



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



Guilherme Martins De Souza

Estudo comparativo de revestimentos internos em
tubulações para transporte de polpa mineral: um estudo de
caso

Ouro Preto - MG
2026

Guilherme Martins De Souza

Estudo comparativo de revestimentos internos em
tubulações para transporte de polpa mineral: estudos de casos

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.

Orientador: DSc. Sávio Sade Tayer

Ouro Preto – MG
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S729e Souza, Guilherme Martins de.
Estudo comparativo de revestimentos internos em tubulações para
transporte de polpa mineral [manuscrito]: um estudo de casos. /
Guilherme Martins de Souza. - 2026.
45 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientador: Prof. Me. Sávio Sade Tayer.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Transporte - Minas e mineração. 2. Revestimentos. 3. Poliuretano.
4. Borracha - Borracha cerâmica. I. Tayer, Sávio Sade. II. Universidade
Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 620.1:678.7

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Guilherme Martins de Souza

Estudo comparativo de revestimentos internos em tubulações para transporte de poupa mineral: um estudo de casos

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

Aprovada em 12 de fevereiro de 2026

Membros da banca

Msc Sávio Sade Tayer- Orientador UFOP Universidade Federal de Ouro Preto
Dsc. Washington Luís Vieira da Silva - UFOP Universidade Federal de Ouro Preto
Dsc. Diogo Antônio de Sousa - UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto

Sávio Sade Tayer, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 12 de fevereiro de 2026



Documento assinado eletronicamente por **Sávio Sade Tayer, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/08/2026, às 09:39, 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 **1066760** e o código CRC **84B1F5AB**.

A Deus dedico mais esta etapa vencida
Aos meus pais e irmão pelos ensinamentos
A minha namorada pelo incentivo e força nos
momentos de dificuldades

A república Taberna pelo apoio e vivência

AGRADECIMENTO

Aos meus pais, Idelci e Erica pelo carinho e cuidado incondicional, sem vocês isso não seria possível.

Ao meu irmão Gustavo pela paciência com minhas reclamações e incentivo nessa caminhada.

A minha namorada Amanda pelo apoio e encorajamento diários, por nunca me deixar perder a garra e o foco nos momentos decisivos.

Ao meu orientador Sávio por me acolher em um momento de necessidade e me dar o norte e orientações para que fosse possível a realização deste trabalho.

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

Aos meus amigos que Ouro Preto me deu, Thiago, Michael, Bernardo, Gabriel, Matheus, Pedro, João Paulo, Tulio, Julia e Vitor, pelas diversões e momentos de descontrações.

“Grandes conquistas são construídas a partir de pequenos esforços repetidos diariamente”.

(Robert Collier)

RESUMO

A indústria da mineração demanda sistemas de transporte hidráulico de elevada confiabilidade, especialmente no deslocamento de polpa mineral por tubulações submetidas a condições severas de abrasão e impacto de partículas sólidas. Nessas condições, o desgaste progressivo compromete a integridade estrutural dos componentes, exigindo a aplicação de revestimentos internos capazes de aumentar a vida útil operacional e reduzir custos de manutenção. Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo entre revestimentos internos aplicados em tubulações para transporte de polpa mineral, com ênfase no poliuretano (PU), na borracha natural e na borracha com inserção cerâmica. A pesquisa caracteriza-se como exploratória, qualitativa, bibliográfica e estudo de caso, fundamentada em revisão da literatura, análise de dados laboratoriais referentes às propriedades mecânicas dos materiais e avaliação de dois estudos de caso industriais em componentes críticos, como curvas e cachimbos. A análise integrada considerou variáveis como tipo de revestimento, propriedades físicas, aplicação e desempenho em serviço. Os resultados indicaram que o poliuretano apresenta desempenho satisfatório em condições de severidade moderada, destacando-se pela boa resistência ao desgaste e facilidade de aplicação; a borracha natural evidenciou elevada capacidade de absorção de impacto; enquanto o sistema híbrido em borracha com cerâmica apresentou o melhor desempenho global em ambientes de alta abrasividade, combinando elevada resistência ao microcorte e maior vida útil, embora com maior custo inicial. Conclui-se que a seleção do revestimento interno deve considerar as condições operacionais, a geometria do componente e a relação entre custo e durabilidade, contribuindo para a otimização técnica e econômica dos sistemas de transporte de polpa na indústria mineral.

Palavras-chave: Mineração. Revestimentos internos. Transporte de polpa. Poliuretano. Borracha. Borracha Cerâmica

ABSTRACT

The mining industry requires highly reliable hydraulic transportation systems, particularly in the conveyance of mineral slurry through pipelines subjected to severe abrasion and particle impact. Under such conditions, progressive wear compromises the structural integrity of components, demanding the application of internal linings capable of increasing service life and reducing maintenance costs. This study aims to perform a comparative analysis of internal linings applied to pipelines used in mineral slurry transportation, focusing on polyurethane (PU), natural rubber, and rubber with ceramic inserts. The research is characterized as exploratory, qualitative, bibliographic, and based on case studies, supported by a literature review, analysis of laboratory data concerning mechanical properties, and evaluation of two industrial case studies involving critical components such as bends and spool pieces. The integrated analysis considered variables such as lining type, physical properties, application, and in-service performance. The results indicated that polyurethane shows satisfactory performance under moderate severity conditions, presenting good wear resistance and ease of application; natural rubber demonstrated high impact absorption capacity; whereas the rubber-ceramic hybrid system exhibited the best overall performance in highly abrasive environments, combining superior resistance to micro-cutting and extended service life, despite its higher initial cost. It is concluded that the selection of internal linings must consider operating conditions, component geometry, and the balance between cost and durability, contributing to the technical and economic optimization of slurry transportation systems in the mining industry.

Keywords: Mining. Slurry transportation. Internal linings. Polyurethane. Rubber. Rubber-ceramic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero atualizado (Escala 1:150.000).....	6
Fonte: Endo <i>et al.</i> (2019).....	6
Figura 2 – Relação entre perda de carga e velocidade no transporte de polpa.....	7
Figura 3 – Construção da tubulação de Borracha (mangote)	10
Figura 4 – Classificação dos processos de desgaste por modos de desgaste.....	12
Figura 5 – Distribuição da taxa de erosão em cotovelo de 90° obtida por simulação numérica (CFD).....	13
Figura 6 – Técnicas de aplicação e tipos de revestimentos	15
Figura 7 – Fluxograma metodológico	24
Figura 8 – Tubulação revestida internamente com poliuretano (PU);.....	27
Figura 9 – Tubulação revestida internamente com borracha natural.....	29
Figura 10 – Tubulação revestida internamente com borracha + cerâmica.	31
Figura 11 – Modelo 3D do projeto proposto	34
Figura 12 – Inspeção visual após 4 meses e 20 dias de uso	35
Figura 14 - Cachimbo revestido em cerâmica e desgaste do revestimento	37
Figura 15 - Cachimbo revestido em borracha + cerâmica e desgaste do revestimento.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis e indicadores do estudo	25
Tabela 3 – Propriedades da Borracha Natural	30
Tabela 4 – Propriedades da cerâmica alta alumina (92%).....	32
Tabela 5 – Propriedades da Borracha Natural	33
Tabela 6 – Comparação de desempenho no Estudo de Caso 02	38
Tabela 7 – Comparação Geral dos Revestimentos Avaliados	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos.....	3
1.4	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Mineração	5
2.2	Transporte de polpa em tubulações	6
2.3	Tubulações de aço e tubulações de borracha.....	8
2.3.1	Tubulações de Aço	9
2.3.2	Tubulações de Borracha (Mangotes Industriais).....	9
2.4	Mecanismos de desgaste em tubulações de polpa	11
2.5	Revestimentos internos aplicados ao transporte de polpa	14
2.5.1	Revestimentos internos em poliuretano (PU).....	16
2.5.2	Revestimentos internos em borracha.....	18
2.5.3	Revestimentos internos em borracha com cerâmica.....	20
3	METODOLOGIA.....	23
3.1	Tipo de Pesquisa.....	23
3.2	Materiais e Métodos	23
3.3	Variáveis e indicadores analisados	25
3.4	Instrumentos de coleta de dados	26
3.5	Tabulação dos dados.....	26
3.6	Considerações finais	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1	Revestimento Interno em Poliuretano	27
4.1.1	Propriedades laboratoriais	28
4.2	Revestimento Interno em Borracha Natural	29

4.2.1	Propriedades laboratoriais	30
4.3	Revestimento Interno em Borracha com inserção Cerâmica Alta alumina (Al_2O_3 92%)	31
4.3.1	Propriedades laboratoriais da cerâmica	31
4.3.2	Propriedades laboratoriais da matriz elastomérica	32
4.4	Estudo de Caso 01 – Retrofit em Sistema de Flotação.....	33
4.4.1	Caracterização do revestimento aplicado	33
4.4.2	Avaliação do desempenho em serviço.....	34
4.4.3	Análise do termo de garantia	35
4.5	Estudo de Caso 02 – Avaliação comparativa de Revestimentos em Cachimbos na Alimentação de Classificadores.....	36
4.5.1	Cenário 1 – Revestimento em Poliuretano (PU)	36
4.5.2	Cenário 2 – Revestimento Cerâmico	37
4.5.3	Cenário 3 – Revestimento em Borracha com Cerâmica.....	38
4.5.4	Análise Comparativa do Estudo de Caso 02	38
4.6	Análise Comparativa Final Integrada	39
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	41
5.1	Conclusão	41
5.2	Recomendações	42
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	43

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

A mineração constitui uma das atividades industriais de maior relevância no cenário brasileiro, especialmente no estado de Minas Gerais, onde se concentram importantes jazidas minerais e extensas operações de lavra e beneficiamento (IBRAM, 2023; ANM, 2022). O desenvolvimento dessas operações exige sistemas eficientes para movimentação de grandes volumes de material, sendo o transporte de polpa mineral por meio de tubulações uma solução amplamente empregada em operações de médio e grande porte (WASP; KENNY; GANDHI, 1977).

A polpa mineral consiste em uma mistura de partículas sólidas finamente divididas dispersas em meio líquido, geralmente água, cuja dinâmica de escoamento depende de variáveis como concentração de sólidos, granulometria, densidade da mistura e velocidade de transporte (CHAVES, 2012; LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2018). Em sistemas industriais, a definição desses parâmetros busca garantir eficiência hidráulica e estabilidade operacional. Entretanto, a presença contínua de partículas sólidas em suspensão promove interação mecânica intensa com as superfícies internas das tubulações, resultando em desgaste progressivo do material (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Entre os principais mecanismos atuantes destacam-se a abrasão e a erosão por impacto de partículas. A abrasão ocorre quando partículas duras promovem remoção de material por deslizamento ou rolamento sobre a superfície do revestimento, enquanto a erosão está associada ao impacto repetitivo das partículas contra a parede da tubulação (FINNIE, 1960; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Em sistemas de transporte de polpa, esses mecanismos frequentemente atuam de forma combinada, caracterizando desgaste severo e de difícil previsão, especialmente sob regimes turbulentos (LEVY; TARODIYA, 2021).

Componentes geométricos críticos, como curvas, cachimbos e conexões, apresentam maior suscetibilidade ao desgaste devido à redistribuição das partículas sob efeito da força centrífuga, que tende a concentrar impactos no extradorso das curvas (WASP; KENNY; GANDHI, 1977;). Nessas regiões, a taxa de remoção de material pode ser significativamente superior à observada em trechos retos, comprometendo a vida útil da tubulação e exigindo soluções técnicas específicas (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Nesse contexto, a aplicação de revestimentos internos constitui estratégia amplamente adotada para aumentar a resistência ao desgaste e preservar a integridade estrutural do tubo base. Entre os materiais mais empregados destacam-se o poliuretano, a borracha natural e os sistemas híbridos compostos por borracha com inserções cerâmicas, cada qual apresentando características distintas de elasticidade, dureza, tenacidade e resistência à abrasão (GENT, 2012; RICHERSON, 2006; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Embora a literatura apresente estudos individuais sobre propriedades mecânicas e tribológicas desses materiais, observa-se a necessidade de análises comparativas fundamentadas em condições reais de operação, especialmente em componentes críticos de sistemas de transporte de polpa. A seleção inadequada do revestimento pode resultar em desempenho insatisfatório, mesmo quando o material apresenta boas propriedades laboratoriais (LEVY; TARODIYA, 2021).

Dessa forma, considerando a importância do transporte hidráulico na mineração e a influência dos mecanismos de desgaste no desempenho dos sistemas, estabelece-se como problema de pesquisa a seguinte questão:

Como realizar um estudo comparativo de revestimentos internos em tubulações para transporte de polpa mineral?

1.2 Justificativa

A crescente demanda por eficiência operacional e redução de custos na indústria mineral tem impulsionado a busca por soluções mais duráveis e confiáveis para os sistemas de transporte de polpa. Nesse cenário, a seleção inadequada de revestimentos internos pode resultar em falhas prematuras, aumento da frequência de manutenção, paradas não programadas e prejuízos econômicos significativos (WILSON; ADDIE; SELLGREN, 2006).

Embora exista vasta literatura sobre mecanismos de desgaste e propriedades dos materiais de revestimento, grande parte dos estudos concentra-se em ensaios laboratoriais ou em análises pontuais, sem abordar de forma integrada o desempenho dos revestimentos em diferentes componentes da tubulação (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Além disso, observa-se a carência de trabalhos que conciliem dados experimentais, informações operacionais reais e análises econômicas aplicadas ao contexto industrial.

Componentes como curvas e cachimbos, frequentemente considerados pontos críticos do sistema, estão sujeitos a condições específicas de escoamento, caracterizadas por elevados

níveis de turbulência, impactos localizados e concentração de partículas sólidas (LEVY; TARODIYA, 2021). A ausência de critérios comparativos bem definidos para a seleção de revestimentos nessas regiões pode comprometer o desempenho global da instalação.

Dessa forma, justifica-se a realização deste trabalho pela necessidade de avaliar comparativamente o comportamento dos principais revestimentos internos utilizados em tubulações de transporte de polpa, considerando trechos retos, curvas e cachimbos. Do ponto de vista acadêmico, o estudo contribui para a integração de conceitos de mecânica dos fluidos, tribologia e engenharia de materiais. Do ponto de vista industrial, fornece subsídios técnicos para a tomada de decisão, visando à redução de custos operacionais e ao aumento da confiabilidade dos sistemas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Realizar um estudo comparativo de revestimentos internos em tubulações para transporte de polpa mineral.

1.3.2 Específicos

- Realizar revisão bibliográfica;
- Descrever as características dos revestimentos internos em poliuretano, borracha e borracha com cerâmica;
- Comparar o comportamento dos revestimentos a partir de dados obtidos em estudo de caso;
- Comparar o desempenho dos materiais em regiões críticas, como curvas e conexões;
- Apresentar os resultados observados quanto ao desgaste dos revestimentos em condições reais de operação.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos que detalham o desenvolvimento da pesquisa, conforme descrito a seguir:

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos.

O Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema, contextualizando o transporte de polpa mineral por tubulações, os mecanismos de desgaste envolvidos, a formulação do problema de pesquisa, a justificativa e os objetivos do estudo.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, abordando os fundamentos do transporte de polpa, os principais mecanismos de desgaste atuantes em tubulações e as características dos revestimentos internos em poliuretano, borracha e borracha com cerâmica.

O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada no desenvolvimento do trabalho, incluindo a caracterização da pesquisa, a descrição do estudo de caso e os procedimentos utilizados para obtenção e organização dos dados.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos no estudo de caso, bem como a comparação do desempenho dos revestimentos internos em condições reais de operação.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo e as considerações finais relacionadas ao desempenho dos revestimentos analisados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mineração

A mineração é uma atividade essencial para o desenvolvimento econômico e industrial, pois fornece matérias-primas fundamentais para setores como siderurgia, construção civil, geração de energia e fabricação de bens de consumo (ANM, 2022; IBRAM, 2023). No Brasil, destaca-se especialmente a produção de minério de ferro, na qual o país ocupa posição de relevância no cenário internacional, contribuindo significativamente para o abastecimento do mercado interno e externo (IBRAM, 2023).

No contexto nacional, o estado de Minas Gerais assume papel de destaque devido à concentração de importantes províncias minerais, entre elas o Quadrilátero Ferrífero, reconhecido pela elevada ocorrência de depósitos de minério de ferro e ouro (ENDO *et al.*, 2019). A atividade mineradora na região está diretamente associada às características geológicas formadas ao longo da evolução tectônica da crosta terrestre, resultando em estruturas e unidades litológicas favoráveis à mineralização (PRESS *et al.*, 2006).

A relevância da mineração no Quadrilátero Ferrífero pode ser observada na ampla distribuição de jazidas e na consolidação de complexos mineradores que integram lavra, beneficiamento e sistemas de transporte mineral (ANM, 2022). A Figura X apresenta o mapa geológico atualizado da região, evidenciando a organização estrutural e a diversidade litológica que sustentam a atividade mineradora local (ENDO *et al.*, 2019).

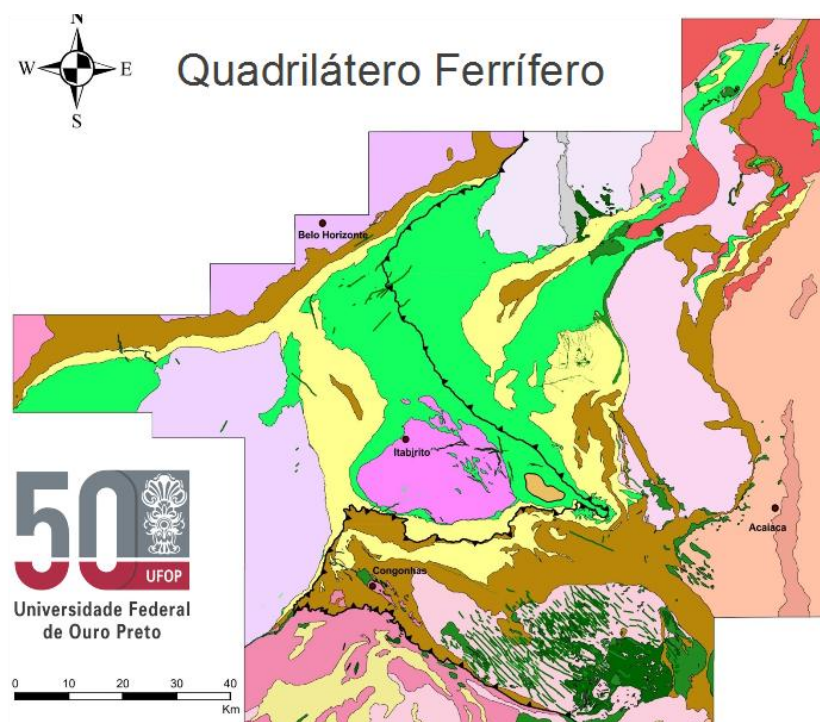


Figura 1 - Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero atualizado (Escala 1:150.000).
Fonte: Endo *et al.* (2019).

Dessa forma, a mineração no estado de Minas Gerais representa não apenas atividade econômica de grande relevância, mas também elemento estruturante para o desenvolvimento de sistemas logísticos e tecnológicos associados ao processamento e transporte de minérios, estabelecendo base para estudos relacionados ao desempenho de materiais e equipamentos utilizados nesse contexto industrial (IBRAM, 2023).

2.2 Transporte de polpa em tubulações

O transporte de polpa mineral representa uma solução tecnológica consolidada na mineração moderna, permitindo a movimentação contínua de materiais finos por meio de sistemas pressurizados de tubulação (WASP; KENNY; GANDHI, 1977). Esse processo baseia-se na formação de uma suspensão de partículas sólidas em meio líquido, cujo comportamento hidráulico é governado pela interação simultânea entre propriedades do fluido e características físicas do material sólido transportado (CHAVES, 2012).

A dinâmica desse escoamento não pode ser compreendida apenas sob a ótica da mecânica dos fluidos convencional, pois a presença de partículas altera significativamente o perfil de velocidades e a distribuição de tensões no interior da tubulação (CHHABRA, 2010).

Fatores como concentração de sólidos, tamanho e forma das partículas, densidade relativa e rugosidade interna da tubulação influenciam diretamente o regime de transporte e a estabilidade operacional do sistema (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2018).

Um dos aspectos centrais no dimensionamento de minerodutos é a determinação da velocidade mínima necessária para impedir a deposição contínua das partículas no fundo da tubulação, conhecida como velocidade crítica de deposição (WASP; KENNY; GANDHI, 1977). Quando o escoamento ocorre abaixo desse limite, há tendência à formação de camadas sedimentadas, alterando o perfil hidráulico e aumentando a resistência ao escoamento (CHAVES, 2012). Essa condição pode evoluir para a formação de leito fixo, comprometendo o desempenho do sistema.

A relação entre velocidade de escoamento e perda de carga evidencia que a polpa apresenta comportamento distinto daquele observado para água pura, especialmente em faixas próximas às velocidades críticas (CHAVES, 2012). A Figura 2 apresenta essa relação, indicando os regimes de transporte associados às diferentes condições operacionais.

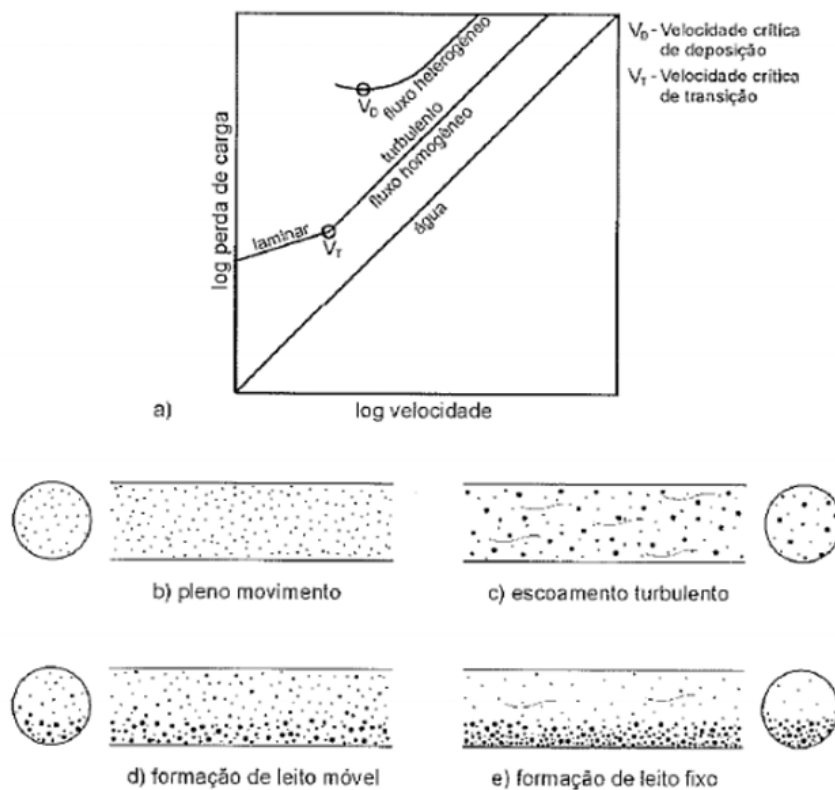


Figura 2 – Relação entre perda de carga e velocidade no transporte de polpa.
 Fonte: CHAVES (2012)

Conforme ilustrado na Figura 2, o transporte pode ocorrer sob diferentes regimes, que variam desde condições de plena suspensão das partículas até situações de formação de leito móvel ou leito fixo no fundo da tubulação (CHAVES, 2012). Em velocidades mais elevadas, as partículas permanecem distribuídas de maneira mais homogênea na seção transversal, enquanto em velocidades reduzidas observa-se maior tendência à sedimentação e concentração de sólidos na parte inferior da tubulação.

Além das implicações hidráulicas, o regime de transporte influencia diretamente os esforços mecânicos impostos à parede interna da tubulação (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Em condições de escoamento turbulento com elevada velocidade, ocorre aumento da energia cinética das partículas, intensificando impactos contra a superfície interna. Por outro lado, em situações de formação de leito móvel, o atrito contínuo entre partículas e revestimento favorece mecanismos abrasivos (LEVY, 1995).

Portanto, o transporte de polpa deve ser analisado de forma integrada, considerando simultaneamente aspectos hidráulicos e tribológicos, uma vez que as condições de escoamento determinam os mecanismos predominantes de interação entre partículas e material do revestimento (WILSON; ADDIE; SELLGREN, 2006).

2.3 Tubulações de aço e tubulações de borracha

As tubulações utilizadas no transporte de polpa são componentes críticos dos sistemas hidráulicos empregados na mineração, uma vez que operam sob condições severas de abrasão, erosão e impacto de partículas sólidas. Diferentemente de sistemas destinados ao transporte de fluidos limpos, as tubulações de polpa exigem critérios específicos de projeto, fabricação, seleção de materiais e controle normativo, visando garantir confiabilidade operacional e vida útil adequada (WASP; KENNY; GANDHI, 1977).

As tubulações constituem sistemas destinados à condução de fluidos em processos industriais, sendo formadas por tubos, conexões, flanges e acessórios que possibilitam o transporte seguro de materiais entre diferentes etapas produtivas (TELLES, 2001). No setor mineral, essas estruturas assumem papel fundamental, especialmente em sistemas de transporte hidráulico de polpa, nos quais grandes volumes de material sólido em suspensão são movimentados continuamente (CHAVES, 2012).

Segundo Telles (2001), a seleção do material da tubulação deve considerar variáveis como pressão de operação, temperatura, natureza do fluido conduzido e condições ambientais.

Em sistemas de transporte de polpa mineral, a presença de partículas abrasivas impõe exigências adicionais relacionadas à resistência mecânica e à durabilidade do material.

2.3.1 Tubulações de Aço

As tubulações de aço são amplamente empregadas na mineração devido à sua elevada resistência estrutural e capacidade de suportar pressões internas significativas (CHIAVERINI, 2008). O aço carbono é o material mais utilizado nessas aplicações, podendo também ser empregados aços de baixa liga, conforme as condições operacionais exigidas.

De acordo com Telles (2001), os tubos de aço podem ser fabricados por diferentes processos, sendo os principais:

- Tubos com costura longitudinal ou helicoidal;
- Tubos sem costura.

Os tubos com costura são produzidos a partir da conformação de chapas metálicas, seguidas de soldagem ao longo da geratriz do tubo. Já os tubos sem costura são obtidos por processos de laminação a quente ou extrusão de tarugos maciços perfurados, resultando em maior homogeneidade estrutural (CHIAVERINI, 2008).

Em sistemas de transporte de polpa mineral, as tubulações de aço são projetadas para suportar esforços mecânicos decorrentes da pressão interna, variações de regime de escoamento e solicitações dinâmicas associadas ao bombeamento contínuo (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2018). Entretanto, quando expostas diretamente ao contato com partículas sólidas em suspensão, as superfícies internas dessas tubulações estão sujeitas a desgaste progressivo, especialmente por mecanismos de abrasão e erosão (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

2.3.2 Tubulações de Borracha (Mangotes Industriais)

Além das tubulações metálicas rígidas, sistemas industriais podem empregar elementos flexíveis de borracha, conhecidos como mangueiras ou mangotes industriais. Esses componentes são definidos como tubos flexíveis fabricados a partir de elastômeros naturais ou sintéticos, destinados à condução, sucção e descarga de fluidos líquidos ou gasosos (ABNT NBR 15347, 2017).

As mangueiras industriais são geralmente constituídas por três camadas principais: tubo interno, responsável pelo contato com o fluido; camada de reforço estrutural, composta

por fibras têxteis ou fios metálicos; e cobertura externa, que confere proteção mecânica e resistência às intempéries (GENT, 2012).

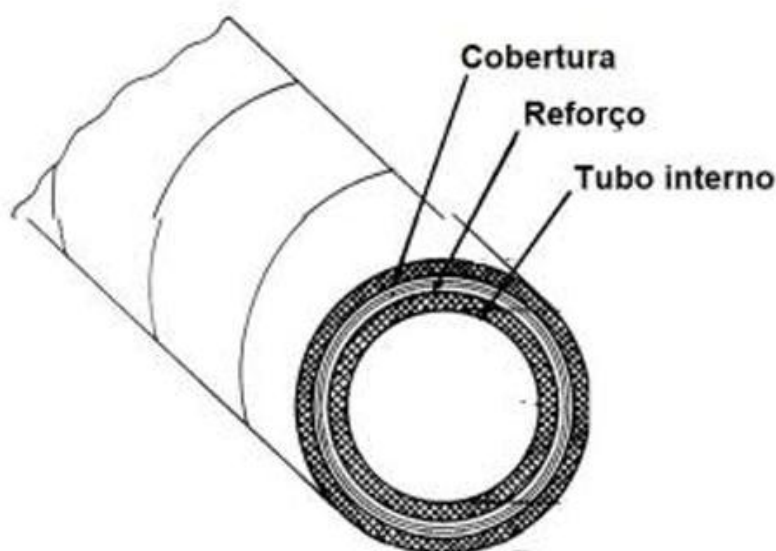


Figura 3 – Construção da tubulação de Borracha (mangote)

Fonte: Santini (2023)

A Figura X apresenta a configuração estrutural típica de um mangote industrial, evidenciando as camadas que compõem esse tipo de tubulação flexível. De acordo com Santini (2023), a estrutura de um mangote é composta, de modo geral, por três camadas principais: tubo interno, camadas de reforço e cobertura externa.

Camada interna, também denominada tubo interno, é a região que permanece em contato direto com o fluido transportado. Sua composição deve ser compatível com as características químicas e físicas do material conduzido. Para aplicações envolvendo líquidos corrosivos, podem ser utilizados elastômeros como borracha nitrílica (NBR), EPDM ou outros polímeros com elevada resistência química. Em aplicações específicas, como na indústria alimentícia, empregam-se materiais atóxicos e aprovados para contato com alimentos. Essa camada tem como função principal resistir à abrasão, à corrosão e aos efeitos químicos do fluido, garantindo a integridade do sistema ao longo da operação.

As camadas de reforço são responsáveis por conferir resistência estrutural ao mangote. Segundo Santini (2023), esses reforços podem ser constituídos por fibras têxteis, como

poliéster ou nylon, fios metálicos de aço, ou ainda pela combinação desses materiais, dependendo da pressão de trabalho a que o componente será submetido. Essas camadas permitem que o mangote suporte pressões internas positivas, resistam a esforços de sucção (pressão negativa) e mantenham estabilidade dimensional sob condições operacionais variáveis. Além disso, contribuem para aumentar a resistência à torção e à flexão.

A camada externa, também denominada cobertura ou capa, é geralmente fabricada em borracha sintética ou material termoplástico com elevada resistência ao desgaste. Sua função é proteger o mangote contra agressões externas, como abrasão mecânica, cortes, impactos, exposição ao ozônio, radiação ultravioleta e intempéries. Essa proteção externa é essencial para preservar as camadas internas e prolongar a vida útil do componente.

Segundo Gent (2012), as características mecânicas dos elastômeros, como elasticidade e capacidade de absorção de energia, tornam esses materiais adequados para aplicações que exigem flexibilidade estrutural.

Contudo, a utilização de mangotes em sistemas de transporte de polpa deve considerar as condições de pressão e a concentração de sólidos, uma vez que a exposição prolongada a partículas abrasivas pode comprometer o desempenho do material elastomérico ao longo do tempo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017)

2.4 Mecanismos de desgaste em tubulações de polpa

O desgaste em sistemas de transporte de polpa mineral está associado à interação mecânica entre partículas sólidas e a superfície interna das tubulações, sendo resultado de fenômenos tribológicos que envolvem impacto, deslizamento, rolamento e escoamento multifásico (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017; ZUM-GAHR, 1987).

De acordo com a norma DIN 50320 (1979), desgaste é definido como a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido decorrente da ação mecânica relativa entre corpos em contato. Em sistemas de transporte de polpa mineral, essa perda de material ocorre predominantemente por mecanismos de abrasão e erosão, que podem atuar de forma isolada ou combinada, especialmente sob regime turbulento (LEVY, 1995).

Os principais mecanismos de desgaste observados em tubulações de polpa são a abrasão, a erosão por impacto e, em muitos casos, a atuação combinada desses fenômenos. A predominância de cada mecanismo está relacionada a variáveis como velocidade de

escoamento, concentração de sólidos, granulometria, dureza das partículas e geometria do sistema (WASP; KENNY; GANDHI, 1977).

A classificação dos principais modos de desgaste é apresentada na Figura 2.X

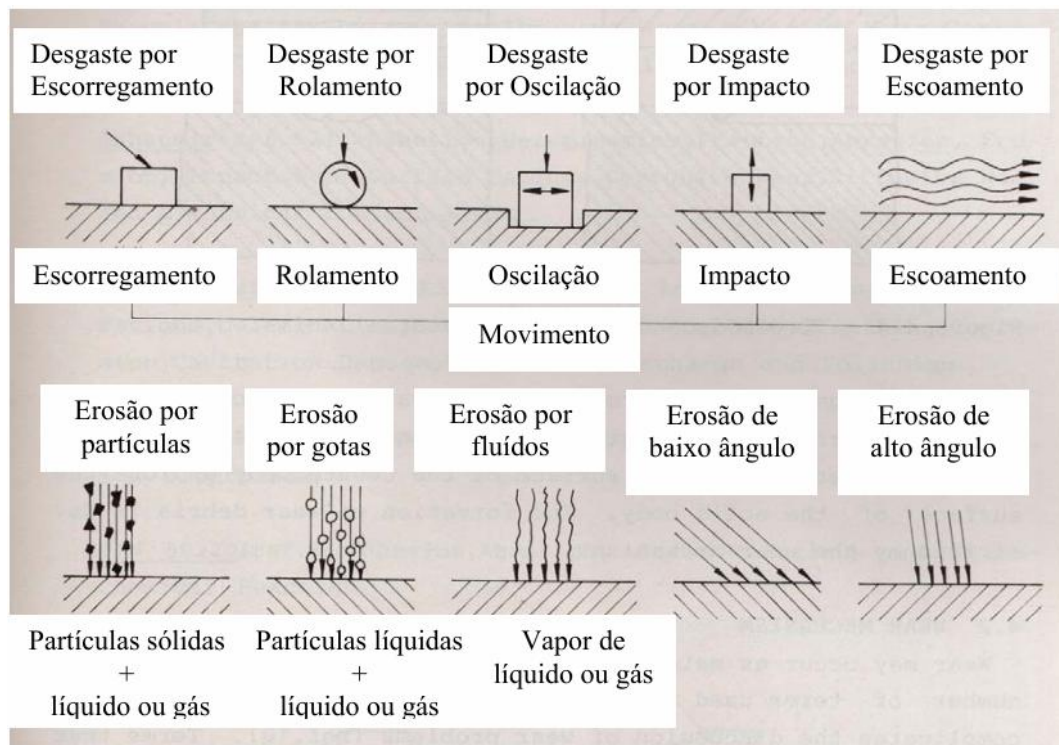


Figura 4 – Classificação dos processos de desgaste por modos de desgaste

Fonte: Peterson (1980) apud Suski (2004).

Conforme proposto por Peterson (1980) e discutido por Suski (2004), os processos de desgaste podem ser classificados de acordo com o tipo de movimento relativo entre as superfícies, destacando-se:

- Desgaste por escorregamento;
- Desgaste por rolamento;
- Desgaste por oscilação;
- Desgaste por impacto;
- Desgaste por escoamento.

No contexto do transporte hidráulico de polpas minerais, a degradação das tubulações e componentes é governada predominantemente pela atuação conjunta dos mecanismos de abrasão e erosão, cuja severidade depende de variáveis como a velocidade do fluxo e a granulometria das partículas (CHAVES, 2012).

A abrasão ocorre quando partículas duras promovem remoção de material por microcorte ou microsulcamento da superfície, sendo influenciada pela dureza relativa entre partícula e material da parede, pela carga normal e pela geometria da interação (ZUM-GAHR, 1987; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Esse mecanismo pode ocorrer sob duas condições principais: abrasão de dois corpos, quando há contato direto entre partícula e superfície, e abrasão de três corpos, quando partículas ficam aprisionadas entre superfícies em movimento relativo.

Já a erosão por partículas caracteriza-se pelo impacto repetitivo de partículas transportadas pelo fluido contra a parede interna da tubulação. A taxa de erosão depende da velocidade das partículas, do ângulo de incidência, da concentração de sólidos e das propriedades mecânicas do material (FINNIE, 1960; LEVY, 1995).

Em regiões de mudança de direção do escoamento, como curvas e conexões, ocorre redistribuição das partículas sob efeito da força centrífuga, intensificando os impactos no extradorso da tubulação. Esse comportamento pode ser observado na Figura 2.Y.

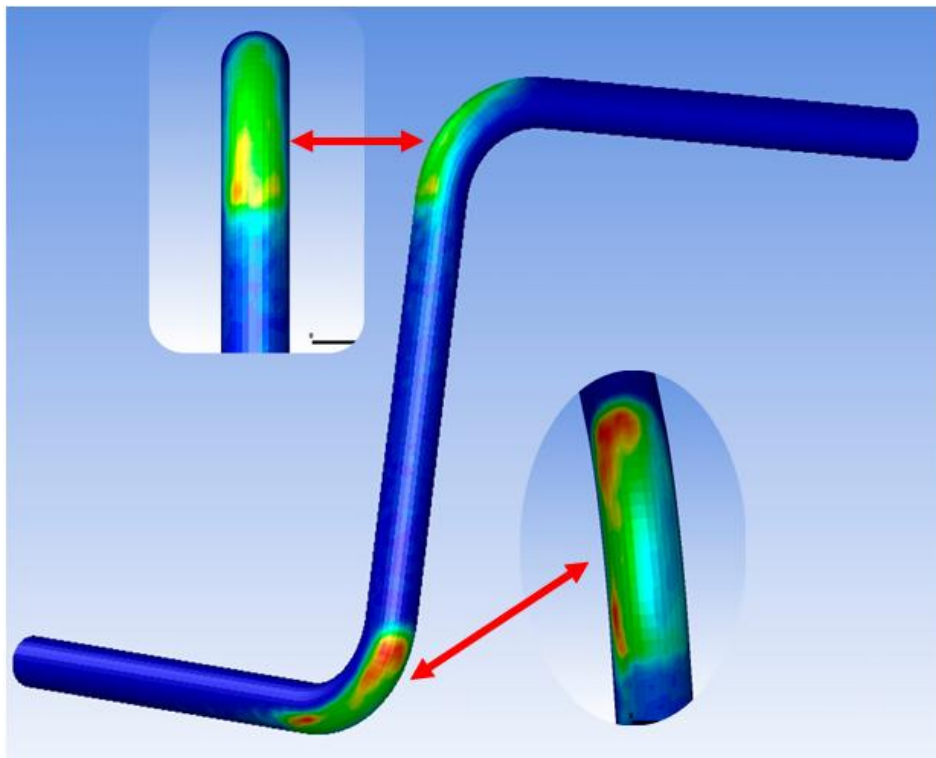


Figura 5 – Distribuição da taxa de erosão em cotovelo de 90° obtida por simulação numérica (CFD)

Fonte: Ma *et al.* (2024).

Conforme demonstrado por Ma *et al.* (2024), a região de maior taxa de erosão localiza-se no extradorso do cotovelo, próximo à transição entre a curva e o trecho reto. Os

autores utilizaram modelagem por dinâmica dos fluidos computacional (CFD), considerando a energia cinética turbulenta das partículas e parâmetros geométricos da curva, verificando que o ângulo de curvatura e a razão raio/diâmetro exercem influência significativa na intensidade do desgaste.

Embora o estudo esteja inserido no contexto da indústria de óleo e gás, os mecanismos físicos envolvidos no escoamento sólido-líquido e no impacto de partículas são equivalentes aos observados em sistemas de transporte de polpa mineral, sendo plenamente aplicáveis à análise de desgaste em minerodutos.

Em sistemas de transporte hidráulico de minério, o desgaste resulta, portanto, da combinação entre abrasão por deslizamento contínuo das partículas e erosão por impacto em regiões críticas, especialmente sob regime turbulento. A intensidade desses mecanismos depende de variáveis operacionais como velocidade de escoamento, concentração de sólidos e granulometria da polpa (CHAVES, 2012; LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2018).

A compreensão detalhada dos mecanismos de desgaste constitui, assim, base teórica fundamental para a comparação técnica do desempenho de diferentes revestimentos internos aplicados em tubulações destinadas ao transporte de polpa mineral.

2.5 Revestimentos internos aplicados ao transporte de polpa

As tubulações revestidas constituem solução técnica amplamente empregada em sistemas de transporte hidráulico de polpa mineral, especialmente em ambientes caracterizados por elevada abrasividade e presença de partículas sólidas em suspensão (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2018). Nessas condições, o contato contínuo entre partículas minerais e a superfície interna do tubo favorece mecanismos de desgaste como abrasão por deslizamento e erosão por impacto, comprometendo progressivamente a espessura da parede metálica (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

A aplicação de revestimentos internos permite que o tubo base — geralmente em aço carbono — mantenha sua função estrutural relacionada à resistência mecânica e à pressão interna, enquanto o material de revestimento atua como camada protetiva diretamente exposta ao escoamento da polpa (TELLES, 2001). Essa estratégia possibilita adaptar o comportamento superficial da tubulação às condições tribológicas específicas do processo (ZUM-GAHR, 1987).

Conforme apresentado na Figura 10, os revestimentos industriais podem ser classificados em metálicos e não metálicos. Em sistemas de transporte de polpa mineral, predominam os revestimentos não metálicos, devido à sua maior capacidade de absorção de energia de impacto e resistência ao desgaste abrasivo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

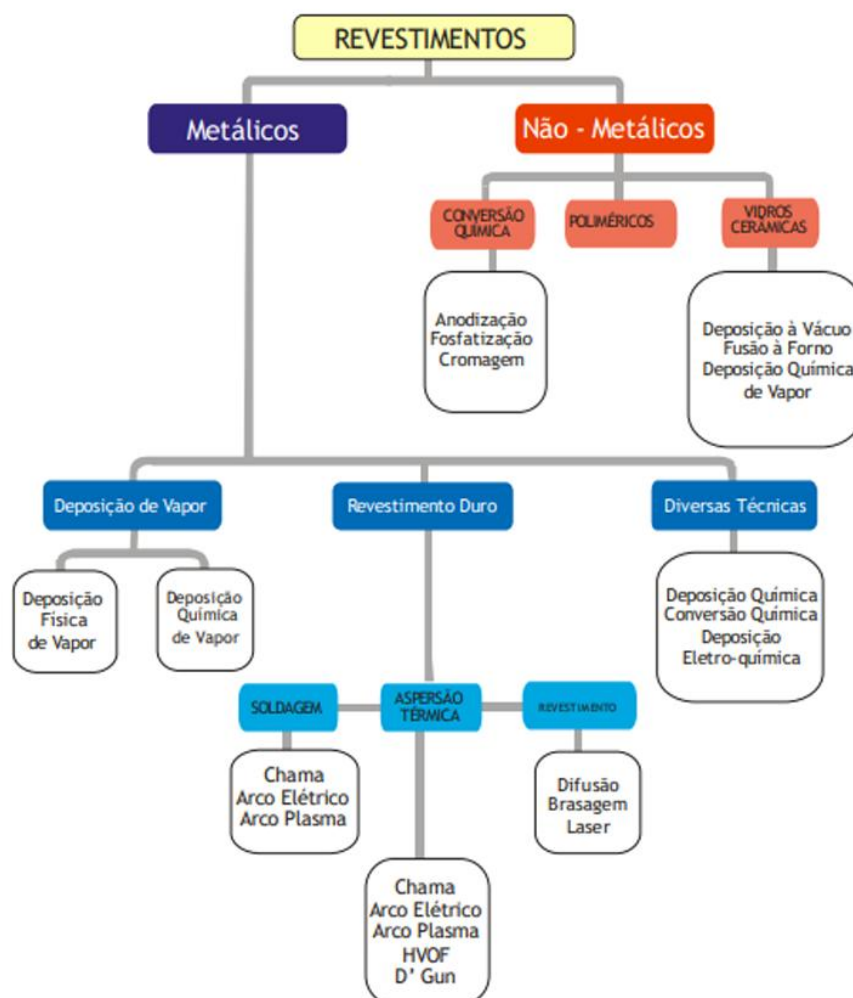


Figura 6 – Técnicas de aplicação e tipos de revestimentos
Fonte: Carvalho, 2007

Conforme apresentado na Figura 10, os revestimentos podem ser classificados em metálicos e não metálicos, sendo estes últimos os mais utilizados em sistemas de transporte de polpa, em razão de sua maior flexibilidade, resistência ao impacto e compatibilidade com ambientes altamente abrasivos. No contexto deste trabalho, destacam-se principalmente os revestimentos poliméricos, elastoméricos e cerâmicos, que apresentam maior aplicabilidade em tubulações rígidas e flexíveis utilizadas na indústria mineral.

2.5.1 Revestimentos internos em poliuretano (PU)

Os poliuretanos (PU) constituem uma classe de polímeros obtidos pela reação entre isocianatos e polióis, caracterizados pela presença do grupo funcional ure-tano (-NH-CO-O-) em sua estrutura química (CANEVAROLO JR., 2006; VILAR, 2004). A possibilidade de variação das matérias-primas empregadas na formulação permite a obtenção de materiais com diferentes níveis de dureza, elasticidade, resistência mecânica e comportamento tribológico, o que favorece sua aplicação em ambientes industriais severos (VILAR, 2004).

A estrutura segmentada dos poliuretanos elastoméricos, composta por domínios rígidos e flexíveis distribuídos ao longo da cadeia polimérica, influencia diretamente seu desempenho mecânico (OLIVEIRA, 2011). Os segmentos rígidos contribuem para a resistência estrutural, enquanto os segmentos flexíveis conferem capacidade de deformação elástica e absorção de energia, característica relevante em aplicações sujeitas ao impacto de partículas sólidas (OLIVEIRA, 2011).

No setor mineral, o poliuretano é amplamente empregado como revestimento interno de tubulações destinadas ao transporte hidráulico de polpa, em razão de sua resistência ao desgaste abrasivo e erosivo (SILVA; COSTA, 2018). Durante o transporte de polpa mineral, partículas sólidas de elevada dureza, como silicatos e quartzo, promovem interação contínua com a superfície interna da tubulação, intensificando mecanismos de abrasão e erosão (CHAVES, 2012). Nesse contexto, o revestimento em PU atua como camada protetiva, reduzindo a taxa de remoção de material do tubo base.

Estudos experimentais indicam que o comportamento tribológico do poliuretano depende da interação entre suas propriedades mecânicas e as condições operacionais do sistema (OLIVEIRA, 2011). Em ensaios de desgaste abrasivo, o microcorte foi identificado como um dos principais micromecanismos de remoção de material, além da formação de microtrincas e destacamento de fragmentos sob determinadas condições de carga e granulometria do abrasivo (OLIVEIRA, 2011).

No que se refere à erosão úmida, condição típica de transporte de polpa, Silva e Costa (2018) verificaram que a taxa de desgaste do poliuretano está associada não apenas à dureza Shore A, mas também à resistência à tração, ao alongamento e à resiliência do material. Os autores observaram que não há correlação linear simples entre dureza e resistência ao desgaste, reforçando a necessidade de avaliação conjunta das propriedades mecânicas para seleção adequada do revestimento (SILVA; COSTA, 2018).

A aplicação do poliuretano em tubulações de aço envolve, geralmente, preparação superficial do substrato metálico por meio de jateamento abrasivo e utilização de sistemas de adesão apropriados, seguida da moldagem ou vazamento do sistema reativo no interior do tubo, com posterior cura controlada (VILAR, 2004; GENT, 2012). Esse processo resulta em uma camada contínua aderida ao aço estrutural, configurando um sistema composto capaz de suportar simultaneamente esforços mecânicos e solicitações tribológicas (OLIVEIRA, 2011).

Em regiões críticas do sistema, como curvas e cachimbos, onde ocorre concentração de partículas devido à ação de forças centrífugas, a utilização de revestimentos elastoméricos como o PU contribui para a absorção de energia de impacto e mitigação do desgaste localizado (CHAVES, 2012; SILVA; COSTA, 2018). Essa característica torna o poliuretano particularmente indicado para componentes sujeitos a mudanças de direção do fluxo, como curvas e cachimbos, onde ocorre intensificação do desgaste devido à concentração de partículas na parede externa da tubulação (CHAVES, 2012; SILVA; COSTA, 2018).

Dessa forma, a literatura aponta que os revestimentos internos em poliuretano apresentam desempenho satisfatório em sistemas de transporte de polpa mineral, especialmente quando adequadamente especificados quanto à formulação e espessura, contribuindo para a preservação da integridade estrutural da tubulação e para o aumento da vida útil operacional (OLIVEIRA, 2011; SILVA; COSTA, 2018).

2.5.1.1 Aplicação do Poliuretano em Tubulações

A aplicação do poliuretano como revestimento interno em tubulações de aço envolve etapas controladas de preparação superficial, aplicação do sistema reativo e cura do material no interior do componente metálico (VILAR, 2004). Inicialmente, o tubo estrutural é submetido a jateamento abrasivo para remoção de óxidos, contaminantes e carepas de laminação, além da geração de rugosidade adequada para ancoragem mecânica do polímero (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

Segundo Gent (2012), a adesão entre elastômeros e substratos metálicos depende tanto da preparação superficial quanto do uso de primers específicos que promovam ligação química e mecânica entre as fases. Após essa etapa, o poliuretano é aplicado por meio de processo de vazamento (“casting”) ou moldagem rotacional interna, no qual os componentes reativos são introduzidos no interior do tubo e submetidos à polimerização in situ (VILAR, 2004).

Oliveira (2011) destaca que o controle da proporção entre isocianato e polioliol, bem como das condições de temperatura e tempo de cura, influencia diretamente as propriedades finais do revestimento, incluindo dureza e resistência ao desgaste. A espessura do revestimento é definida conforme a severidade operacional, podendo ser maior em curvas e conexões, onde a taxa de desgaste tende a ser superior (CHAVES, 2012).

2.5.2 Revestimentos internos em borracha

Os revestimentos internos em borracha são amplamente empregados na indústria mineral como solução para mitigação de desgaste em tubulações destinadas ao transporte de polpa abrasiva (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2018). Esses materiais pertencem à classe dos elastômeros, caracterizados por elevada capacidade de deformação elástica e recuperação dimensional após a remoção da carga aplicada (CANEVAROLO JR., 2006). Essa propriedade estrutural é particularmente relevante em sistemas submetidos ao impacto repetitivo de partículas sólidas em suspensão.

Do ponto de vista molecular, as borrachas naturais e sintéticas apresentam cadeias poliméricas com ligações cruzadas que conferem comportamento resiliente sob solicitações mecânicas (GENT, 2012). A densidade de reticulação e a composição química influenciam propriedades como dureza, módulo elástico, resistência ao rasgo e resistência à abrasão, parâmetros fundamentais para aplicações em ambientes de elevada severidade tribológica (ZUM GAHR, 1987).

No transporte hidráulico de polpa mineral, o desgaste das superfícies internas das tubulações ocorre principalmente por mecanismos combinados de abrasão por deslizamento e erosão por impacto (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). A interação contínua entre partículas minerais — frequentemente compostas por silicatos de elevada dureza — e a parede da tubulação favorece a remoção progressiva de material (CHAVES, 2012). Em regiões onde há alteração da direção do escoamento, como curvas e cachimbos, a ação das forças centrífugas desloca as partículas para a parede externa da tubulação, aumentando localmente a taxa de desgaste (CHAVES, 2012).

Nesse contexto, a borracha apresenta desempenho relevante devido à sua capacidade de absorver parte da energia cinética das partículas no momento do impacto (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Ao sofrer deformação elástica localizada, o material reduz a intensidade do microcorte superficial e redistribui tensões, retardando a nucleação de trincas e o destacamento de fragmentos (ZUM GAHR, 1987). Esse comportamento diferencia os

elastômeros de materiais metálicos ou cerâmicos, nos quais o impacto tende a resultar em fratura ou sulcamento mais pronunciado (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Segundo Zum Gahr (1987), o desempenho da borracha frente à abrasão depende da interação entre dureza, módulo elástico e resistência ao rasgamento, não havendo correlação linear simples entre dureza Shore e taxa de desgaste. Assim como observado em poliuretanos, a resistência ao desgaste elastomérico deve ser avaliada considerando o conjunto das propriedades mecânicas e as condições operacionais do sistema (ZUM GAHR, 1987).

A aplicação de revestimentos de borracha em tubulações de aço envolve preparação superficial do substrato metálico, geralmente por jateamento abrasivo, seguida da aplicação de adesivos específicos e processo de vulcanização para garantir aderência adequada entre borracha e aço (TELLES, 2001). A integridade da interface é fator crítico para o desempenho do sistema composto, uma vez que falhas de adesão podem comprometer a durabilidade do revestimento sob condições de pressão interna e impacto repetitivo (GENT, 2012).

Em sistemas de minerodutos, os revestimentos em borracha são frequentemente utilizados em trechos críticos, como curvas, reduções e caixas de impacto, onde a severidade do desgaste é mais pronunciada (CHAVES, 2012). Nessas regiões, a capacidade de absorção de energia do elastômero contribui para reduzir a taxa de degradação superficial quando comparada a superfícies metálicas expostas diretamente ao escoamento abrasivo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Dessa forma, a literatura técnica indica que os revestimentos internos em borracha constituem alternativa consolidada para proteção de tubulações em sistemas de transporte de polpa mineral, especialmente em situações nas quais o impacto de partículas desempenha papel predominante nos mecanismos de desgaste (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2018; ZUM GAHR, 1987; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

2.5.2.1 Aplicação da Borracha em Tubulações

Os revestimentos de borracha são aplicados em tubulações metálicas por meio de processos que envolvem preparação superficial do aço e posterior vulcanização do elastômero aderido ao substrato (TELLES, 2001). O jateamento abrasivo da superfície interna do tubo é etapa essencial para garantir adequada ancoragem mecânica e adesão do revestimento (GENT, 2012).

De acordo com Telles (2001), a borracha pode ser aplicada na forma de mantas previamente moldadas ou por revestimento direto no interior da tubulação, seguido de

processo de vulcanização térmica, que promove a reticulação do elastômero e sua fixação definitiva ao aço. O uso de adesivos específicos é necessário para garantir integridade da interface borracha-metal sob ação de pressão interna e impacto repetitivo (GENT, 2012).

Em sistemas de transporte de polpa, a espessura do revestimento elastomérico é dimensionada de acordo com a severidade do escoamento e a concentração de partículas sólidas (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2018). Em regiões críticas, como curvas e cachimbos, a espessura pode ser aumentada para compensar o desgaste localizado decorrente da concentração de partículas na parede externa (CHAVES, 2012).

2.5.3 Revestimentos internos em borracha com cerâmica

Os revestimentos compostos por borracha com inserções cerâmicas constituem sistemas híbridos desenvolvidos para aplicações industriais sujeitas a desgaste severo, combinando propriedades elastoméricas com elevada dureza superficial proporcionada por materiais cerâmicos (ZUM GAHR, 1987). Essa associação busca integrar a capacidade de absorção de energia da matriz elastomérica com a resistência ao microcorte característica das cerâmicas técnicas (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Materiais cerâmicos industriais, como alumina de alta pureza, apresentam elevada dureza e resistência à abrasão, características que reduzem significativamente a taxa de desgaste sob ação de partículas minerais duras (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Entretanto, devido à sua natureza frágil, esses materiais podem apresentar susceptibilidade à fratura sob impacto concentrado ou cargas dinâmicas elevadas (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). A incorporação das pastilhas cerâmicas em uma matriz de borracha permite que parte da energia do impacto seja absorvida elasticamente pelo elastômero, reduzindo a probabilidade de fratura da cerâmica (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

No transporte hidráulico de polpa mineral, onde partículas abrasivas como quartzo e silicatos interagem continuamente com a superfície interna das tubulações, o desgaste ocorre por mecanismos combinados de abrasão e erosão (CHAVES, 2012). Em regiões de maior severidade, como curvas e pontos de mudança de direção do fluxo, a concentração de partículas aumenta devido à ação de forças centrífugas, intensificando a taxa de desgaste local (CHAVES, 2012). Nessas condições, os revestimentos híbridos podem apresentar desempenho superior em relação aos elastômeros convencionais, devido à elevada resistência superficial das inserções cerâmicas (ZUM GAHR, 1987).

Segundo Hutchings e Shipway (2017), a resistência ao desgaste em materiais compósitos depende da interação entre matriz e fase reforçante, sendo fundamental garantir adequada aderência entre a borracha e as pastilhas cerâmicas para evitar destacamento prematuro sob impacto repetitivo. Assim, o desempenho do revestimento não está associado apenas à dureza da cerâmica, mas também à estabilidade estrutural do sistema composto.

A aplicação desses revestimentos em tubulações de aço ocorre por meio da fixação das pastilhas cerâmicas previamente posicionadas na matriz elastomérica, seguida de vulcanização e adesão ao substrato metálico devidamente preparado (TELLES, 2001). O controle da interface aço–borracha–cerâmica é fator determinante para a durabilidade do sistema, especialmente em ambientes com alta concentração de sólidos (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

2.5.3.1 Aplicação em Tubulações Flexíveis

Além das tubulações rígidas de aço, sistemas de transporte de polpa podem empregar elementos flexíveis, como mangotes industriais, em pontos de conexão, absorção de vibração e compensação de desalinhamentos estruturais (TELLES, 2001). Nessas aplicações, a utilização de revestimentos híbridos com inserções cerâmicas requer atenção especial às características mecânicas do conjunto, uma vez que a flexibilidade estrutural é requisito fundamental (GENT, 2012).

Mangotes industriais são constituídos por camadas estruturais compostas por tubo interno elastomérico, reforço têxtil ou metálico e cobertura externa protetiva (ABNT NBR 15347, 2017). A incorporação de elementos cerâmicos em sistemas flexíveis deve considerar a limitação de rigidez imposta pelas pastilhas, pois a presença excessiva de cerâmica pode comprometer a capacidade de curvatura e absorção de deformações do componente (GENT, 2012).

Segundo Zum Gahr (1987), materiais cerâmicos apresentam comportamento frágil sob deformação, o que impõe restrições à sua aplicação em componentes sujeitos a flexão contínua. Assim, em tubulações flexíveis, as inserções cerâmicas são geralmente aplicadas em regiões específicas sujeitas a impacto concentrado, enquanto o restante da estrutura mantém predominância elastomérica para garantir flexibilidade operacional (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

No contexto da mineração, a aplicação de mangotes com reforço elastomérico e proteção localizada com cerâmica pode ser empregada em trechos de sucção, descarga de

bombas ou conexões sujeitas a desgaste intensificado (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2018). A escolha desse sistema híbrido depende da análise das condições operacionais, incluindo concentração de sólidos, granulometria e regime de escoamento (CHAVES, 2012).

Dessa forma, os revestimentos em borracha com inserção cerâmica configuram alternativa técnica para aplicações de alta severidade em sistemas rígidos e, de forma controlada, em componentes flexíveis, desde que respeitadas as limitações estruturais impostas pela rigidez da fase cerâmica (ZUM GAHR, 1987; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

2.5.3.2 Processos de aplicação dos revestimentos em borracha com cerâmica

Os revestimentos híbridos compostos por borracha com inserções cerâmicas são aplicados em tubulações por meio da fixação prévia de pastilhas cerâmicas na matriz elastomérica, seguida de adesão do conjunto ao substrato metálico (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). A superfície do aço é previamente preparada por jateamento abrasivo, de modo semelhante aos revestimentos elastoméricos convencionais (TELLES, 2001).

Segundo Zum Gahr (1987), a eficiência do sistema híbrido depende da estabilidade da interface entre cerâmica e matriz de borracha, bem como da aderência do conjunto ao tubo metálico. A vulcanização da borracha promove fixação das pastilhas e garante continuidade estrutural do revestimento.

Em aplicações em tubulações rígidas, as pastilhas cerâmicas são posicionadas em regiões de maior severidade, como extradorso de curvas e pontos de impacto direto do fluxo (CHAVES, 2012). Já em tubulações flexíveis, como mangotes industriais, a utilização de inserções cerâmicas deve considerar a limitação de rigidez imposta pelo material cerâmico, sendo usual sua aplicação localizada apenas em áreas críticas para não comprometer a flexibilidade estrutural do componente (GENT, 2012; ABNT NBR 15347, 2017).

De acordo com Hutchings e Shipway (2017), o desempenho desses sistemas compósitos depende da interação entre resistência superficial da cerâmica e capacidade de absorção de energia da matriz elastomérica, sendo fundamental o controle da qualidade da montagem e da adesão entre as fases.

3 METODOLOGIA

3.1 Tipo de Pesquisa

Segundo Tozoni-Reis (2007), a pesquisa pode ser compreendida como um processo sistemático de investigação que visa à produção de conhecimento por meio da formulação de problemas e busca de respostas fundamentadas. Nesse contexto, a pesquisa científica caracteriza-se como instrumento essencial para análise e compreensão de fenômenos técnicos e industriais.

De acordo com Gil (2002), a pesquisa exploratória tem como finalidade proporcionar maior familiaridade com o problema, tornando-o mais explícito ou permitindo a construção de hipóteses. Esse tipo de pesquisa é frequentemente empregado em estudos iniciais, quando se busca aprofundar a compreensão sobre determinado fenômeno ainda pouco sistematizado.

No que se refere à abordagem, o presente estudo caracteriza-se como qualitativo, uma vez que busca compreender o desempenho dos revestimentos internos em condições reais de operação, priorizando a interpretação técnica dos resultados obtidos (GERHARDT; SILVEIRA, 2009). A pesquisa qualitativa não se fundamenta exclusivamente em análise estatística, mas na compreensão aprofundada do fenômeno estudado, considerando o contexto no qual ele ocorre.

Além disso, o trabalho apresenta caráter bibliográfico, pois se baseia em material já publicado, como livros, artigos científicos, dissertações e normas técnicas, que fundamentam teoricamente a análise dos mecanismos de desgaste e das propriedades dos materiais avaliados (MACEDO, 1996; GIL, 2002).

Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa é classificada como estudo de caso, uma vez que envolve a análise detalhada de uma situação real em ambiente industrial, considerando as variáveis que influenciam o desempenho dos revestimentos internos aplicados em tubulações para transporte de polpa mineral (GIL, 2007; YIN, 2015).

3.2 Materiais e Métodos

A metodologia geral deste trabalho é apresentada na Figura X

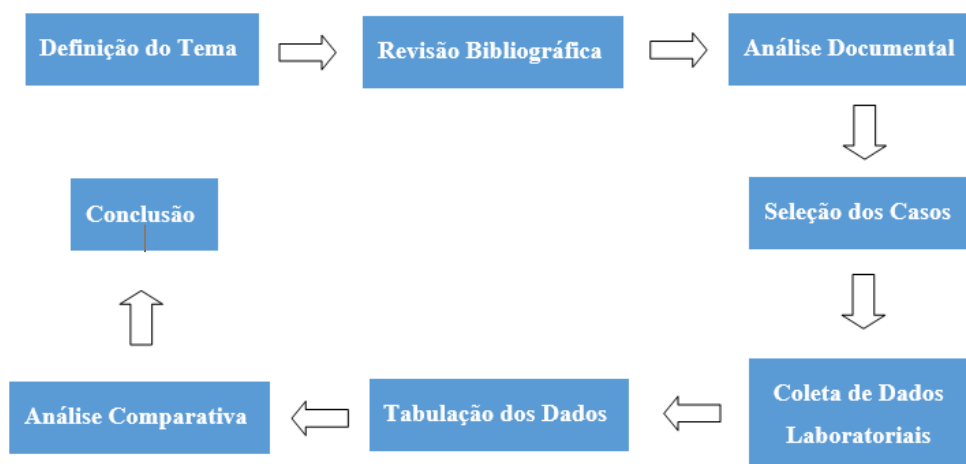


Figura 7 – Fluxograma metodológico
 Fonte: Pesquisa direta, 2026

A metodologia deste estudo foi estruturada de forma sequencial, conforme representado no fluxograma apresentado, iniciando-se pela definição do tema e delimitação do problema de pesquisa. Segundo Tozoni-Reis (2007), a delimitação clara do objeto de estudo orienta o desenvolvimento da investigação científica e direciona a formulação dos objetivos.

Em seguida, realizou-se revisão bibliográfica com base em livros, artigos científicos, dissertações e normas técnicas relacionadas ao transporte hidráulico de polpa e aos revestimentos internos aplicados em tubulações industriais. De acordo com Gil (2002), a pesquisa bibliográfica permite fundamentar teoricamente o estudo e compreender o estado atual do conhecimento sobre o tema.

Posteriormente, procedeu-se à análise documental por meio da consulta a registros técnicos e históricos de manutenção da unidade industrial estudada. Conforme Lakatos e Marconi (2010), a análise documental possibilita a utilização sistemática de informações previamente registradas em contexto real.

Com base nessas informações, foram selecionados os casos representativos para comparação, priorizando componentes submetidos a condições operacionais semelhantes, especialmente curvas e conexões, devido à maior incidência de desgaste nessas regiões. Segundo Yin (2015), a seleção criteriosa dos casos é essencial em estudos que analisam fenômenos dentro de seu contexto real.

Na sequência, realizou-se a coleta de dados técnicos disponíveis, incluindo informações referentes ao desempenho dos revestimentos, tempo de operação e padrões de desgaste observados. Os dados foram organizados por meio de tabulação, etapa considerada fundamental para sistematização e interpretação das informações coletadas (LAKATOS; MARCONI, 2010).

Por fim, efetuou-se a análise comparativa entre os revestimentos internos avaliados, considerando os indicadores definidos e as condições operacionais equivalentes. A interpretação dos resultados foi conduzida à luz da fundamentação teórica apresentada na revisão bibliográfica, conforme recomendam Hutchings e Shipway (2017), permitindo responder à pergunta-problema proposta neste estudo.

A metodologia adotada permitiu integrar fundamentação teórica, dados laboratoriais e evidências práticas, garantindo coerência entre os objetivos propostos e os resultados obtidos.

3.3 Variáveis e indicadores analisados

Segundo Francisco (2007), variáveis podem ser compreendidas como características ou propriedades que assumem diferentes valores dentro de determinado fenômeno, podendo ser de natureza qualitativa ou quantitativa. Já os indicadores constituem instrumentos utilizados para mensurar ou representar essas variáveis, permitindo avaliar determinado contexto de forma objetiva (MITCHELL, 1996). Dessa maneira, enquanto as variáveis representam os aspectos analisados no estudo, os indicadores funcionam como parâmetros utilizados para sua mensuração.

Para o presente trabalho, foram utilizados variáveis e indicadores conforme tabela 1

Tabela 1 – Variáveis e indicadores do estudo

Variáveis	Indicadores
Tipo de Revestimento	PU, Borracha, Borracha + Cerâmica
Propriedades físicas	Dureza, abrasão, impacto
Aplicação	Tipo de componente
Desempenho	Vida útil estimada

Fonte: Pesquisa direta.

3.4 Instrumentos de coleta de dados

A coleta de dados foi realizada mediante contato direto com uma empresa fornecedora de equipamentos e sobressalentes para mineração. O levantamento de informações baseou-se na análise documental de fontes primárias cedidas pela organização, especificamente: relatórios técnicos de desempenho, fichas laboratoriais de caracterização de materiais e documentos internos referentes aos processos de fabricação.

3.5 Tabulação dos dados

As informações coletadas foram repassadas para documento word e planilhas no excel logo após filtradas para que neste trabalho apresente somente aquilo que gere relevância ao estudo.

3.6 Considerações finais

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada de forma sistemática, combinando pesquisa bibliográfica, análise documental e estudo de caso, com o objetivo de garantir fundamentação teórica e consistência na coleta e interpretação dos dados. A definição clara das variáveis e indicadores possibilitou a comparação entre os revestimentos, assegurando coerência com os objetivos propostos e com a pergunta-problema da pesquisa.

A organização das etapas metodológicas permitiu conduzir o estudo de maneira estruturada, favorecendo a confiabilidade dos resultados e a análise comparativa do desempenho dos materiais em condições reais de operação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Revestimento Interno em Poliuretano



Figura 8 – Tubulação revestida internamente com poliuretano (PU);
Fonte: Pesquisa Direta

A figura 8, mostra tubulações fabricadas com revestimento em poliuretano da empresa fabricante em que o estudo está fundado.

O revestimento interno em poliuretano (PU) foi analisado como uma das soluções aplicadas em componentes utilizados no transporte de polpa mineral, especialmente em cachimbos empregados na alimentação de classificadores. O sistema consiste em tubo base em aço carbono revestido internamente com camada elastomérica moldada, formando superfície contínua de proteção contra abrasão e impacto.

O poliuretano é um elastômero de elevada resistência mecânica quando comparado às borrachas convencionais, apresentando combinação entre dureza relativamente elevada e capacidade de deformação elástica. Essas características justificam sua aplicação em sistemas sujeitos a desgaste moderado, onde há presença simultânea de abrasão e impacto.

4.1.1 Propriedades laboratoriais

Conforme apresentado na Tabela 2, o poliuretano estudado apresenta as seguintes propriedades:

Tabela 2 – Propriedades do Poliuretano

Propriedades Poliuretano			
Avaliação	Metodologia	Unidade	Referência
Dureza Shore	Dureza, Shore A Conforme ASTM D	Shore A	82 +/- 3
Ensaio de Rasgamento	ASTM D 624	Ts (KN/m)	>82,4
Ensaio de Tração	ASTM D 412, método A	MPa	34,47
Deformação Permanente	Deformação Permanente por compressão	%	25 MAX
Ensaio de desgaste Tipo Pino-Sobre-Tambor	Resistência à Abrasão DIN 53516	MM ³	45

Fonte: Dados laboratoriais do fabricante.

A dureza de 82 Shore A indica material com rigidez superior à borracha natural convencional, mantendo ainda comportamento elastomérico. O valor de abrasão de 45 mm³ demonstra resistência ao desgaste por microcorte superior à borracha natural (170 mm³), porém significativamente inferior à resistência apresentada por materiais cerâmicos de alta alumina.

A resistência à tração de 34,47 MPa indica boa coesão estrutural do polímero, enquanto o valor de deformação permanente evidencia capacidade de recuperação elástica limitada sob compressão prolongada.

4.2 Revestimento Interno em Borracha Natural



Figura 9 – Tubulação revestida internamente com borracha natural.
Fonte: Pesquisa Direta

A figura 9, mostra tubulações fabricadas com revestimento em borracha natural da empresa fabricante em que o estudo está fundado.

O revestimento interno em borracha natural foi considerado neste estudo como solução elastomérica tradicional aplicada em sistemas de transporte de polpa mineral. Esse tipo de revestimento é amplamente utilizado em tubulações metálicas, especialmente em regiões sujeitas a impacto de partículas e vibração mecânica, devido à sua elevada capacidade de deformação elástica.

O sistema consiste em tubo base em aço carbono revestido internamente com camada de borracha vulcanizada, aderida ao substrato metálico por meio de preparação superficial e aplicação de agentes de ligação. A borracha natural apresenta estrutura polimérica com alto grau de elasticidade, permitindo absorção de energia mecânica e redistribuição de tensões sob impacto.

4.2.1 Propriedades laboratoriais

Conforme apresentado na Tabela 3, a borracha natural estudada apresenta as seguintes propriedades:

Tabela 3 – Propriedades da Borracha Natural

Propriedades Borracha Natural		
Especificação	UM	Valor
Material	-	Borracha Natural
Dureza	Shore A	45 (+/-5)
Resiliência	%	66 (+/- 10%)
Abrasão	mm ³	170mm ³ (+/- 10%)

Fonte: Dados laboratoriais do fabricante.

A dureza de 45 Shore A indica material com elevada flexibilidade quando comparado ao poliuretano. O valor de resiliência demonstra significativa capacidade de recuperação elástica após deformação, característica importante em aplicações sujeitas a impacto repetitivo.

O valor de abrasão de 170 mm³ indica resistência inferior ao desgaste abrasivo quando comparada ao poliuretano (45 mm³), evidenciando maior suscetibilidade ao microcorte sob condições severas de ensaio.

4.3 Revestimento Interno em Borracha com inserção Cerâmica Alta alumina (Al_2O_3 92%)



Figura 10 – Tubulação revestida internamente com borracha + cerâmica.
Fonte: Pesquisa Direta

A figura 10, mostra tubulações fabricadas com revestimento em borracha com cerâmica da empresa fabricante em que o estudo está fundado.

O revestimento interno em borracha com inserção cerâmica consiste em um sistema híbrido composto por matriz elastomérica de borracha natural associada a pastilhas de cerâmica de alta alumina ($\approx 92\%$), fixadas em arranjo geométrico no interior da tubulação. Esse tipo de configuração tem como objetivo combinar a elevada dureza superficial da cerâmica com a capacidade de absorção de energia da borracha.

O sistema é aplicado sobre tubo base em aço carbono, sendo a cerâmica posicionada estrategicamente na matriz elastomérica antes do processo de vulcanização. O arranjo estrutural busca distribuir tensões e reduzir concentração de esforços localizados, preservando a integridade das pastilhas sob condições de escoamento com elevada concentração de partículas sólidas.

4.3.1 Propriedades laboratoriais da cerâmica

Conforme apresentado na tabela 4, a cerâmica de alta alumina (92%) apresenta:

Tabela 4 – Propriedades da cerâmica alta alumina (92%)

Propriedades da Cerâmica de Alta Alumina (92%)		
Especificação	Unidade	Valor
Material	–	Cerâmica alta alumina (92%)
Dureza Mohs	–	9
Dureza Vickers (0,5 kg)	MPa	1200 ± 50
Resistência à Flexão	MPa	255 ± 30
Tenacidade à Fratura	N/mm	40

Fonte Dados laboratoriais do fabricante

A dureza Mohs 9 indica elevada resistência ao risco e ao microcorte por partículas minerais duras. O valor de dureza Vickers reforça o comportamento altamente resistente ao desgaste abrasivo, sendo significativamente superior aos materiais elastoméricos analisados.

A resistência à flexão e a tenacidade à fratura indicam capacidade de suportar esforços mecânicos antes da ocorrência de fratura, embora o comportamento cerâmico permaneça predominantemente rígido quando comparado aos elastômeros.

4.3.2 Propriedades laboratoriais da matriz elastomérica

Conforme apresentado na tabela 5, a borracha natural utilizada como matriz apresenta:

Tabela 5 – Propriedades da Borracha Natural

Propriedades da Borracha Natural			
Especificação	Valor	Unidade	Norma
Dureza	50 ± 5	Shore A	ASTM D 2240-14 (2021)
Resiliência	60 ± 10	Bashore	DIN 53512 (2000)
Densidade	1,016	g/cm ³	ISO 278 (2008)
Perda Volumétrica	90 ± 20	mm ³	ISO 4649 (2017)
Tração – ϵ	251,6	%	ASTM D412-16
Tração – TS	4,92	MPa	ASTM D412-16
Rasgo	34,82	N/mm	ASTM 6412-00 (2012)

Fonte Dados laboratoriais do fabricante

A matriz elastomérica apresenta dureza intermediária e capacidade de deformação significativa, permitindo absorção parcial de energia mecânica sob impacto. A perda volumétrica inferior à da borracha natural convencional (170 mm³) indica melhor desempenho abrasivo da formulação utilizada no sistema híbrido.

4.4 Estudo de Caso 01 – Retrofit em Sistema de Flotação

O presente estudo de caso foi elaborado com base no relatório técnico referente à aplicação de tubulações revestidas internamente com sistema híbrido de borracha natural e cerâmica de alta alumina ($\approx 92\%$) em um sistema industrial de flotação.

O projeto teve como objetivo avaliar o desempenho do revestimento híbrido em regiões sujeitas a desgaste severo, especialmente em curvas e conexões submetidas a elevada turbulência e concentração de partículas sólidas.

4.4.1 Caracterização do revestimento aplicado

Os componentes analisados foram revestidos com sistema constituído por:

- Matriz de borracha natural;

- Pastilhas de cerâmica de alta alumina ($\approx 92\%$);
- Disposição geométrica conforme pastilhas hexagonais.

Essa configuração estrutural foi projetada para proporcionar elevada resistência à abrasão superficial, associada à capacidade de absorção parcial de impactos pela matriz elastomérica, principalmente para as curvas da tubulação retrofit.



Figura 11 – Modelo 3D do projeto proposto
Fonte: Documento internos da empresa

4.4.2 Avaliação do desempenho em serviço

De acordo com o relatório técnico, após aproximadamente 4 meses e 20 dias de operação contínua, os componentes revestidos apresentavam desgaste mínimo, mantendo a integridade estrutural das pastilhas cerâmicas e da matriz de borracha conforme figura C.



Figura 12 – Inspeção visual após 4 meses e 20 dias de uso
Fonte: Documento técnico

As inspeções visuais realizadas indicaram:

- Ausência de fraturas relevantes nas pastilhas;
- Desgaste superficial homogêneo;
- Inexistência de vazamentos.

As imagens técnicas evidenciam preservação do padrão geométrico do revestimento, confirmando estabilidade estrutural sob condições operacionais severas.

4.4.3 Análise do termo de garantia

O relatório técnico estabelece garantia de 1 ano e 6 meses para os componentes revestidos com borracha e cerâmica. Essa garantia foi fundamentada na avaliação do desempenho observado em campo e na comparação com aplicações anteriores realizadas com poliuretano, cuja durabilidade média era de aproximadamente 8 meses em condições semelhantes.

O período de garantia concedido reflete:

- Confiabilidade do sistema híbrido;
- Estabilidade dimensional do revestimento;
- Baixa incidência de falhas prematuras;

- Adequação às condições de desgaste severo.

Observa-se que a estimativa de vida útil não foi baseada apenas em projeções teóricas, mas em evidências práticas obtidas durante o período de operação monitorado.

4.5 Estudo de Caso 02 – Avaliação comparativa de Revestimentos em Cachimbos na Alimentação de Classificadores

O Estudo de Caso 02 foi conduzido com o objetivo de comparar diretamente o desempenho de três tipos de revestimentos aplicados no mesmo ponto crítico do sistema de transporte de polpa mineral, especificamente na alimentação de classificadores. A análise foi realizada sob condições operacionais equivalentes, permitindo avaliação comparativa baseada na vida útil e no comportamento frente ao desgaste severo.

Foram avaliados três cenários distintos:

- Cachimbo revestido em poliuretano (PU);
- Cachimbo revestido com cerâmica aplicada diretamente sobre o aço;
- Cachimbo revestido com sistema híbrido borracha + cerâmica.

4.5.1 Cenário 1 – Revestimento em Poliuretano (PU)

Na primeira etapa, foram instalados cachimbos em aço revestidos internamente com poliuretano. O componente operou sob regime de elevada turbulência e concentração de partículas sólidas.

De acordo com o documento técnico, o revestimento apresentou vida útil média de aproximadamente 36 dias.



Figura 13 – Cachimbo revestido em PU e desgaste do revestimento
Fonte: Documento case do sucesso

Conforme a figura X o desgaste foi caracterizado por perda acelerada de material na região de maior incidência de partículas, exigindo substituições frequentes do componente.

4.5.2 Cenário 2 – Revestimento Cerâmico

Na segunda etapa, os cachimbos foram substituídos por componentes revestidos internamente com cerâmica fixada à tubulação de aço.

Nessa configuração, observou-se aumento significativo da vida útil, atingindo aproximadamente 180 dias de operação.

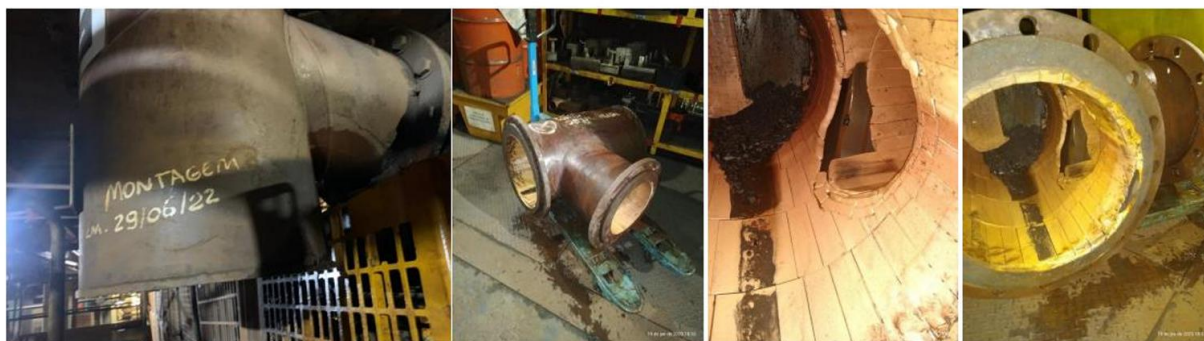


Figura 14 - Cachimbo revestido em cerâmica e desgaste do revestimento
Fonte: Documento case do sucesso

Segundo a Figura X, o revestimento cerâmico apresentou elevada resistência ao desgaste abrasivo, mantendo integridade estrutural por período superior ao PU. Entretanto, o material apresenta rigidez estrutural maior quando comparado aos elastômeros.

4.5.3 Cenário 3 – Revestimento em Borracha com Cerâmica

Na etapa final, foram instalados cachimbos revestidos com sistema híbrido constituído por borracha natural e pastilhas cerâmicas (92% Al_2O_3), em 20/01/2023.

Segundo o relatório, os componentes atingiram vida útil de 347 dias de operação até 02/01/2024.



Figura 15 - Cachimbo revestido em borracha + cerâmica e desgaste do revestimento
Fonte: Documento case do sucesso

Segundo a figura X, além da elevada durabilidade, o sistema apresentou:

- Desgaste superficial homogêneo;
- Ausência de vazamentos;
- Manutenção da aderência ao substrato;
- Redução significativa na necessidade de intervenções corretivas.

4.5.4 Análise Comparativa do Estudo de Caso 02

A tabela 6 apresenta a síntese comparativa dos resultados obtidos.

Tabela 6 – Comparação de desempenho no Estudo de Caso 02

Revestimento	Vida útil observada	Comportamento frente ao desgaste
Poliuretano (PU)	36 dias	Desgaste acelerado e substituições frequentes
Cerâmica	180 dias	Alta resistência abrasiva, maior durabilidade
Borracha + Cerâmica	347 dias	Melhor desempenho global e maior estabilidade

Fonte: Pesquisa direta

A evolução do desempenho entre as três situações demonstra aumento progressivo da durabilidade conforme a complexidade estrutural do revestimento. O sistema híbrido

apresentou vida útil aproximadamente 9,6 vezes superior ao poliuretano e cerca de 1,9 vezes superior à cerâmica isolada.

4.6 Análise Comparativa Final Integrada

A partir dos resultados apresentados nos Estudos de Caso 01 e 02, observa-se diferença significativa de desempenho entre os revestimentos avaliados, tanto em termos de resistência ao desgaste quanto de durabilidade operacional.

No Estudo de Caso 01, aplicado em sistema de flotação, o revestimento híbrido borracha + cerâmica demonstrou estabilidade estrutural após 4 meses e 20 dias de operação contínua, apresentando desgaste superficial homogêneo e ausência de fraturas nas pastilhas cerâmicas. O relatório técnico estabeleceu garantia de 1 ano e 6 meses para o sistema, fundamentada na comparação com aplicações anteriores em poliuretano, cuja vida útil média era inferior.

No Estudo de Caso 02, realizado na alimentação de classificadores, a comparação direta no mesmo ponto crítico evidenciou evolução progressiva de desempenho entre os revestimentos. O poliuretano apresentou vida útil média de 36 dias, o revestimento cerâmico atingiu aproximadamente 180 dias, enquanto o sistema híbrido borracha + cerâmica alcançou 347 dias de operação.

Os resultados indicam que o desempenho está diretamente relacionado às propriedades estruturais de cada material. O poliuretano apresenta boa resistência ao impacto e propriedades mecânicas elevadas dentro da faixa elastomérica, porém resistência limitada ao desgaste abrasivo severo. A cerâmica, por sua vez, apresenta elevada dureza e excelente resistência ao microcorte, refletindo aumento significativo da vida útil. O sistema híbrido combina essas características, associando resistência abrasiva superficial com absorção de impacto pela matriz elastomérica, o que se refletiu na maior durabilidade observada.

Tabela 7 – Comparação Geral dos Revestimentos Avaliados

Critério	Poliuretano (PU)	Cerâmica	Borracha + Cerâmica
Dureza	82 ± 3 Shore A	Mohs 9 / 1200 ± 50 MPa	50 ± 5 Shore A (matriz) + cerâmica 92%
Resistência à abrasão (ensaio)	45 mm ³	Muito alta	90 ± 20 mm ³ (matriz)
Resistência ao impacto	Boa	Média	Alta (absorção pela matriz)
Flexibilidade	Alta	Baixa	Média
Vida útil – Caso 02	36 dias	180 dias	347 dias
Desempenho em regiões críticas	Limitado	Elevado	Superior

Fonte: Pesquisa Direta

Conforme tabela e estudos de caso, de forma integrada, verifica-se que o sistema híbrido apresentou desempenho aproximadamente 9,6 vezes superior ao poliuretano e 1,9 vezes superior ao revestimento cerâmico isolado na aplicação comparativa direta. Essa diferença evidencia a influência da combinação estrutural entre dureza superficial e capacidade de amortecimento interno na resistência ao desgaste em ambientes de alta severidade tribológica.

Os resultados obtidos neste capítulo fornecem base técnica para responder à pergunta-problema do estudo, permitindo compreender como diferentes revestimentos internos se comportam sob condições reais de transporte de polpa mineral.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

O presente estudo teve como objetivo realizar um estudo comparativo de revestimentos internos aplicados em tubulações destinadas ao transporte de polpa mineral, com foco na análise de desempenho sob condições reais de operação. A pesquisa integrou levantamento bibliográfico, análise de propriedades laboratoriais e avaliação prática por meio de dois estudos de caso industriais.

A partir da caracterização dos materiais, verificou-se que o poliuretano apresenta boas propriedades mecânicas dentro da faixa elastomérica, com resistência moderada à abrasão e adequada capacidade de absorção de impacto. A borracha natural demonstrou elevada resiliência e deformabilidade, porém menor resistência ao desgaste abrasivo severo. Já o sistema híbrido borracha com inserção cerâmica associou elevada dureza superficial (cerâmica de alta alumina) à capacidade de amortecimento da matriz elastomérica, configurando solução estruturalmente diferenciada.

Os resultados obtidos nos estudos de caso evidenciaram diferenças significativas de desempenho entre os revestimentos. No Estudo de Caso 02, conduzido na alimentação de classificadores, o poliuretano apresentou vida útil média de 36 dias, o revestimento cerâmico atingiu aproximadamente 180 dias e o sistema híbrido borracha + cerâmica alcançou 347 dias de operação. Esses dados demonstram superioridade do sistema híbrido nas condições avaliadas, especialmente em regiões críticas sujeitas a elevada turbulência e concentração de partículas.

O Estudo de Caso 01 reforçou essa tendência ao demonstrar estabilidade estrutural do revestimento híbrido após 4 meses e 20 dias de operação contínua em sistema de flotação, com desgaste superficial homogêneo e ausência de falhas estruturais.

Dessa forma, pode-se concluir que a combinação entre dureza superficial elevada e capacidade de absorção de impacto proporcionada pela matriz elastomérica constitui fator determinante para o aumento da vida útil em ambientes de desgaste severo. O sistema híbrido apresentou o melhor desempenho global entre os revestimentos avaliados nas condições analisadas.

Assim, a pergunta-problema — “Como realizar um estudo comparativo de revestimentos internos em tubulações para transporte de polpa mineral?” — foi respondida

por meio da integração entre propriedades laboratoriais, aplicação prática e análise comparativa sob condições reais de operação, demonstrando que a avaliação técnica deve considerar simultaneamente propriedades mecânicas, comportamento estrutural e desempenho em campo.

5.2 Recomendações

Com base nos resultados obtidos e nas limitações identificadas ao longo do desenvolvimento deste estudo, recomenda-se, para trabalhos futuros:

- Análise do comportamento tribológico de revestimentos internos sob diferentes granulometrias e concentrações de sólidos em polpas minerais;
- Influência do ângulo de impacto das partículas na taxa de desgaste de revestimentos elastoméricos e cerâmicos aplicados em tubulações industriais;
- Estudo microestrutural da interface cerâmica–borracha em revestimentos híbridos para transporte de polpa mineral.

Essas investigações poderão contribuir para o aprimoramento das técnicas de seleção e aplicação de revestimentos internos, promovendo maior eficiência, confiabilidade e sustentabilidade nos sistemas de transporte de polpa.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário Mineral Brasileiro 2022**. Brasília: ANM, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro-2022>. Acesso em: 28 fev. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15347: Mangueiras industriais de borracha – Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CANEVAROLO JUNIOR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006.

CARVALHO, Paulo Rogério de. **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.

CHAVES, Arthur Pinto. **Teoria e prática do tratamento de minérios: bombeamento de polpa e classificação**. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CHHABRA, Rajendra P. **Bubbles, drops and particles in non-Newtonian fluids**. Boca Raton: CRC Press, 2010.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características, tratamentos e aplicações**. 7. ed. São Paulo: ABM, 2008.

DIN 50320. **Tribologie – Begriffe, Systematik, Definitionen**. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 1979.

ENDO, Ivo. **Quadrilátero Ferrífero**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2019. 1 mapa.

FINNIE, Iain. Erosion of surfaces by solid particles. *Wear*, Lausanne, v. 3, n. 2, p. 87-103, 1960.

FRANCISCO, Alberto de. **Variáveis e indicadores**. Metodologia de Pesquisa 2, 2007. Disponível em: <https://metodologiadespesquisa2.blogspot.com/2007/08/variaveis-e-indicadores.html>. Acesso em: 28 fev. 2026.

GENT, Alan N. **Engineering with rubber: how to design rubber components**. 3. ed. Munich: Hanser, 2012.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: UFRGS, 2009.

- GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.
- GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- HUTCHINGS, Ian M.; SHIPWAY, Philip. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.
- IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Relatório anual de atividades 2023**. Brasília: IBRAM, 2023.
- LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- LEVY, Alan V. **Solid particle erosion and erosion-corrosion of materials**. Materials Park: ASM International, 1995.
- LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Sérgio Luiz Monteiro de. **Tratamento de minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2018.
- MACEDO, Neusa Dias de. **Iniciação à pesquisa bibliográfica: guia do estudante para fundamentação do trabalho de pesquisa**. São Paulo: Loyola, 1996.
- MA, Rui et al. **Optimized design of pipe elbows for erosion wear**. Applied Sciences, Basel, v. 14, n. 3, 2024.
- MITCHELL, Gordon. **Problems and fundamentals of sustainable development indicators**. Sustainable Development, v. 4, n. 1, p. 1-11, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1719\(199603\)4:1%3C1::AID-SD24%3E3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1719(199603)4:1%3C1::AID-SD24%3E3.0.CO;2-N). Acesso em: 28 fev. 2026.
- OLIVEIRA, Hermes Paulo Santos de. **Contribuição ao estudo do desgaste erosivo e abrasivo de poliuretanos utilizados na indústria mineradora e petrolífera**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.
- PRESS, Frank; SIEVER, Raymond; GROTZINGER, John; JORDAN, Thomas H. **Para entender a Terra**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- RICHERSON, David W. **Modern ceramic engineering**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- SANTINI, J, **Requisitos Técnicos de Mangueiras, Mangotes e Tubos Metálicos Flexíveis**. Disponível em [https://www.petroblog.com.br/wp-content/uploads/Mangueira mangote-e-tubo-metalico-flexivel-de-uso-industrial.pdf](https://www.petroblog.com.br/wp-content/uploads/Mangueira%20mangote-e-tubo-metalico-flexivel-de-uso-industrial.pdf) Acessado em 05 Set 2024
- SILVA, Vinícius Augusto da; COSTA, Adilson Rodrigues da. **Desgaste de poliuretano por erosão úmida: desenvolvimento de um ensaio tecnológico**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 144-150, abr./jun. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.1265>. Acesso em: 28 fev. 2026.

SUSKI, Cássio Aurélio. **Estudo do efeito de tratamentos e revestimentos superficiais na vida de ferramentas de conformação mecânica à frio**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

TARODIYA, Rahul; LEVY, Avi. **Surface erosion due to particle-surface interactions: a review**. Powder Technology, v. 387, p. 527-559, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.04.055>. Acesso em: 28 fev. 2026.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. **Tubulações industriais: cálculo**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

TOZONI-REIS, Marilia Freitas de Campos. **Metodologia da pesquisa científica**. Campinas: Autores Associados, 2007.

VILAR, Walter D. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 2004.

WASP, Ernest J.; KENNY, James P.; GANDHI, Ramesh L. **Solid-liquid flow slurry pipeline transportation**. Clausthal: Trans Tech Publications, 1977.

WILSON, Kenneth C.; ADDIE, George R.; SELLGREN, Anders. **Slurry transport using centrifugal pumps**. 3. ed. New York: Springer, 2006.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

ZUM GAHR, Karl-Heinz. **Microstructure and wear of materials**. Amsterdam: Elsevier, 1987.