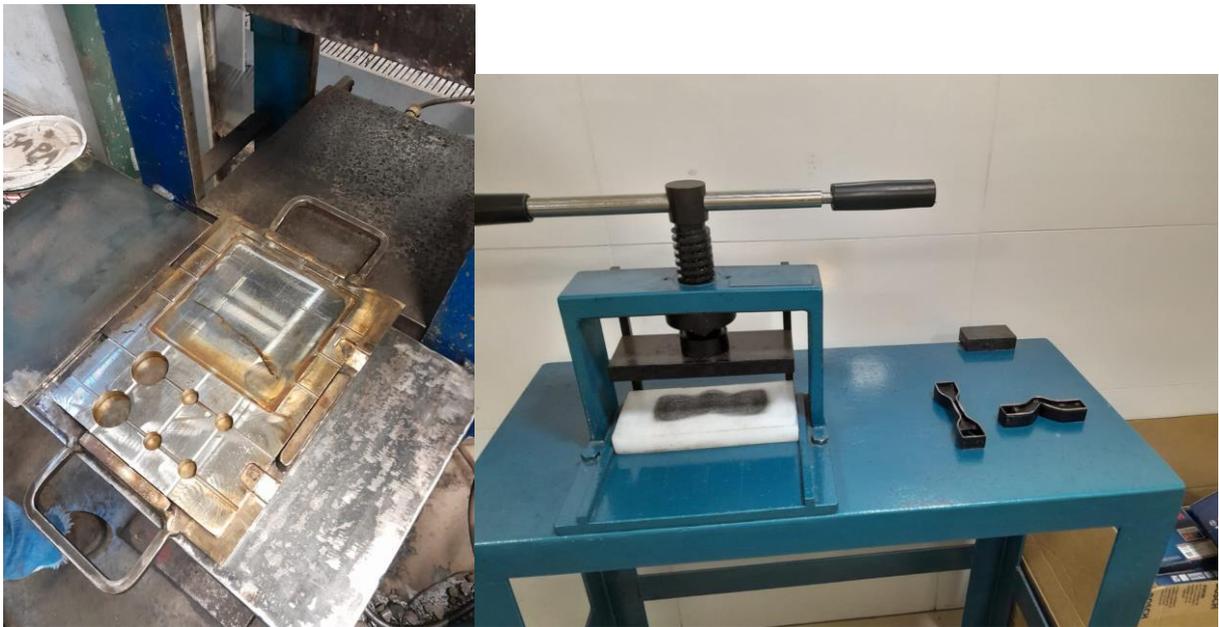
Figura 16 - Prensa e matriz para vulcanização de corpos de prova
Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

O processo realizado para a fabricação dos corpos de prova na matriz (Figura 16) é da seguinte forma:

- O composto de borracha “cru” é inserido dentro da matriz;
- A matriz é posicionada na prensa;
- A prensa aplica pressão e temperatura de forma simultânea por um tempo predeterminado, vulcanizando assim o composto;
- O composto de borracha, já vulcanizado, é removido da matriz e passa por um processo de acabamento (remoção de rebarbas).

Na matriz há duas formas de fabricação dos corpos de prova para realização dos ensaios listados nesta pesquisa. A primeira forma consiste em usar os postigos metálicos para

a confecção dos corpos de prova. Os postigos apresentam a geometria demandada. Isso faz com que o corpo de prova já saia da matriz pronto para a realização do ensaio, sendo necessário apenas as remoções de rebarbas (caso tenha). A outra forma de fabricação, também se utiliza o postigo metálico, porém o composto de borracha sai da matriz em formato de mantas quadradas. Após sair da matriz, a manta de borracha passa por um cortador, de modo a deixá-la nas dimensões exigidas para a realização dos ensaios. Os postigos metálicos e os cortadores podem ser vistos na Figura 17 - (a) Postigo metálico e (b) Cortador



(a)

(b)

Figura 17 - (a) Postigo metálico e (b) Cortador
Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

Os meios de obtenção das geometrias e as dimensões dos corpos de prova para cada ensaio são apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3 - Dimensões dos corpos de prova

TIPO DE ENSAIO	DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA	OBTENÇÃO DA GEOMETRIA
RESISTÊNCIA À ABRASÃO	Disco - Ø16 x #6 mm	Uso de postigos na matriz
RESILIÊNCIA	Disco - Ø30 x #12 mm	Uso de postigos na matriz
DUREZA	Disco - Ø30 x #12,5 mm	Uso de postigos na matriz
ALONGAMENTO / RUPTURA	Perfil – 115 x 25 x #3 mm (Conforme Figura 13)	Uso de cortadores em mantas retangulares
RASGO	Perfil – 102 x 19 x #3 mm (Conforme Figura 14)	Uso de cortadores em mantas retangulares

Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

3.4 Ensaios

3.4.1 Ensaio de resistência à abrasão

Para a análise da resistência à abrasão, foram confeccionados três corpos de prova para cada composto de borracha, cada um em formato de disco com 6 mm de espessura e 16 mm de diâmetro. Inicialmente, a massa de cada corpo de prova foi avaliada utilizando uma balança analítica com 3 casas decimais de precisão, sendo esse valor denominado a massa emergida.

Também foi calculada a densidade hidrostática de cada corpo de prova, sendo utilizado, na mesma balança analítica usada para pesagem da massa emergida, um Becker contendo água destilada e uma base com duas hastes que sustentam um pequeno gancho que foi suspenso, com um pequeno recipiente em formato de prato, uma pinça de 20 cm. A análise consistiu em posicionar o corpo de prova dentro do recipiente e imergi-lo na água destilada presente no becker e posteriormente avaliar o valor obtido na balança. Este valor é denominado massa imergida. Posteriormente, foi calculado o valor de densidade do corpo de prova utilizando a Eq.1.

$$\delta = \frac{ME \times \delta L}{ME - MI} \quad (1)$$

Sendo δ a densidade hidrostática em g/cm³; δL a densidade do líquido no qual o corpo de prova foi imergido em g/cm³; ME a massa emergida em g; e MI a massa imergida em g. Vale ressaltar que δL da água destilada, líquido utilizado nesta pesquisa, é de 1g/cm³.

O ensaio de resistência à abrasão no abrasômetro de rolo, norma DIN ISO 4649, consiste em transladar o corpo de prova por uma distância de 400 mm sobre um tambor com 150 mm de diâmetro que gira em sentido horário a 40 rpm. Desta forma o corpo de prova sempre está sobre abrasivos novos. O tambor é revestido com uma lixa de grão 60 e com abrasividade 220 mg. É aplicado sobre o corpo de prova, por meio de peso morto, uma força normal de 10 N.

Por fim, os corpos de prova são novamente pesados. A perda volumétrica é dada pela Eq. 2.

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\delta} \quad (2)$$

Sendo ΔV é a perda volumétrica em mm³; Δm é a perda mássica em g; e δ é a densidade hidrostática do material em g/mm³.

3.4.2 Ensaio de resiliência

Para a análise da resiliência, foram fabricados três corpos de prova para cada composto de borracha, em forma de disco, com 30 mm de diâmetro e 12 mm de espessura.

O ensaio consiste em impactar o corpo de prova com um pêndulo de 200 mm de comprimento a partir de um ângulo de 90°. Após o impacto o pêndulo retorna e a energia perdida é pedida pela diferença nas alturas inicial e final. Para um caso ideal, a energia gerada

pelo pêndulo é de 500 J, portanto, o resultado é uma porcentagem do rebote ideal. O ensaio foi repetido três vezes em cada corpo de prova.

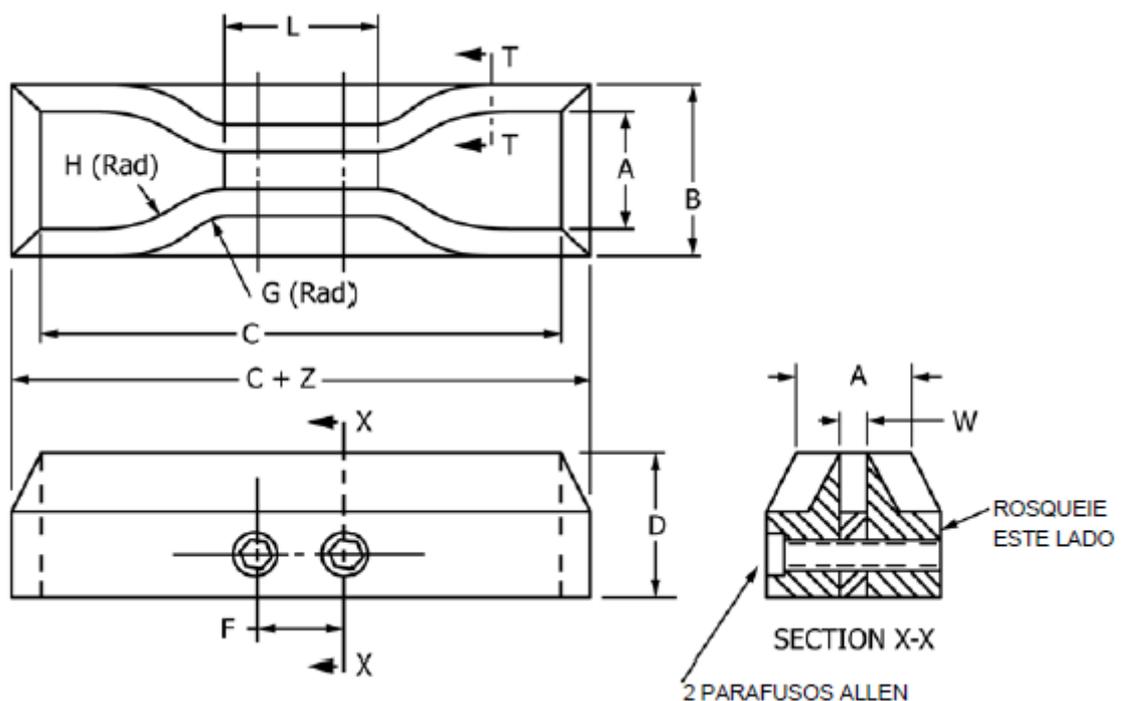
3.4.3 Ensaio de dureza

Para o ensaio de dureza, foram empregados três corpos de prova para cada composto, com dimensões de 30 mm de diâmetro e 12,5 mm de espessura.

O procedimento avaliou a dureza dos corpos de prova através da penetração vertical do indentador do durômetro em uma face lisa do corpo de prova, apresentando o resultado em escala Shore A. Este ensaio foi repetido três vezes para cada corpo de prova, com a força de penetração padronizada pelo equipamento em 10N.

3.4.4 Ensaio de alongamento/ruptura

Para o ensaio de alongamento/ruptura, foram desenvolvidos 4 corpos de prova, para cada tipo de composto de borracha, com dimensões de 115 mm de comprimento, 25 mm de largura e 3 mm de espessura. Tais corpos de prova foram cortados em formato de haltere, com as geometrias do cortador com cunha tipo C (Figura 18), conforme norma ASTM D412-16.



(a)

Dimensão	Unid.	Tolerância	Cunho A	Cunho B	Cunho C	Cunho D	Cunho E	Cunho F
A	mm	±1	25	25	25	16	16	16
B	mm	max	40	40	40	30	30	30
C	mm	min	140	140	115	100	125	125
D	mm	±6 ^g	32	32	32	32	32	32
D-E	mm	±1	13	13	13	13	13	13
F	mm	±2	38	38	19	19	38	38
G	mm	±1	14	14	14	14	14	14
H	mm	±2	25	25	25	16	16	16
L	mm	±2	59	59	33	33	59	59
W	mm	+0.05, -0.00	12	6	6	3	3	6
Z	mm	±1	13	13	13	13	13	13

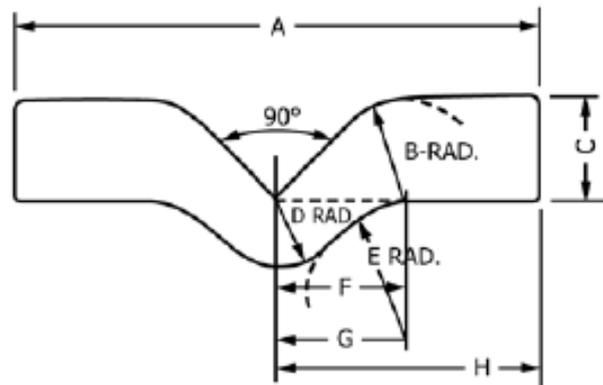
(b)

Figura 18 - (a) Desenho dos cortadores (b) Dimensionais conforme tipo de cunha
 Fonte: Adaptado de ASTM D412-16, 2021.

O ensaio consistiu em prender o corpo de prova no dinamômetro e tracioná-lo até a sua ruptura, mantendo a velocidade padrão de tração de 500 mm/min. O resultado foi dado pelo próprio equipamento, que informou o percentual de alongamento o corpo de prova obteve em relação ao seu dimensional inicial.

3.4.5 Ensaio de rasgo

Para desenvolvimento do ensaio de rasgo, foram confeccionados 4 corpos de prova para cada composto de borracha. As dimensões apresentadas pelos corpos de prova são 102 mm de comprimento, 19 mm de largura e 3 mm de espessura, obtidas com o auxílio de um cortador com cunha tipo C (Figura 19), conforme norma ASTM D624.



Cunho C

dimensões	milímetros		polegadas	
	valor	tolerância	valor	tolerância
A	102	±0.50	4.0	±0.02
B	19	±0.05	0.75	±0.002
C	19	±0.05	0.75	±0.002
D	12.7	±0.05	0.5	±0.002
E	25	±0.05	1.0	±0.002
F	27	±0.05	1.061	±0.002
G	28	±0.05	1.118	±0.002
H	51	±0.25	2.0	±0.01

Figura 19 - Desenho com dimensional do cortador com cunha tipo C
 Fonte: Adaptado de ASTM D624, 2020.

Assim como no ensaio de alongamento/ruptura, o ensaio consistiu em prender o corpo de prova em um dinamômetro e tracioná-lo, mantendo a velocidade padrão de tração de 500 mm/min, até que se propague um rasgo no corpo de prova. O resultado, gerado no dinamômetro, foi dado em N/mm.

3.5 Variáveis e indicadores

O presente trabalho tem como objetivo apresentar resultados de ensaios realizados em laboratório das propriedades mecânicas dos compostos de borracha natural, borracha neoprene e borracha clorobutílica. Os ensaios realizados visam obter valores de resistência à abrasão, resiliência, dureza, alongamento/ruptura e rasgo. Dito isso, podemos indicar as variáveis e os indicadores conforme indicado conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Variáveis e indicadores estudados

VARIÁVEIS	INDICADORES
<ul style="list-style-type: none"> • Composto de Borracha Natural; • Composto de Borracha Neoprene; • Composto de Borracha Clorobutílica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência à Abrasão • Resiliência • Dureza • Alongamento/Ruptura • Rasgo

Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

3.6 Instrumentos de coleta de dados

As coletas de dados dos ensaios foram feitas em uma indústria de artefatos de borracha localizada no estado de Minas Gerais, na qual possui em seu laboratório todos os materiais necessários para a realização e coleta dos ensaios dos compostos de borracha.

3.7 Tabulação de dados

Após a realização dos ensaios com os compostos de borracha natural, neoprene e clorobutílica, os resultados foram adicionados em uma planilha de Excel e transformando-os em gráficos de colunas para melhor comparação entre os resultados de cada composto.

3.8 Considerações finais do capítulo

Este capítulo teve como intuito apresentar as ferramentas e os métodos aplicados para chegar nos objetivos definidos no início do trabalho. No próximo capítulo será apresentado e discutido os resultados com o intuito de avaliar as características de cada composto de borracha estudado (natural, clorobutílica e neoprene). Posteriormente com tal análise, foi possível chegar em uma conclusão, determinando assim qual dentre os compostos estudados apresenta melhores propriedades para ser aplicado como revestimento em rotor de bomba de polpa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados, em tópicos, os resultados. Ao final do capítulo, será apresentado uma tabela comparativa com todos os resultados obtidos, comparando e discutindo eles de forma a analisar a aplicação deles como revestimento em rotores de bomba de polpa.

4.1 Resultado do ensaio de resistência à abrasão

O ensaio de resistência a abrasão avalia a capacidade de o composto de borracha a resistir ao desgaste com a passagem do mesmo em um corpo abrasivo. O resultado deste ensaio é dado em perda volumétrica de material em mm^3 . Para isso, avaliou-se primeiro a massa emergida e imergida em água destilada do corpo de prova. Os valores são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Massa emergida e imergida dos compostos de borracha

COMPOSTO		MASSA [g]		
-		CP01	CP02	CP03
IB 5004 Natural	EMERGIDO	2,403	2,446	2,407
	IMERGIDO	0,061	0,053	0,047
TI 5001 Clorobutílica	EMERGIDO	2,964	2,905	2,945
	IMERGIDO	0,500	0,479	0,501
CI 5001 Neoprene	EMERGIDO	2,469	2,475	2,457
	IMERGIDO	0,450	0,460	0,457

Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

Sabendo-se que a densidade da água destilada, usada para análise da massa imergida, é de 1g/cm^3 e com os dados da Tabela 5, foi possível descobrir a densidade do composto de borracha a partir do uso da Eq.1. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores obtidos de densidade dos compostos de borracha

COMPOSTO	DENSIDADE [g/cm ³]				
	CP01	CP02	CP03	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
-					
IB 5004 Natural	1,026	1,022	1,020	1,023	0,003
TI 5001 Clorobutílica	1,203	1,197	1,205	1,202	0,004
CI 5001 Neoprene	1,223	1,228	1,229	1,227	0,003

Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

Posteriormente, foi avaliado a diferença de massa dos corpos de prova, sendo eles pesados antes e depois do ensaio no abrasômetro de rolo. Os valores são encontrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Massa inicial, final e a diferença dos compostos de borracha após o ensaio no abrasômetro de rolo

COMPOSTO		MASSA [g]		
-		CP01	CP02	CP03
IB 5004 Natural	INICIAL	2,403	2,446	2,407
	FINAL	2,321	2,383	2,323
	DIFERENÇA	0,082	0,063	0,084
TI 5001 Clorobutílica	INICIAL	2,964	2,905	2,945
	FINAL	2,624	2,571	2,545
	DIFERENÇA	0,340	0,334	0,400
CI 5001 Neoprene	INICIAL	2,469	2,475	2,457
	FINAL	2,290	2,293	2,270
	DIFERENÇA	0,179	0,182	0,187

Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

Com os valores apresentados acima é possível encontrar a perda volumétrica de cada corpo de prova dos compostos de borracha utilizando-se a Eq.2. Os valores dos cálculos estão representados na Tabela 8.

Tabela 8 - Perda volumétrica dos compostos de borracha

COMPOSTO	PERDA VOLUMÉTRICA [mm ³]				
	CP01	CP02	CP03	MEDIA	DESVIO PADRÃO
IB 5004 Natural	79,92	61,64	82,35	74,6	11,32
TI 5001 Clorobutílica	282,6	279	332	297,9	29,57
CI 5001 Neoprene	146,4	148,2	152,2	148,9	2,96

Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

Com base nas informações da Tabela 8 foi gerado um gráfico de colunas no Excel, como pode ser visto na Figura 20 - Gráfico de coluna com os resultados de resistência à abrasão.

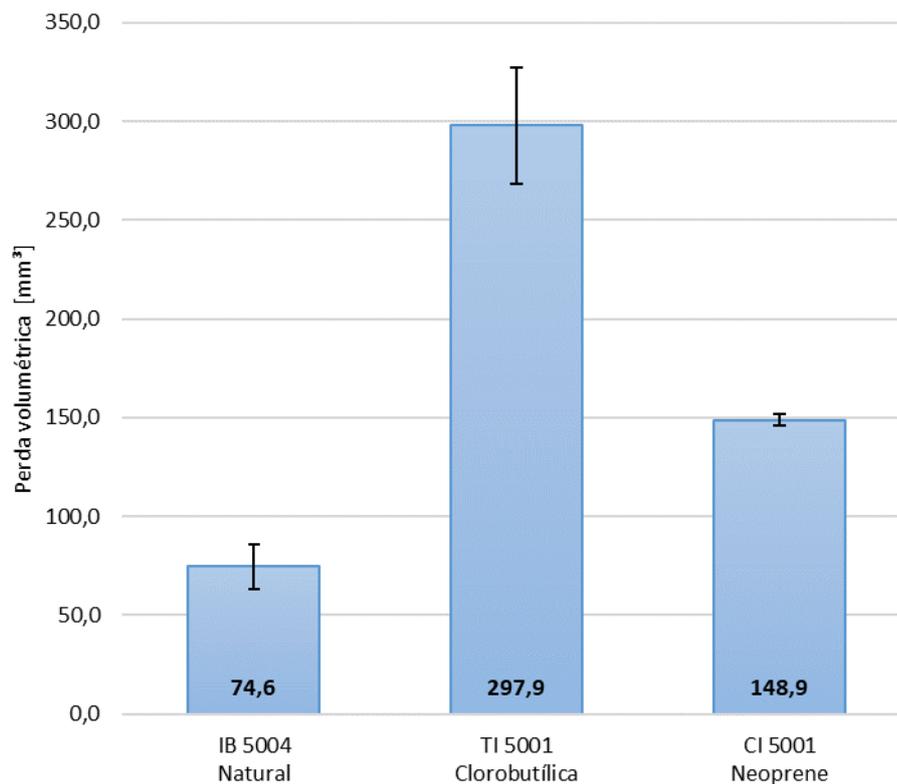


Figura 20 - Gráfico de coluna com os resultados de resistência à abrasão

Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

Com os dados encontrados no ensaio de resistência à abrasão é possível afirmar que, dentre os compostos, o de borracha natural (IB 5004) apresentou o melhor resultado. O

composto teve a menor média de perda volumétrica no corpo de prova, sendo ela de 74,64 mm³. Já o composto de borracha neoprene (CI 5001) apresentou o segundo melhor resultado, sendo uma média de perda volumétrica de 148,91 mm³. Esse valor corresponde a uma perda volumétrica duas vezes maior quando se comparado com o composto de borracha natural. O composto de borracha clorobutílica (TI 5001) foi o composto que mais apresentou perda volumétrica em seu corpo de prova, apresentando uma média de 297,87 mm³, o que representa uma perda quatro vezes maior do que a do composto IB 5004.

4.2 Resultado do ensaio de resiliência

O ensaio de resiliência avalia a capacidade de o composto de borracha absorver energia após sofrer o impacto do resiliômetro. O resultado do mesmo é dado pelo percentual de rebote da haste. Os resultados são apresentados na Tabela 9. É válido ressaltar que o ensaio foi repetido três vezes em cada corpo de prova estudado, sendo assim, os valores apresentados na tabela são uma média dos resultados encontrados em cada um.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de resiliência

COMPOSTO	REBOTE [%]				
	CP01	CP02	CP03	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
-					
IB 5004 Natural	68	66	65	66,33	1,53
TI 5001 Clorobutílica	19,33	19,33	19	19,22	0,19
CI 5001 Neoprene	45,33	47	47,33	46,55	1,07

Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

Com os valores encontrados na Tabela 9, foi criado um gráfico de colunas no Excel, representado na Figura 21.

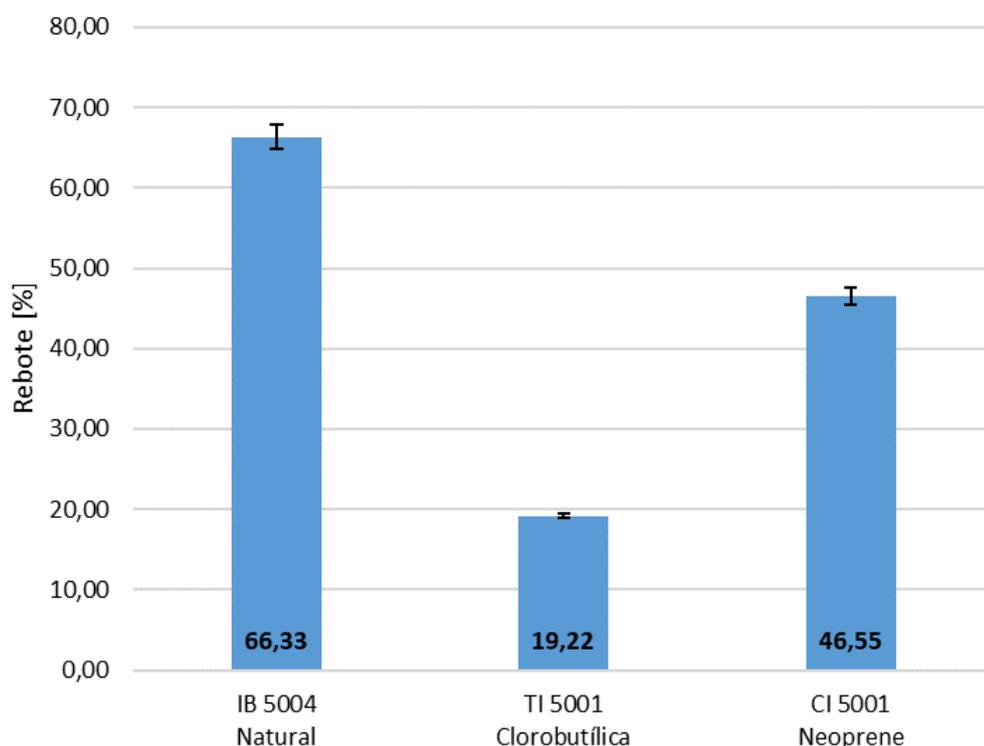


Figura 21 - Gráfico de coluna com os resultados de resiliência
Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

O composto de borracha natural (IB 5004), como mostra a Figura 21, apresenta melhor resiliência, uma vez que obteve 66,33% de altura no rebote do ensaio. O composto de borracha neoprene (CI 5001) apresentou o resultado de 46,55% de altura de rebote. Este valor representa um valor equivalente a 70,18% de performance quando se comparado ao resultado do composto de borracha natural. Já o composto de borracha clorobutílica (TI 5001) apresenta o pior resultado entre os compostos estudados, com sua resiliência de 19,22%, o que equivale a 29% de resiliência do composto IB 5004.

4.3 Resultado do ensaio de dureza

O ensaio de dureza do composto de borracha avalia a capacidade de o mesmo resistir a uma penetração de um corpo no composto. Para tal análise, cada corpo de prova foi testado três vezes com um durômetro de escala Shore A. A Tabela 10 apresenta os resultados das médias encontradas em cada corpo de prova.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de dureza

COMPOSTO	DUREZA [Shore A]				
	CP01	CP02	CP03	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
IB 5004 Natural	49	50	50	49,67	0,58
TI 5001 Clorobutílica	55	55	54	54,67	0,58
CI 5001 Neoprene	53	55	54	54,00	1,00

Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

Com os valores encontrados na Tabela 10 foi desenvolvido um gráfico de colunas no Excel, como mostra a Figura 22.

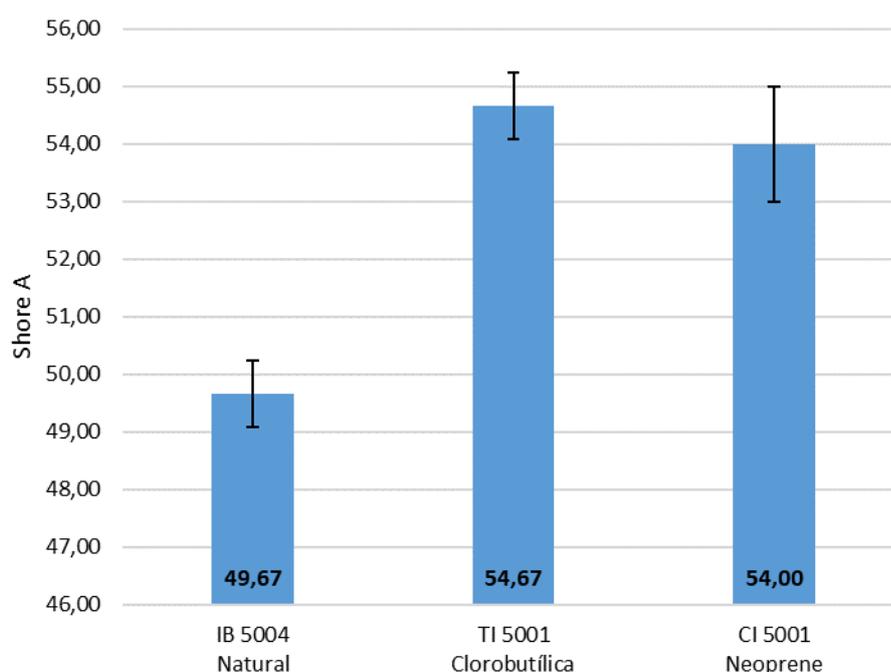


Figura 22 - Gráfico de coluna com os resultados de dureza

Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

Nos resultados apresentados na Figura 22, é possível notar que os valores obtidos de dureza são próximos, sendo a dureza 54,67 Shore A para o composto de borracha clorobutílica, 54 Shore A para o composto de borracha neoprene e 49,67 Shore A para o composto de borracha natural. Estatisticamente, ainda é possível afirmar que não há diferenças significativas entre os compostos de borracha clorobutílica e neoprene. Esses resultados podem demonstrar a tentativa de padronização da propriedade de dureza entre os compostos para a realização deste trabalho. A possibilidade de padronização ocorre pois, com

uma propriedade padronizada, é possível analisar o comportamento das demais propriedades do composto de borracha de forma comparativa.

4.4 Resultado do ensaio de alongamento/ruptura

Os compostos de borracha natural, neoprene e clorobutílica apresentam os resultados de alongamento e ruptura com base nos valores percentuais que o corpo de prova de cada composto conseguiu alongar até a sua ruptura com a aplicação de força do dinamômetro. Desta forma, é possível analisar a elasticidade de cada composto. Os valores percentuais obtidos são possíveis de serem visualizados na Tabela 11 Figura 23.

Tabela 11 - Resultados dos ensaios de alongamento/ruptura

COMPOSTO	ALONGAMENTO [%]					
	CP01	CP02	CP03	CP04	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
-						
IB 5004 Natural	568,21	548,29	499,3	564,47	545,07	27,46
TI 5001 Clorobutílica	403,09	363,56	401,92	397,06	391,41	16,24
CI 5001 Neoprene	344,17	422,06	443,59	447,54	414,34	41,66

Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

Com os resultados obtidos na Tabela 11, foi possível elaborar o gráfico de colunas no Excel visto na Figura 23.

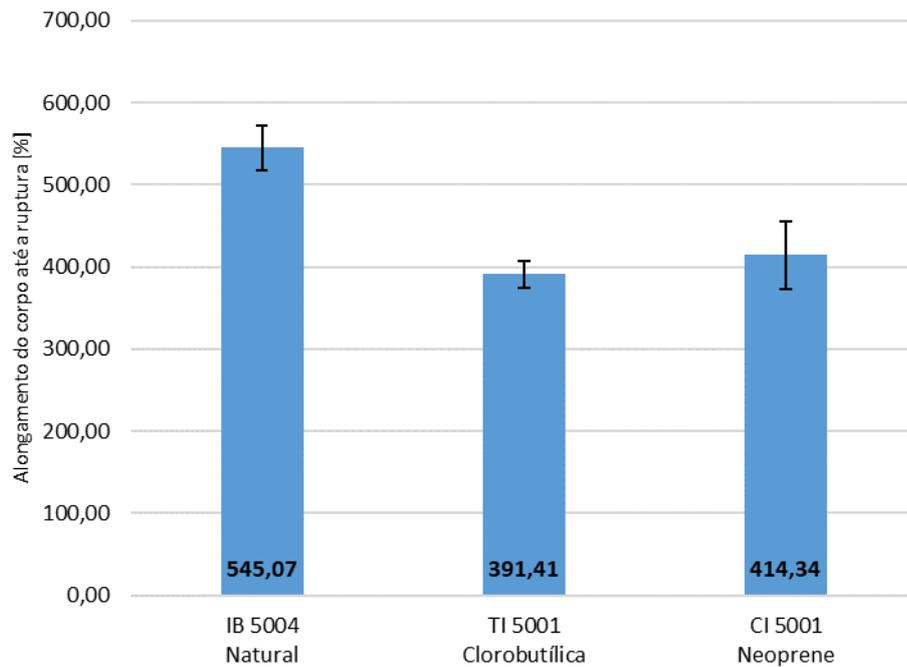


Figura 23 - Gráfico de coluna com os resultados de alongamento/ruptura
Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

Na Figura 23 é possível ver que, dentre os compostos estudados o de borracha natural (IB 5004) foi o que apresentou melhor alongamento (545,07%) até que o corpo de prova se rompesse. O composto de borracha neoprene (CI 5001) apresentou o alongamento de 414,34% até que se rompesse. Esse valor equivale a 76% de performance nesta propriedade quando se comparado ao valor encontrado no composto IB 5004. O composto de borracha clorobutílica (TI 5001) apresentou, dentre os três compostos estudados, o pior resultado de alongamento (391,41%), sendo o equivalente a 71,8% de performance quando se comparado ao composto IB 5004. Apesar de apresentar os piores valores, o composto de borracha clorobutílica não apresenta diferenças significativas em uma análise estatística quando se comparado ao composto de borracha neoprene.

4.5 Resultado do ensaio de rasgo

Os resultados apresentados na Tabela 12, demonstram a força necessária que o dinamômetro precisou para que o corpo de prova dos compostos de borracha natural, neoprene e clorobutílica apresentassem uma secção de rasgo em seu corpo.

Tabela 12 - Resultados dos ensaios de rasgo

COMPOSTO	RASGO [N/mm]					DESVIO PADRÃO
	CP01	CP02	CP03	CP04	MÉDIA	
IB 5004 Natural	27,17	34,12	33,94	29,61	31,21	3,41
TI 5001 Clorobutílica	18,78	19,11	17,96	18,93	18,70	0,51
CI 5001 Neoprene	25,94	19,69	20,79	21,64	22,02	2,74

Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

Com base na Tabela 12 e com auxílio do Excel, foi desenvolvido um gráfico de colunas (Figura 24) com as informações obtidas com esta tabela.

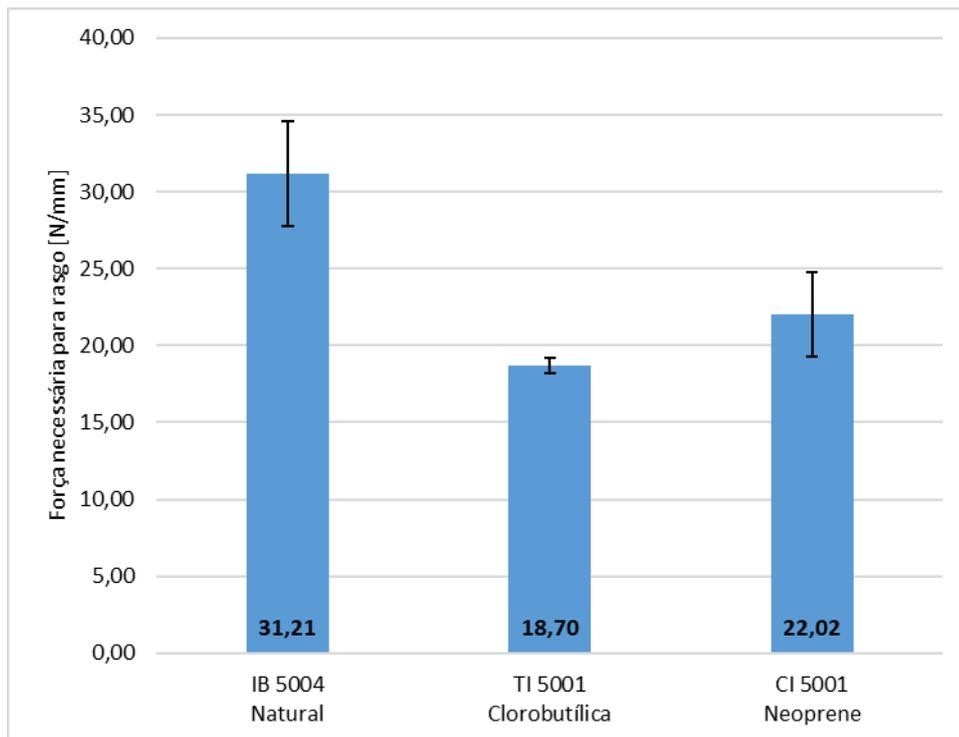


Figura 24 - Gráfico de coluna com os resultados de rasgo

Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

Os resultados apresentados no gráfico demonstram que o composto, dentre os estudados, que apresenta menor resistência ao rasgo é o TI 5001 (borracha clorobutílica), sendo necessário uma força de 18,7 N/mm para realização do rasgo. Em contrapartida, o composto de borracha natural (IB5004) apresentou a melhor resistência ao rasgo, sendo

necessário a aplicação 31,21 N/mm para se rasgar o corpo de prova. Isso indica que o composto IB 5004 apresenta uma resistência 67% maior do que o composto TI 5001. Já o composto de borracha neoprene (CI 5001) apresentou a capacidade de resistir ao rasgo no corpo de prova até 22,02 N/mm, o que representa 70,5% de performance quando se comparado com os valores do composto de borracha natural.

4.6 Comparação final dos resultados

Com os resultados dos ensaios de resistência à abrasão, resiliência, dureza, alongamento/ ruptura e rasgo obtidos, foi possível criar a Tabela 13, que tem como intuito juntar e comparar os valores apresentados neste capítulo de forma mais direta. Tal tabela apresenta os dados de forma percentual, pegando como referência o melhor resultado (indicado como “100%” na tabela) de cada ensaio dentre os compostos e comparando com os demais.

Tabela 13 - Comparação direta de todos os ensaios realizados

COMPOSTO	RESISTÊNCIA À ABRASÃO	RESILIÊNCIA	DUREZA	ALONGAMENTO / RUPTURA	RASGO
IB 5004	100%	100%	90,9%	100%	100%
TI 5001	25,1%	29%	100%	71,8%	59,9%
CI 5001	50,1%	70,2%	98,8%	76%	70,5%

Fonte: Pesquisa Direta, 2023.

Na Tabela 13, nota-se que a propriedade de dureza, em números absolutos, dos compostos de borracha se mantém próxima. Isso pode ocorrer pois, para a realização da formulação dos mesmos, teve-se como base a padronização desta propriedade para analisar o comportamento das demais. Compostos de borracha podem apresentar propriedades distintas de acordo com a aplicação e o percentual de ingredientes em sua formulação. Por isso, é válido a padronização de algumas propriedades para a realização de estudos, auxiliando no desenvolvimento de um composto que seja aplicável e comercializável.

Ainda na tabela, é possível notar que o composto de borracha clorobutílica (TI 5001) apresenta os piores resultados em todos os ensaios realizados, com exceção da dureza. No comparativo, é possível ver que a sua performance a resistência à abrasão, resiliência e rasgo estão muito abaixo quando comparada ao composto de borracha natural. Sua melhor propriedade é no alongamento/ruptura, onde apresenta uma performance de 71,8% comparada ao resultado do composto de borracha natural.

O composto de borracha natural (IB 5004) apresentou, dentre os 3 compostos, o melhor desempenho em todos os ensaios realizados nesta pesquisa. Isso demonstra que o composto apresenta boas propriedades para atuar como revestimento de bomba de polpa, protegendo a estrutura do rotor e garantindo boa resistência ao desgaste da polpa de minério.

Já o composto de borracha neoprene (CI 5001) apresentou os resultados intermediários da pesquisa. Quando se comparado com a performance do composto de borracha natural (composto que apresentou os melhores resultados), os valores encontrados nas propriedades de resiliência (70,2%), alongamento/ruptura (76%) e rasgo (70,5%) são satisfatórios para aplicação do mesmo como revestimento em rotores de bomba de polpa. O mesmo não pode ser dito ao comparar a sua propriedade de resistência a abrasão, onde apresenta uma performance de 50,1% comparada com o resultado do composto IB 5004. Isso demonstra que o composto sofreria com um desgaste prematuro devido a sua baixa resistência a abrasivos.

Mesmo que o composto de borracha natural tenha provado ter as melhores características para ser aplicado como revestimento em rotores de bomba de polpa, não é possível descartar o uso dos demais compostos de borracha para uso como revestimento. Isso ocorre, pois, dependendo das propriedades do material na qual o composto de borracha for interagir, a performance da borracha pode ser alterada. Conforme indicado na tabela apresentada no ANEXO I, cada tipo de borracha apresenta melhor propriedade mecânica a uma situação. A resiliência da borracha natural, indicada como melhor propriedade do composto na tabela anexada, pode ser comprovada com o resultado laboratorial deste trabalho, uma vez que foi obtido uma média de 66,33% de rebote no resiliômetro. Já a impermeabilidade a gases da borracha clorobutílica e a resistência a óleos e intempéries da borracha neoprene não foram possíveis avaliar com os ensaios realizados.

5 CONCLUSÃO

Com base nos valores obtidos nesta pesquisa, é possível definir que, dentre os compostos de borracha natural, neoprene e clorobutílica, para ser aplicado como revestimento em rotores de bomba de polpa, o melhor é o composto de borracha natural (IB 5004). Isto se deve as suas boas propriedades, uma vez que apresentou as melhores performances em todos os ensaios realizados, com exceção da dureza (na qual apresentou resultados similares aos demais compostos de borracha estudados). Isso demonstra que o composto de borracha natural é capaz de proteger o rotor de bomba de polpa de forma a resistir aos ataques da polpa de minério além de garantir a integridade do produto, não expondo a base estrutural do mesmo.

Referente aos demais compostos estudados, o composto de borracha neoprene apresentou, mesmo que com valores inferiores ao composto de borracha natural, boas propriedades de resiliência, alongamento/ruptura e rasgo. O ponto fraco deste composto foi o resultado de sua propriedade de resistência à abrasão, onde apresentou valores muito inferiores quando se comparado com o composto de borracha natural. Já o composto de borracha clorobutílica demonstrou valores ruins nas propriedades que foram estudados nesta pesquisa, obtendo resultado plausível apenas no ensaio de alongamento/ruptura.

5.1 Proposta para realização de trabalhos futuros

Para futuras pesquisas com os compostos de borracha utilizados como revestimento em rotores de bomba de polpa, é interessante que seja desenvolvido rotores com tais compostos e avaliado, na prática, a performance e durabilidade do produto; confrontando posteriormente os resultados obtidos em laboratório com os resultados obtidos na aplicação.

Assim como dito anteriormente nesta pesquisa, cada composto pode apresentar melhor propriedade a uma situação de aplicação. Como apresenta o ANEXO I, a borracha natural tem como melhor propriedade sua resiliência; a borracha neoprene sua resistência à óleos e intempéries; e a borracha clorobutílica sua impermeabilidade a gases. Portanto, em futuras pesquisas, é válido a avaliação dos compostos estudados nesta pesquisa em outros tipos de aplicação industrial, como por exemplo o uso destes compostos como revestimento de gasodutos, linhas petroquímicas e em equipamentos que sofrem ataques químicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D624**: Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers. Pensilvânia: ASTM, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D412-16**: Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers-Tension. Pensilvânia: ASTM, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2240**: Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness. Pensilvânia: ASTM, 2021.

ANDREASSI, T.; SBRAGIA, R. Relações entre indicadores de P&D e de resultado empresarial. **Revista de Administração**, v. 37, n. 1, p. 72-84, 2002.

ASHBY, M. F. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltd, 2017. 692 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ISO 4649**: Borracha, vulcanizada ou termoplástica - Determinação da resistência à abrasão usando um dispositivo de tambor cilíndrico rotativo. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

BISCO, A. P. R., **A influência de algumas variáveis sobre a reologia de polpas minerais**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Curso de Pós- graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Belo Horizonte, 2009. 98p.

CARVALHO, D.F. **Instalações Elevatórias: Bombas**. 6.ed.Belo Horizonte: FUMARC, 1999. 355p.

CARVALHO, P. R. D. **Estudo do comportamento ao desgaste e corrosão dos aços inoxidáveis aisi 316L e aisi 420 depositados pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico**. 2007. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

Centrais Elétricas Brasileiras S.A (ELETROBRÁS). **Bombas**: Guia Básico. Rio de Janeiro, 2009. 239 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 53512**: Determining the rebound resilience of rubber using the Schob pendulum. Berlin: DIN, 2000.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN ISO 4649**: Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of abrasion resistance using a rotating cylindrical drum device. Berlin: DIN, 2017.

FLORENCIO, I. M.; FARIA, M. T. V.; HUEBNER, R. Análise de falha de revestimento de sucção de bomba de polpa. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**, v. 24, n. 1, p. 13-24, 2020.

GAHR, K.-H. Z. **Microstructure and wear of materials**. [S.1.]: Elsevier, 1987. v. 10

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T (Org.). **Métodos de Pesquisa**. 1. ed. Santa Catarina: Editora UFRGS, 2009.

KHALID, Y. A.; SAPUAN, S. M. Wear analysis of centrifugal slurry pump impellers. **Industrial Lubrication and Tribology**, v. 59, n. 1, p. 18-28, 2007.

LEITE, R. V. D. M.; MARQUES, P. V. Estudo Comparativo da Resistência ao Desgaste Abrasivo do Revestimento de Três Ligas Metálicas Utilizadas na Indústria, Aplicadas por Soldagem com Arames Tubulares. **Soldagem e Inspeção**, v. 14, n. 4, p. 329-335, 2009.

LUNA, C. B. B. et al. Estudo do Comportamento Mecânico, Termomecânico e Morfológico de Misturas de Poliestireno/Composto de Borracha Reciclada (SBR). **Revista Matéria**, v. 20 n. 2, p. 322-332, 2015.

MÁSCIA, R. **Desenvolvimento e Caracterização Tribológica de Materiais Resistentes ao Desgaste Abrasivo para Indústria Mineradora de Cassiterita**. 2002. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.

OLIVEIRA, V. **Borracha nitrílica reforçada com fibra aramida para aplicação em mangotes**. 2015. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

PEDRINHA, I. **Produtos usados nas composições de elastômeros e fundamentos matemáticos das formulações**. Módulo I – Tecnologia da Borracha I – Apostila IPG, 2022.

PFLEIDERER, C.; PETERMANN, H. **Máquinas de fluxo**. Tradução de ALMEIDA, A. L. S. D.; SANTOS, J. A. R. D.; SOUZA, Z. D. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1979. 455 p. Título Original: Strömungs maschinen.

PINHEIRO, M. D. S (Org.). **Manual de Formulações de Artefatos de Borracha**. 2. ed. Porto Alegre: Editora DG, 2016.

RATIA, V.; MIETTUNEN, I.; KUOKKALA, V. T. Surface deformation of steels in impact-abrasion: The effect of sample angle and test duration. **Wear**, v. 301, n. 1-2, p. 94-101, 2013.

RIPPEL, M. M; BRAGANÇA, F. C. Borracha Natural e Nanocompósitos com Argila. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p.818-826, 2009.

SANTOS, JR. R. M. S. et al. Metodologia para dimensionamento de chute caixa de pedra – resultados preliminares. In: XXVII ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 2017, Belém, PA. **Anais...** Pará: 2017. p. 1-8.

SILVA, J. T.; IVO, L. A. M.; OLIVEIRA, P. S.; PELLEGRINO, S. L. **Bombas Centrífugas Passo a Passo**. Salvador: Turbotech Engenharia LTDA, 1999.

SILVA, V. D. **Bombas Centrífugas de Polpa**. 2011. 60 f. Monografia (Curso de especialização em engenharia de recursos minerais – CEERMIN) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

VIDAL, A. M. **Estudo de bombeamento de partículas grossas**. 2011. 68 f. Monografia (Curso de especialização em engenharia de recursos minerais – CEERMIN) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

XENOS, H. G. **Gerenciando a Manutenção Produtiva**. Belo Horizonte: Falconi, 1998. 312 p.

ANEXO I

TABELA DAS PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS ELASTÔMEROS

TABELA DAS PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS ELASTÔMEROS MAIS COMUNS

Elastômeros	Natural	SBR	Butilílica	EPDM	Neoprene	Nitrílica	Silicone	Viton	Hypalon	Poliuretano
Designação ASTM-D-1418	NR	SBR	IIR	EPDM	CR	NBR	MQ	FKM	CSM	EU
Nome técnico	Borracha Natural	Estireno Butadieno	Isopreno Isobutileno	Etileno Propileno-Dieno	Cloropreno	Acrilonitrílica Butadieno	Silicone	Fluorelastômero	Poli Etileno Clorosulfurado	Poliuretano
Classificação ASTM-D-2000	AA	AA	AA	DA	BC	BG	FE/GE	HK	CE	BG
Melhor propriedade	Resiliência	Uso geral	Impermeável gases	Resistência Ozônio	Resistência Óleo e Intempéries	Resistência Óleo derivado de petróleo	Resistência Calor	Resistência ao Calor/Solventes	Resistência Ozônio Intempéries	Resistência Abrasão
Peso Específico Kg/litro	0.93	0.94	0.92	0.86	1.23	1.00	1.10/2,00	1.85	1.12 - 1.28	1.06
Características										
Dureza Shore A	20 a 90	30 a 90	40 a 75	10 a 90	10 a 95	20 a 95	10 a 85	60 a 95	40 a 95	90 Shore A 70 Shore D
Temp. Mínima °C	-70	-40	-40	-60	-40	-30	-100	-70	-40	-65
Temp. Máxima °C	+70	+90	+150	+150	+100	+120	+200	+260	+140	+90
Aderência a metais	Excelente	Excelente	Boa	Regular	Excelente	Boa	Boa	Fraca	Fraca	fraca
Resistência a rasgamento	Excelente	Fraca	Boa	Fraca	Boa	Boa	Fraca	Fraca	Fraca	Excelente
Resistência a abrasão	Excelente	Excelente	Boa	Boa	Boa	Excelente	Fraca	Regular/Boa	Boa	superior
Def. Perm. Compres. (DPC)	Boa	Boa	boa	Regular	Boa	Reg./Boa	Boa	Boa	Boa	Excelente
Resiliência	Superior	Boa	Regular	Boa	Boa	Boa	Boa	Regular	Boa	Boa
Resistência dielétrica	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Muito Boa	Fraca	Boa	Boa	Excelente	Excelente
Impermeabilidade aos gases	Boa	Fraca	Superior	Boa	Boa	Boa	Fraca	Excelente	Excelente	Boa
Ácidos/bases Diluídos	Excelente	Regular/Boa	Excelente	Excelente	Muito Boa	Boa	Regular	Excelente	Excelente	Fraca
Ácidos/bases Concentrados	Regular/Boa	Regular/Boa	Excelente	Boa	Boa	Boa	Regular	Excelente	Excelente	Fraca
Hidrocarbonetos Alifáticos (gasol/Diesel)	Fraca	Fraca	Fraca	Fraca	Boa	Excelente	Fraca	Excelente	boa	Excelente
Hidrocarbonetos Aromáticos (Tolueno/Xilol)	Fraca	Fraca	Fraca	Fraca	Fraca	Boa	Fraca	Boa	Fraca	Fraca
Oxigenados (Cetona, Alcool)	Boa	Boa	Boa	Muito Boa	Fraca	Fraca	Regular	Regular	Fraca	Fraca
Óleos Lubrificantes	Fraca	Fraca	Fraca	Fraca	boa	Muito boa	Fraca	Excelente	Boa	Excelente
Óleo animal	Fraca	Fraca	Muito boa	Boa	Boa	Muito boa	Boa	Excelente	Boa	Excelente
Óleo vegetal	Fraca	Boa	Boa	Excelente	Boa	Boa	Excelente	Excelente	Boa	Excelente
Absorção de água	Muito boa	Muito boa	Muito boa	Excelente	Boa	Boa	Excelente	Muito Boa	Boa	Boa
Oxidação	Boa	Boa	Excelente	Excelente	Boa	Fraca	Regular	Excelente	Boa	Excelente
Ozônio	Regular	Regular	Excelente	Excelente	Boa	Fraca	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Resistência ao calor	Regular	Regular	Boa	Excelente	Boa	Boa	Excelente	Excelente	Excelente	Regular
Chama	Fraca	Fraca	Fraca	Fraca	Boa	Boa	Fraca	Regular	Excelente	Fraca
Isolamento elétrico	Boa	Boa	Excelente	Excelente	Regular/Boa	Fraca	Excelente	Boa	Boa	Regular

Esta Tabela é uma ampliação revisada da 1ª edição Manual de Formulações e serve somente de embasamento para o técnico iniciar o desenvolvimento da fórmula.