



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



MARCUS VINÍCIUS ALVES GOMES

**ESTUDO DE FALHAS EM UMA LINHA DE TUBULAÇÃO NA
MINERAÇÃO: UMA ABORDAGEM COM FMEA PARA OTIMIZAÇÃO
DA MANUTENÇÃO**

OURO PRETO - MG
2026

MARCUS VINICIUS ALVES GOMES

Marcus.vag@aluno.ufop.edu.br

**ESTUDO DE FALHAS EM UMA LINHA DE TUBULAÇÃO NA
MINERAÇÃO: UMA ABORDAGEM COM FMEA PARA OTIMIZAÇÃO
DA MANUTENÇÃO**

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: MSC. Sávio Sade Tayer

**OURO PRETO – MG
2026**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G633e Gomes, Marcus Vinicius Alves.

Estudo de falhas em uma linha de tubulação na mineração uma abordagem com fmea para otimização da manutenção. [manuscrito] / Marcus Vinicius Alves Gomes. - 2026.
76 f.

Orientador: Prof. Me. Savio Sade Tayer.

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

1. Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA). 2. Fábricas - Manutenção. 3. Tubulação - Revestimentos. 4. Tubulação. I. Tayer, Savio Sade. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Marcus Vinícius Alves Gomes

Estudo de falhas em uma linha de tubulação na mineração: uma abordagem com FMEA para otimização da manutenção.

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

Aprovada em 05 de fevereiro de 2026

Membros da banca

Msc. Sávio Sade Tayer- Orientador - UFOP Universidade Federal de Ouro Preto

Dsc. Washington Luis Vieira da Silva - UFOP Universidade Federal de Ouro Preto

Dsc. Diogo Antônio de Souza - 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 05 de fevereiro de 2026



Documento assinado eletronicamente por **Sávio Sade Tayer**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/02/2026, às 14:34, 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 **1066814** e o código CRC **9DEEC132**.

A Deus dedico mais esta conquista, junto
a meus pais Eder e Luciene e meu irmão
Lucas pelo apoio e incentivo durante a
graduação

AGRADECIMENTO

A Deus por permitir ter mais uma conquista na minha vida.

Aos meus pais, Eder e Luciene por sempre me apoiarem durante essa jornada não me permitir desistir em nenhum momento.

Ao meu irmão Lucas Alves Gomes que sempre esteve do meu lado para me ajudar e apoiar com os estudos e trabalhos acadêmicos.

Ao meu orientador Sávio pelos ensinamentos e apoio desde o início da graduação até a elaboração da monografia sempre estando a disposição para tirar dúvidas.

Aos professores do curso de engenharia mecânica por suas importantes contribuições para o aprimoramento dos meus conhecimentos ao longo da graduação aos quais sempre levarei durante minha jornada profissional.

Aos meus companheiros da graduação por todo auxílio com os estudos.

Aos meus colegas de trabalho e amigos da empresa em estudo que foram fundamentais para a realização desse trabalho.

Aos meus amigos de Ouro Preto e Itabirito que fizeram os momentos mais difíceis dessa trajetória da graduação parecessem mais leves e fáceis de superar.

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

RESUMO

Este trabalho aborda o estudo de falhas em uma linha de tubulação utilizada no transporte de polpa de minério na indústria da mineração, destacando a importância da manutenção estratégica para a confiabilidade operacional e a continuidade da produção. O aumento da rede de minerodutos no Brasil, juntamente com condições operacionais rigorosas, como a abrasividade do material, vibrações e vazamentos faz com que essas tubulações estejam vulneráveis a falhas que podem provocar interrupções inesperadas, prejuízos financeiros e riscos ao meio ambiente. Nesse contexto, o objetivo deste estudo consiste em analisar as principais falhas ocorridas em uma linha de tubulação por meio da aplicação da metodologia FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*), visando à otimização dos processos de manutenção. A pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso de natureza qualitativa, fundamentado em revisão bibliográfica, análise documental e dados técnicos fornecidos por uma empresa do setor mineral. Foi avaliado nesse trabalho uma linha de tubulação de polpa de minério a qual a mesma era constituída por 2 tipos específicos de tubulações, as de aço revestido de borracha e as mangotes, após a utilização de diferentes métodos de inspeção, incluindo inspeção visual, ultrassom, termografia e PIG instrumentado foi enviado os dutos danificados a empresa especializada em reparo de tubulações, esta empresa fez uma peritagem em cada tubo enviado identificando novas falhas e com isso foi possível elaborar uma tabela FMEA. A aplicação do FMEA permitiu identificar os modos de falha mais críticos, suas causas, efeitos e níveis de risco, possibilitando a priorização de ações corretivas e preventivas. Os resultados indicaram que revestimento interno não era ideal para aquela atividade sendo necessário um com maior resistência a abrasão e outras causas como vazamentos em flanges, corrosão na estrutura metálica dos tubos de aço e ruptura nos mangotes também são responsáveis pelos maiores impactos operacionais. Conclui-se que a com utilização do FMEA foi possível identificar e realizar melhorias na linha, a troca do revestimento interno aplicação de sensores de desgaste e a capacitação da equipe de montagem foi essencial para contribuir significativamente para o aumento da confiabilidade da linha de tubulação, redução de paradas não planejadas, melhoria da segurança operacional e apoio à tomada de decisão na gestão da manutenção.

Palavras-chave: Manutenção. Tubulação. Mineração. FMEA. Análise de falhas.

ABSTRACT

This work refers to the study of failures in a pipeline used to transport ore pulp in the mining industry, highlighting the importance of strategic maintenance for operational reliability and production continuity. The increase in the network of ore pipelines in Brazil, along with rigorous operating conditions such as material abrasiveness, vibrations, and leaks, makes these pipelines vulnerable to failures that can cause unexpected interruptions, financial losses, and environmental risks. In this context, the objective of this study is to analyze the main failures that occurred in a pipeline through the application of the FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) methodology, aiming at the optimization of maintenance processes. The research is characterized as a qualitative case study, based on a literature review, document analysis, and technical data provided by a company in the mineral sector. This study evaluated a mineral slurry pipeline consisting of two specific types of pipes: rubber-lined steel pipes and rubber tubes. After using different inspection methods, including visual inspection, ultrasound, thermography, and instrumented PIG testing, the damaged pipes were sent to a company specializing in pipeline repair. This company performed an expert assessment on each pipe, identifying new faults, and thus a FMEA table was created. The application of FMEA allowed the identification of the most critical failure modes, their causes, effects, and risk levels, enabling the prioritization of corrective and preventive actions. The results the internal coating was not ideal for that activity, and that one with greater abrasion resistance was necessary. Other causes, such as leakage in flanges, corrosion in the metallic structure of the steel pipes, and rupture in the hoses are also responsible for the greatest operational impacts. It is concluded that the use of FMEA made it possible to identify and implement improvements in the pipeline; the replacement of the internal lining, the application of wear sensors, and the training of the assembly team were essential to significantly contribute to increasing the reliability of the pipeline, reducing unplanned shutdowns, improving operational safety, and supporting decision-making in maintenance management

.Key-words: Maintenance. Piping. Mining. FMEA. Failure analysis..

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Malha de mineroduto no Brasil	2
Figura 2 - Tipos de manutenção	7
Figura 3 - Sensor de desgaste de revestimento.....	10
Figura 4 - Falha identificadas em Inspeção Visual.....	11
Figura 5 - Medição por Ultrassom.....	12
Figura 6 - Funcionamento do PIG	13
Figura 7 - PIG Ultra Sônico.....	14
Figura 8 - Caliper PIG	15
Figura 9 - Pig de limpeza com placa calibradora	15
Figura 10 - Pig Inercial.....	16
Figura 11 – Termografia.....	17
Figura 12 - Gráfico FMEA	19
Figura 13 - Operadores de Mineroduto no Brasil.....	21
Figura 14 - Construção da tubulação Mangote.....	21
Figura 15 - Tubulação mangote.....	23
Figura 16 - Tubo de aço revestido de Borracha.....	25
Figura 17 - Tubo revestido de borracha com cerâmica	26
Figura 18 - Flanges juntas e fixadores.....	27
Figura 19 - Ligação soldada	28
Figura 20 - Fluxograma da metodologia de trabalho	30
Figura 21 - Fluxograma do processo de produção da empresa em estudo	33
Figura 22 - Falha de Revestimento.....	37
Figura 23 - Falha de flanges	38
Figura 24 - Método de aperto de parafusos em flanges.....	39

Figura 25 - Falha da estrutura metálica por desgaste	40
Figura 26 - Falha da estrutura metálica por tricas	41
Figura 27 - Ruptura em mangotes	42
Figura 28 - Legenda tabela FMEA	45
Figura 29 - Manta de borracha e Cerâmica	49
Figura 30 - Catalogo de Flanges segundo a norma ANSI B16.5	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Variáveis e indicadores da pesquisa.....	32
Tabela 2- Métodos de Inspeção de tubulação.....	36
Tabela 3 - Analise FMEA.....	44
Tabela 4- Borracha de abrasão dos Mangotes	47
Tabela 5 - Revestimento dos tubos de aço	48
Tabela 6- Propriedades da Cerâmica	50
Tabela 7 - Analise de vida útil dos revestimentos	54

LISTA DE SIMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	<i>American National Standards Institute</i> (Instituto nacional americano de padrões)
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos)
END	Ensaaios não destrutivos
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i> (Análise de Modos de Falha e Seus Efeitos)
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
GPa	Gigapascal
mm ³	milímetros cúbicos
PIG	<i>In Line Inspections</i> (Instrumento de Inspeção em Linha)
UT	<i>Ultrasonic Testing</i> (Ensaio de Ultrassom)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	3
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	Manutenção	6
2.1.1	Tipos de manutenção	7
2.2	Métodos para a indicação de falhas	9
2.2.1	Sensor de desgaste	9
2.2.2	Inspeção Visual	10
2.2.3	Ultrassom.....	12
2.2.4	PIG.....	13
2.2.5	TERMOGRAFIA	17
2.3	FMEA.....	18
2.4	MINERODUTO	20
2.5	TIPOS DE TUBULAÇÕES DA LINHA	21
2.5.1	Tubulação Mangote	21
2.5.2	TUBULAÇÃO REVESTIDAS	24
2.5.3	Cconexão de tubulação	27
3	METODOLOGIA.....	29
3.1	Tipos de pesquisa.....	29
3.2	Matérias e métodos	30
3.3	Variáveis e indicadores.....	31
3.4	Instrumento de coleta de dados	32
3.5	Tubulação de dados	32
3.6	Considerações finais do capítulo	32
4	METODOLOGIA.....	33

4.1	Empresa em estudo	33
4.2	Estudo de caso	34
4.3	A linha de tubulação	35
4.4	Inspeção dos tubos	35
4.5	Peritagem dos tubos	37
4.5.1	Falha crucial no revestimento	37
4.5.2	Falha dos flanges	38
4.5.3	Estrutura metálica das tubulações danificada	40
4.5.4	Desgaste dos mangotes	42
4.6	Análise de Falha	43
4.7	Definição e implementação de ações preventivas e corretivas e melhorias	46
4.7.1	Revestimento interno	46
4.7.2	Sensor de Desgaste de revestimento	51
4.7.3	Reparos estruturais dos tubos e flanges	52
4.8	Resultados	54
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	55
5.1	Conclusão	55
5.2	Recomendações	55
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

A manutenção desempenha um papel fundamental na indústria assegurando um pleno funcionamento de máquinas e sistemas e garantindo confiabilidade e continuidade da operação isto posto ela é especialmente relevante na área da mineração, onde a interrupção das operações pode resultar em perdas significativas de produção e aumentar os riscos de segurança.

Xenos (1998) descreve que para que uma empresa consiga atingir suas metas é de suma importância que os equipamentos consigam desempenhar suas determinadas funções de forma constante com isso a manutenção é uma das etapas mais importantes no processo de qualidade e produtividade, dessa forma para controlar o processo de manutenção é necessário medir os resultados e estabelecer controle sobre as causas e processo.

Segundo Kardec e Nascif (2009, p.11):

A manutenção para ser estratégica precisa estar voltada para resultados empresariais da organização. É preciso sobretudo deixar de ser apenas eficiente para se tornar eficaz, ou seja, não basta, apenas, reparar o equipamento ou instalação tão rápido quanto possível, mas é preciso principalmente, manter a função do equipamento disponível para a operação, reduzindo a probabilidade de uma parada de produção não planejada.

De acordo com a norma NBR 5462(1994, p.3) a confiabilidade é "a probabilidade de um item desempenhar uma função requerida, sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo" Essa definição reforça a importância de práticas de manutenção eficazes e da análise de falhas para assegurar que os equipamentos na mineração operem de maneira confiável e contínua.

Reis *et al* (2010) ressalta que a manutenção não é apenas uma área operacional mas também estratégica da empresa, contribuindo efetivamente para um melhor desempenho da produtividade e para o equilíbrio entre gestão e técnica.

. Simard *et al* (2023) estima-se que os custos de manutenção de equipamentos constituem de 30% a 50% do orçamento anual de uma operação de mineração, tendo como

base nesses dados é de suma importância o planejamento e gestão de manutenção para diminuir o impacto no lucro final.

Um dos equipamentos de maior importância na mineração são as tubulações, normalmente utilizados para transportar fluidos (líquidos, gases ou materiais sólidos suspensos em líquidos) de um ponto a outro. Na mineração, elas são fundamentais principalmente no transporte de polpas minerais.

Segundo Chaves (2012), as linhas de tubulação para polpas devem ser projetadas considerando o tipo de minério, a granulometria, a concentração da polpa e a velocidade crítica de escoamento, a fim de evitar o entupimento ou desgaste prematuro.

Telles (2001) reforça que o projeto de tubulações industriais incluindo as de mineração devem levar em consideração não apenas a resistência mecânica dos materiais, mas também os efeitos abrasivos das partículas transportadas, o que exige o uso de revestimentos ou ligas metálicas resistentes ao desgaste.

Para Torres (2021), a malha de minerodutos brasileira vem crescendo cada vez mais, o gráfico da figura 1 evidencia uma expansão contínua da malha acumulada ao longo das décadas, passando de 398 km em 1977 para 2.442 km em 2014, tendo um expressivo aumento a partir de 2008 como mostra a figura 1

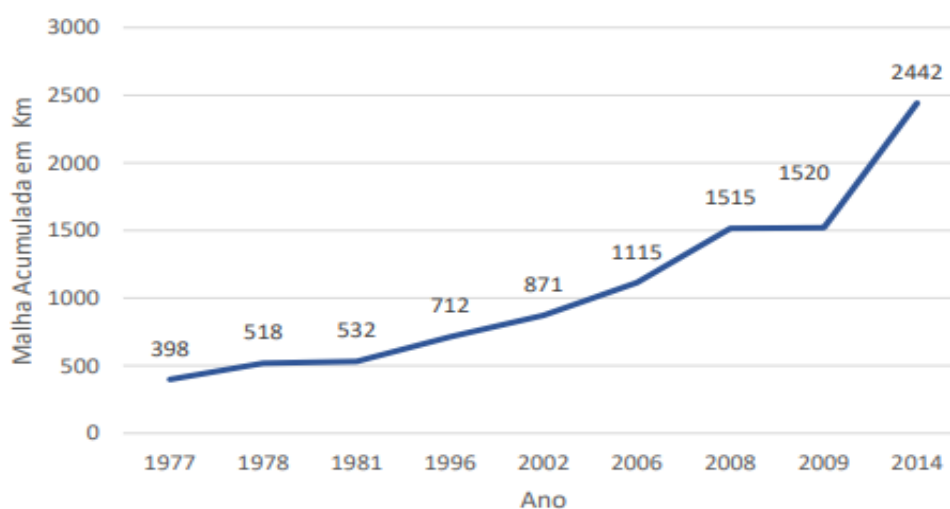


Figura 1 - Malha de mineroduto no Brasil
Fonte: Torres (2021).

Observe-se pela figura 1 que com base nestes dados o aumento da malha se faz ainda mais necessário a manutenção do mesmo garantindo que a linha não seja interrompida e o escoamento do minério se mantenha ininterrupto

Fogliatto e Ribeiro (2019) ressalta que falhas em sistemas de tubulação representam riscos operacionais significativos e implicam em custos elevados de manutenção. Portanto, a aplicação de técnicas preventivas e metodologias como a FMEA é recomendada para identificar pontos vulneráveis e priorizar intervenções que evitem paralisações no processo produtivo.

Segundo Siqueira (2012), o FMEA é uma ferramenta essencial para a gestão da qualidade, pois permite identificar falhas potenciais de maneira antecipada, possibilitando ações corretivas capazes de aumentar a confiabilidade dos processos e reduzir riscos operacionais.

A partir das informações obtidas dos autores sobre a importância da manutenção estratégica e sobre o crescimento das malhas dos minerodutos se tem o seguinte questionamento para esse estudo:

Como o estudo da metodologia FMEA pode contribuir para minimizar as falhas em uma linha de tubulação na mineração, visando a otimização dos processos de manutenção?

1.2 Justificativa

Na mineração a confiabilidade dos equipamentos é um dos fatores essenciais para garantir a estabilidade da produção. Falhas nos tubos podem resultar na interrupção da linha resultando em perdas financeiras significativa e riscos à segurança. A confiabilidade é diretamente ligada ao desempenho organizacional. Nesse sentido a implementação de práticas de manutenção centrada na confiabilidade não apenas melhora a eficiência dos equipamentos, mas também tem um impacto significativo nos resultados financeiros da empresa (MOUBRAY, 1996).

Para Oliveira (2018) os dois vazamentos ocorridos por falhas na tubulação em pontos distintos no mineroduto Minas-Rio em 12 e 31 de março de 2018 causaram perdas de aproximadamente 300 Toneladas e 170 Toneladas de polpa de minério respectivamente, causando perda financeira e ambiental.

A manutenção bem planejada e executada não apenas reduz o tempo de inatividade e os custos de reparo, mas também aumenta a confiabilidade dos equipamentos, resultando em uma operação mais eficiente e lucrativa (MONCHY 1989).

Portanto com base nessas informações é de suma importância aplicação de medidas de análise de falhas nas tubulações pois ira possível reduzir a despesa que uma parada não programada poderia acarretar na linha, também irá impactar numa melhora tanto na segurança quanto no meio ambiente que ocorre quando a vazamentos nessas tubulações.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Realizar um estudo de falhas em uma linha de tubulação através do uso do método FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) na otimização da manutenção de uma linha de tubulações na mineração

1.3.2 Específicos

- Realizar uma pesquisa sobre: manutenção, manutenção estratégica, métodos de manutenção preditiva, e Análise e Modo de Efeito de Falhas (FMEA);
- Elaborar uma análise detalhada das falhas ocorridas em uma linha de tubulação, identificando as causas raiz dessas falhas;
- Quantificar os impactos das falhas nas tubulações em termos de severidade, ocorrência e detecção.
- Apresentar os resultados do estudo com as soluções aplicadas para correção e prevenção das falhas identificadas na linha

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é dividido em cinco capítulos.

O primeiro capítulo apresenta a introdução ao tema, sendo que inicialmente e contextualizado ao leitor o problema e posteriormente a justificativa da realização do estudo, o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho, finalizando-se com a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo compreende a revisão bibliográfica, responsável por fornecer o embasamento teórico da pesquisa. Neste capítulo são abordados os tipos de manutenção industrial, métodos de indicação de falhas em tubulações, FMEA, minerodutos e tipos de tubulações.

O terceiro capítulo descreve a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, incluindo o tipo de pesquisa, os procedimentos adotados para a coleta e análise dos dados, bem como as etapas de aplicação da ferramenta FMEA no estudo do sistema de tubulação selecionado.

O quarto capítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta, evidenciando os principais modos de falha identificados, seus efeitos no processo produtivo e os benefícios da utilização do FMEA para o planejamento e otimização da manutenção das tubulações na mineração.

O quinto capítulo contempla as conclusões do estudo, destacando as contribuições do trabalho para a melhoria da confiabilidade dos sistemas de tubulação, a redução de falhas e a otimização dos processos de manutenção, além de apresentar recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda definições da manutenção e os dos diferentes tipos de manutenção, tubulações e diversos tipos de tubulações que vão na linha de operação de mineração e sobre a metodologia FMEA a partir referenciais bibliográficos.

2.1 Manutenção

A manutenção tem um papel fundamental na operação de mineração porque ela exerce influência direta sobre a continuidade e a eficiência do processo produtivo e a conceituação de manutenção é essencial neste estudo pois definir esse conceito permite delimitar seus objetivos, tipos e impactos sobre a confiabilidade e o desempenho operacional.

De acordo com Xenos (1998), a manutenção é definida como um conjunto de práticas e atividades destinadas a preservar ou restaurar a condição de equipamentos e instalações, assegurando que eles operem de maneira eficiente e confiável. O autor destaca a importância da manutenção como uma função essencial na gestão de ativos, voltada para a prevenção de falhas, a maximização da vida útil dos equipamentos e a otimização do desempenho operacional.

Para Monchy (1987), manutenção não se resume apenas a reparar falhas, mas também a adotar práticas preventivas e preditivas que visam minimizar paradas não planejadas, otimizar a vida útil dos ativos e contribuir para a produtividade global da organização.

Conforme Moubray (1996), a manutenção pode ser entendida como um conjunto estruturado de ações que tem por finalidade garantir que os ativos físicos continuem executando suas funções conforme o desempenho esperado ressaltando que a escolha e a aplicação adequadas das estratégias de manutenção permitem que os equipamentos operem dentro dos requisitos de disponibilidade, qualidade, custos, durabilidade e confiabilidade, ao mesmo tempo em que contribuem para a preservação ambiental e para a segurança das pessoas envolvidas nas operações.

A NBR-5462 (1994, p.6), define manutenção como “a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou realocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”.

2.1.1 Tipos de manutenção

Kadec e Nascif (2009) abordam diversos tipos de manutenção, destacando a manutenção corretiva não planejada, corretiva planejada, preventiva, preditiva e detectiva como estratégias fundamentais para garantir a eficiência operacional e a longevidade dos equipamentos, a figura 2 destaca os tipos de manutenção e as ações necessárias que devem ser tomadas

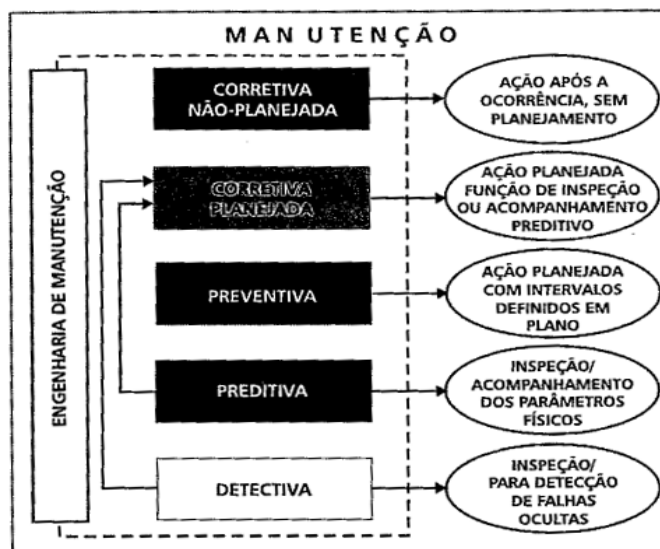


Figura 2 - Tipos de manutenção
Fonte: Kardec e Nascif (2009).

A figura 2 apresenta a classificação dos principais tipos de manutenção adotados na engenharia de manutenção, evidenciando as diferenças entre as abordagens corretiva (planejada e não planejada), preventiva, preditiva e detectiva.

- Manutenção Corretiva

De acordo com a norma NBR 5462 (1994, p.7) a manutenção corretiva é “Manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida.”

Xenos (1998) ressalta que a manutenção corretiva sempre é feita após a falha do equipamento este método deve levar em consideração principalmente fatores econômicos considerando se é a melhor opção a manutenção corretiva levando em conta as perdas por parada de produção que podem acabar saindo mais caro do que o previsto a princípio.

Para Kardec e Nascif (2009) a manutenção corretiva não planejada e a manutenção da falha de maneira aleatória sem ocorrer o devido estudo da falha e uma preparação para a realização do serviço podendo acarretar alto custo e perda da produção e qualidade do produto. No caso da manutenção corretiva planejada seria uma correção do desempenho menor que o esperado ou correção por decisão gerencial, sua principal característica é a função da qualidade da informação fornecida pelo acompanhamento do equipamento.

- Manutenção Preventiva

Conforme a norma NBR 5462 (1994, p.7) a manutenção preventiva é a “manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item”.

Para Moubray (1996), a manutenção preventiva deve ser baseada em dados históricos de falhas e em uma compreensão detalhada dos modos de falha dos equipamentos, permitindo assim que as intervenções sejam planejadas de maneira otimizada para minimizar o desgaste e maximizar a vida útil dos ativos.

Segundo Souza (2009), ao realizar inspeções e intervenções programadas com base em cronogramas definidos ou na condição dos equipamentos, é possível prevenir falhas inesperadas e aumentar a confiabilidade operacional.

- Manutenção Preditiva

De acordo com Kardec e Nascif (2009), é a manutenção que tem como objetivo prevenir falhas através de parâmetros fazendo com que a operação continua do equipamento ocorra durante o maior tempo possível, e quando o grau de degradação atinge o limite é tomada a decisão de intervenção

A norma NBR 5462 (1994, p.7) descreve esse método de manutenção como

Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.

Xenos (1998) destaca que a manutenção preditiva é uma modalidade mais cara pois a troca ou reforma de componentes ocorre antes de atingirem o limite de vida, já a manutenção preditiva permite otimizar a troca de peças e componentes e estender o intervalo de manutenção prevendo quando os mesmos estarão perto do seu limite de funcionamento.

- Manutenção detectiva

Segundo Kardec e Nascif (2009, p.47) “Manutenção detectiva é a atuação efetuada em sistemas de proteção, comando e controle, buscando detectar Falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção.”

Kardec e Nascif (2009), ressalta também que esse tipo de manutenção focada na identificação precoce de falhas ocultas ou não evidentes em equipamentos e sistemas. Ao contrário da manutenção preventiva, que atua para evitar falhas através de intervenções planejadas, e da manutenção corretiva, que responde a falhas já ocorridas, a manutenção detectiva se concentra em encontrar problemas que não são imediatamente aparentes ou que não causaram ainda um impacto direto no funcionamento dos ativos.

Métodos utilizados para detectar essas falhas, são utilizadas técnicas de monitoramento e inspeção avançadas, como testes não destrutivos como ultrassom, radiografia e outros métodos de diagnósticos, esses métodos são aplicados em intervalos regulares ou sob condições específicas para garantir que qualquer degradação ou defeito seja detectado o mais cedo possível.

2.2 Métodos para a indicação de falhas

2.2.1 Sensor de desgaste

Stachowiak e Batchelor (2011) destacam que os equipamentos utilizados na mineração estão sujeitos a diversos mecanismos de desgaste, como abrasão, impacto, erosão, corrosão e fadiga. Cada um desses fenômenos atua de forma distinta sobre os componentes, afetando seu desempenho e reduzindo sua vida útil ao longo da operação.

Devido a essa situação, Mobley (2002) ressalta que a aplicação de sensores no monitoramento preditivo permite identificar o desgaste ainda em sua fase inicial, evitando paradas inesperadas. A figura 3 mostra como é aplicado um sensor de desgaste em uma tubulação de desgaste.



Figura 3 - Sensor de desgaste de revestimento
Fonte: Delrey Minerals (2025).

Observa-se pela figura 3 que o sensor de desgaste é colocado abaixo da manta de cerâmica e está sobre uma carga constante conectado a um painel indicador, o nível de desgaste é disponibilizado ao usuário para inspeção mediante ao acionamento do componente sensorial que, sem alimentação elétrica externa, possibilita uma melhor previsibilidade para reposição e manutenção do arranjo onde foi aplicado.

TE connectivity (2024) explica que um sensor de desgaste de tubulação é um dispositivo projetado para monitorar e detectar a degradação das paredes internas e externas de tubulações, geralmente em ambientes industriais, esses sensores são essenciais para manter a integridade das tubulações, especialmente em setores como mineração, onde a corrosão, abrasão e outros tipos de desgaste podem comprometer a segurança e a eficiência operacional.

2.2.2 Inspeção Visual

- Inspeção Visual: Para Xenos (1998), esse tipo de inspeção sensitiva é particularmente eficaz quando executado pelos operadores que passam todo tempo próximo do equipamento.

Segundo Kardec e Nascif (2009), inspeção visual é uma técnica de avaliação que envolve o exame direto de componentes, estruturas ou equipamentos com o objetivo de

identificar defeitos, irregularidades ou sinais de desgaste visíveis a olho nu ou com o auxílio de instrumentos de aumento, como lupas ou câmeras. Este método é amplamente utilizado em várias indústrias. A figura 4 demonstra alguns tipos de falhas em mangotes identificadas por inspeção visual.

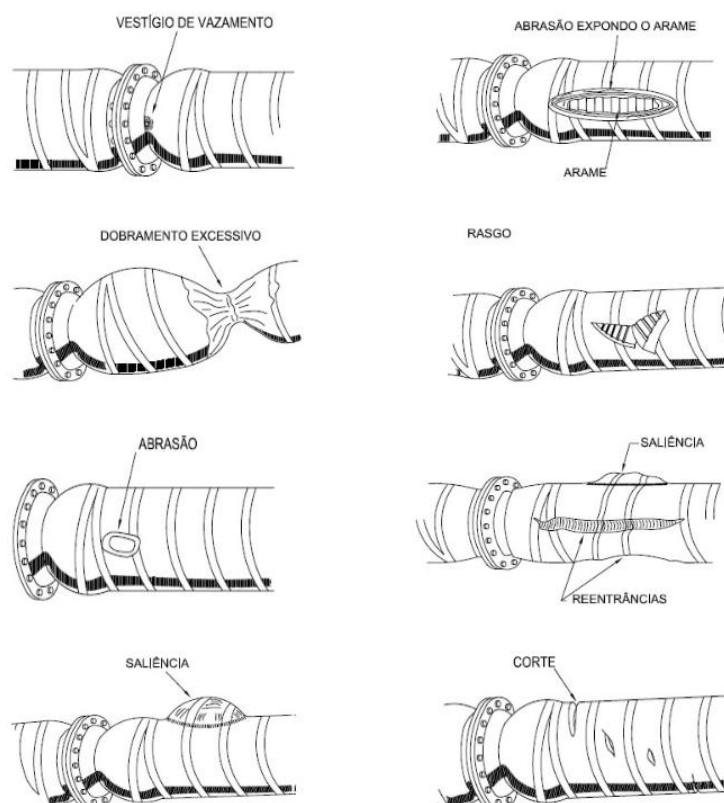


Figura 4 - Falha identificadas em Inspeção Visual
Fonte: Continental maquinas (2020).

Observa-se que a figura 4 apresenta diferentes modos de falha que podem ocorrer em mangotes industriais, como abrasão, rasgos, cortes, saliências, reentrâncias, dobramento excessivo e até exposição do arame estrutural. Xenos (1998) destaca que inspeções visuais auxiliam na compreensão do comportamento dos mangotes em operação e reforçam a importância da inspeção periódica, permitindo a identificação precoce de danos que comprometem a integridade, a segurança e a vida útil do sistema de transporte.

2.2.3 Ultrassom

Para Andreucci (2016), O ultrassom é uma técnica que utiliza ondas sonoras de alta frequência para inspecionar materiais. Quando aplicado em tubulações, um transdutor ultrassônico emite ondas sonoras que viajam através do material do tubo e refletem de volta ao atingir interfaces como camadas de reforço, bolhas de ar, ou outras discontinuidades. A análise dessas ondas refletidas permite determinar a espessura do material, detectar bolhas, de laminações, danos por impacto, e desgaste.

Segundo Olympus (2020), mangotes são flexíveis e podem ter paredes feitas de múltiplas camadas de materiais diferentes, como borracha e reforços metálicos, o que pode dificultar a passagem das ondas ultrassônicas. A flexibilidade e a heterogeneidade dos materiais podem absorver ou dispersar as ondas, reduzindo a eficácia da inspeção.

Andreucci (2016), explica que para o ultrassom funcione de forma eficaz, é necessário um bom acoplamento acústico entre o transdutor e o tubo. Normalmente é conseguido usando um gel de acoplamento, mas no caso de tubulações, caso estejam instalados em locais de difícil acesso ou em movimento, o acoplamento pode ser mais complicado. A figura 5 demonstra como é realizado a medição por ultrassom.



Figura 5 - Medição por Ultrassom
Fonte: UTMAX (2025).

É possível observar pela figura 5 o técnico realizando uma inspeção por ultrassom em tubos metálicos, amplamente empregado em ensaios não destrutivos, um transdutor ultrassônico é acoplado à superfície do tubo para transmitir ondas sonoras de alta frequência,

permitindo a visualização, em tempo real, de possíveis falhas internas no monitor do equipamento.

2.2.4 PIG

Para Mazzini (2009), Pigs são equipamentos que, inseridos dentro do duto, viajam por toda a linha de tubulação, impulsionados pela própria vazão do fluido. A figura 6 demonstra o funcionamento de um Pig.

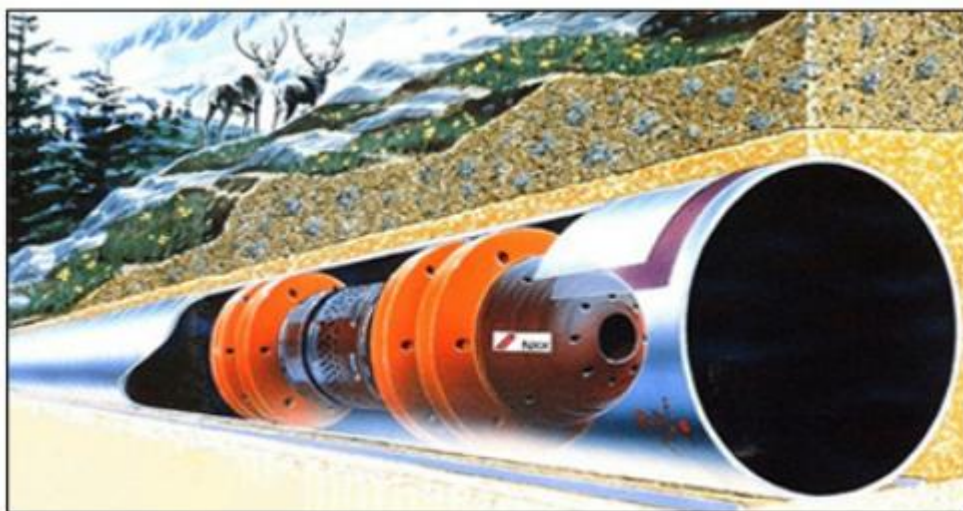


Figura 6 - Funcionamento do PIG
Fonte: SOUZA (2003).

É possível observar pela figura 6 um pig circulando dentro de um duto enterrado, esses dispositivos são amplamente utilizados na indústria de petróleo, gás e minerodutos para inspeção, limpeza e monitoramento da integridade do tubo.

Segundo Cordell e Vanzart (2003), os “pigs” que realizam função de limpeza, separação de produtos, ou remoção de água são denominados de Utility Pigs. Já os que fornecem informações sobre a linha como falhas na tubulação são denominados “pigs” instrumentados, ou “smart pigs”. Estes últimos, informam com boa precisão a localização e extensão de defeitos existentes no duto.

Para Souza (2003) a inspeção com pig instrumentado de corrosão tem dois objetivos que são a detecção e o dimensionamento das falhas. A incerteza do defeito é diretamente proporcional ao custo de inspeção.

Curvelo (2016) ressalta que os PIGs de inspeção, também conhecidos como *smart PIGs*, são equipados com sensores e instrumentos avançados que permitem avaliar a integridade estrutural da tubulação. Eles podem detectar corrosão interna e externa, trincas, deformações, amassados e outras anomalias que podem comprometer a segurança do duto.

Sarti *et al* (2011) Medição de Espessura: Alguns PIGs utilizam técnicas como ultrassom ou correntes de Foucault para medir a espessura das paredes do tubo e identificar áreas onde o metal pode estar desgastado ou corroído tendo como exemplo o pig mostrado na figura 7



Figura 7 - PIG Ultra Sônico
Fonte: SOUZA (2003).

Observa-se pela figura 7 que esse tipo de PIG possuem coroas, onde os sensores ultrassônicos ficam distribuídos ao longo do corpo do seu corpo. Lima (2012) explica que essa ferramenta utiliza de sensores acústicos que medem a diferença do tempo de propagação dos ecos refletidos nas superfícies das paredes interna e externa do duto.

Curvelo (2016) explica que os PIGs de verificação de geometria, ou caliper PIGs, são usados para identificar mudanças na forma ou na dimensão interna do duto, como amassados, ovalizações ou outros defeitos geométricos que possam ocorrer durante a instalação ou operação. Isso é importante para evitar pontos de falha potencial e garantir que o duto permaneça dentro das especificações de design. Figura 8 mostras como é um Caliper Pig



Figura 8 - Caliper PIG
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A figura 8 mostra que esse PIG possui no seu corpo uma grande quantidade de sensores, em diferentes ângulos. Sarti *et al* (2011) ressalta também que o pig geométrico é essencial tanto no comissionamento quanto nas inspeções periódicas, garantindo que o duto opere dentro dos limites estruturais recomendados.

Para Curvelo (2016) esse tipo de PIG além de ter a função de limpar a linha também consegue detectar deformações como amassamentos nas tubulações decorrentes do assentamento ou intervenções.



Figura 9 - Pig de limpeza com placa calibradora
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Na Figura 9 é possível reparar que placa calibradora, que consiste em um disco de diâmetro menor que o do duto, é montada no pig antes do seu lançamento, e seu funcionamento consiste em que caso a placa contenha amassamentos na retirada do pig, temos a evidência de obstruções geométricas no duto.

Segundo Curvelo (2016), o PIG inercial registra todo o seu percurso com grande precisão, o que permite que depois seja feito o traçado espacial do duto. Mudanças no traçado original da linha de tubulação são detectadas por esse tipo de Pig, o que é de grande importância visto determinadas alterações podem submeter as tubulações a uma grande concentração de tensões. A figura 10 mostra a como é um Pig Inercial



Figura 10 - Pig Inercial
Fonte: CURVELO (2016).

Podemos perceber pela figura 10 que o corpo do Pig inercial é composto por diversos sensores como acelerômetros, giroscópios, magnetômetros, odométrica e gps com isso ele é capaz de registrar o alinhamento, curvaturas e deslocamentos de um duto, permitindo mapear de maneira precisa sua geometria real e identificar deformações ao longo do traçado.

2.2.5 TERMOGRAFIA

Conforme a ABNT através da norma 15424 (2006 p.4), a definição de termografia é:

A Técnica de sensoriamento remoto que possibilita a medição de temperaturas e a formação de imagens térmicas (chamadas termogramas) de um componente, equipamento ou processo, a partir da radiação infravermelha, naturalmente emitida pelos corpos, em função de sua temperatura.

(CERDEIRA *et al.*, 2011) descrevem a termografia infravermelha como um método de análise que utiliza a captação da radiação térmica emitida pelos materiais para determinar temperaturas e identificar padrões de distribuição de calor. Essa técnica é aplicada em sistemas nos quais alterações na temperatura superficial podem revelar condições anormais de operação ou indícios de falhas. A figura 11 mostra como é aplicado esse método em dutos.



Figura 11 – Termografia
Fonte: SEMAPI (2025).

É possível observar pela figura 11 como é utilizado a termografia na linha de tubulação, sendo a imagem à esquerda da figura mostra um operador com o termógrafo, sendo este o instrumento que capta a radiação infravermelha e a transforma em uma informação térmica, como mostra a imagem do lado direito. (CARDOSO; FERNANDES; VALENTIM; 2015) explicam que a termografia é uma técnica de manutenção preditiva que permite visualizar e quantificar o calor proveniente da superfície dos materiais sem a necessidade de contato direto. Essa capacidade decorre da detecção e análise da radiação infravermelha emitida pelos objetos, possibilitando a avaliação de seu comportamento térmico e a identificação de possíveis anomalias operacionais.

DIMAS *et al* (2023) ressaltam que apesar da vantagem que a termografia tem por ser uma técnica de ensaios não destrutivos na linha de tubulação a situação em que não é possível aplicá-la como áreas da planta industrial, em que o acesso às tubulações para realizar medições é restrito, limitando a abrangência da análise termográfica. Tubulações localizadas em áreas de difícil acesso, como subterrâneas ou em alturas elevadas e O tipo e a qualidade do revestimento das tubulações podem interferir na precisão das medições termográficas, dificultando a detecção de anomalias térmicas.

2.3 FMEA

Kardec e Nascif (2009) descreve O FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) é uma ferramenta essencial usada para identificar, analisar e priorizar potenciais falhas em um sistema ou processo, visando a prevenção de problemas antes que ocorram.

De acordo com Xenos (1998), o FMEA envolve a identificação dos modos de falha, suas causas e os efeitos que essas falhas poderiam ter sobre o desempenho de um produto ou processo, permitindo que equipes de desenvolvimento e engenharia mitiguem riscos de forma proativa.

Conforme Siqueira (2012), o FMEA é amplamente utilizado em indústrias, especialmente nas áreas de manufatura e engenharia de produtos, por permitir a identificação precoce de problemas, além de priorizar as falhas que têm maior probabilidade de ocorrer e que podem causar impactos mais graves, o autor também aborda sobre o processo envolve a classificação das falhas por meio de três fatores principais: severidade (o impacto da falha), ocorrência (a probabilidade de que a falha ocorra), e detecção (a capacidade de identificar a falha antes que ela cause problemas). A combinação desses fatores gera o índice de prioridade de risco (RPN), que orienta as ações de melhoria.

Para Kardec e Nascif (2009) Os principais conceitos para a Analise são:

- Causa: A razão para qual um elemento particular resultou na falha;
- Efeito: Uma consequência Adversa para o consumidor ou usuário;
- Modos de Falhas: Categorias de falhas que são normalmente descritas;

- Frequência: A probabilidade de ocorrência da falha;
- Gravidade da falha: indica como a falha afeta o usuário e o cliente;
- Detectabilidade: Indica o nível de dificuldade para a detecção da falha
- Índice de risco ou número de prioridade de risco: É o resultado do produto da frequência pela gravidade da falha pela detectabilidade, este índice da prioridade ao risco da falha. A figura 12 demonstra como é aplicado o FMEA

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Etapa do processo	Modo de falha	Efeito da Falha	Severidade (S)	Causas da falha	Probabilidade de ocorrência (O)	Controles de processo	Deteção (D)	Número de Prioridade de Risco (NPR)
Teste do carro pronto	O carro não freia	Acidente	10	O sistema de freios não estava funcionando	7	Barulho ao frear	2	140
				As rodas deslizaram	2	Indicador de desgaste de rodagem / TWI (Tread Wear Indicator)	3	60
	O carro não liga	O consumidor ficaria impossibilitado de chegar ao seu destino	7	Problema na bateria	5	Luzes do painel fracas	1	35
				Falta de Combustível	3	Indicada no painel	4	84

Figura 12 - Gráfico FMEA
Fonte: Borsalli (2021)

É possível observar pela figura 12 um exemplo simples do FMEA sendo aplicado para o teste de um carro pronto onde foi considerado duas potenciais falhas, o carro não freia e o carro não liga, cada linha descreve um possível modo de falha, o efeito causado, sua severidade, as causas associadas, a probabilidade de ocorrência, os controles atualmente existentes e a capacidade de detecção. A partir desses fatores, é calculado o Número de Prioridade de Risco (NPR), que orienta a priorização de ações corretivas.

Conforme definido por Xenos (1998) o principal objetivo dessa ferramenta é a elaboração de um plano de manutenção que eleve a qualidade e produtividade das empresas. Dessa forma, o FMEA ajuda a reduzir riscos, custos associados a falhas e garantir um melhor desempenho do produto ou processo ao longo de seu ciclo de vida.

Por fim para Kardec e Nascif (2009, p.130) “A FMEA focaliza falhas potenciais e suas causas. Desse modo as ações necessárias podem ser tomadas com vista a evitar problemas futuros e prejuízos antes que eles aconteçam”.

2.4 MINERODUTO

Para Silva M, Santos M, Santos E, apud Fustus (2018) Os minerodutos são dutos que realizam o transporte de minério, geralmente por longas distâncias, até o processamento final do material. São usados com o objetivo de transportar minério com o menor impacto ambiental se comparado com os meios mais usuais de transporte.

Segundo Chaves (2012), o transporte de minérios por meio de tubulações especialmente minerodutos, é uma alternativa eficiente e econômica para o deslocamento de grandes volumes de polpa de minério. Destacando que esse método é particularmente vantajoso em regiões onde o acesso é limitado ou onde outras formas de transporte seriam inviáveis ou mais caras. Ainda segundo o autor a escolha correta dos materiais e do projeto do sistema de tubulação é essencial para garantir a durabilidade e a eficiência operacional do mineroduto.

De acordo com Filho (2021, pg.21):

Uma polpa pode ser definida como o minério de ferro de tamanho máximo nominal <1 mm que é misturado com água, o qual é frequentemente usado como uma forma conveniente para transportar o produto por meio de bombeamento e por gravidade em canaletas ou calhas ou por longas distâncias em tubulações.

Para Abulnaga (2002), a mineração vem utilizando a metodologia de escoamento de polpa vem sendo utilizada a anos e o transporte da mesma por minerodutos de longa distância se deu início em meados de 1950 e desde então vem evoluindo em todos os continentes

Junior (2021) explica que no Brasil, os minerodutos são utilizados amplamente para o transporte de minérios, especialmente o minério de ferro, das minas até os portos. Essa infraestrutura é vantajosa devido à sua capacidade de movimentar grandes volumes de material de forma contínua e eficiente, minimizando custos logísticos e impactos ambientais em comparação com o transporte rodoviário ou ferroviário. Além disso, o país possui alguns dos maiores minerodutos do mundo, como o Minas-Rio, que se destaca pela sua extensão e capacidade de transporte. A figura 10 demonstra os operadores de minerodutos do Brasil:

Operador	Minério	Comprimento [Km]	Diâmetros nominais [Pol.]	Início de operação
Hydro	Bauxita	244	24	2006
Anglo	Ferro	522	24/26	2014
Samarco linha #1	Ferro	398	18/20/22	1977
Samarco linha #2	Ferro	400	14/16	2008
Samarco linha #3	Ferro	400	20/22	2014
Mosaic (Fosfertil)	Fosfato	120	9	1978
Imerys RCC	Caulim	159	14	2002
Imerys PPSA	Caulim	180	10	1996
Dow Química	Sal-Gema	51	14	1977

Figura 13 - Operadores de Mineroduto no Brasil
Fonte: Torres (2021).

É possível visualizar na figura 13 os principais minerodutos brasileiros, esse conjunto de dados evidencia a diversidade e a evolução das infraestruturas de transporte mineral no país, abrangendo desde dutos mais extensos, como o da Anglo, com 522 km para transporte de minério de ferro, até sistemas mais curtos, como o da Dow Química.

2.5 TIPOS DE TUBULAÇÕES DA LINHA

2.5.1 Tubulação Mangote

Segundo Telles (2001), o emprego de tubulações de borracha tem crescido muito nos últimos anos, principalmente pois a borracha é um substituto para aços, aços inoxidáveis e metais não ferrosos. O aumento constante dos preços desses metais e o aperfeiçoamento contínuo da borracha tende a tornar-se maior e ainda a expansão do emprego desses últimos a figura 14 mostra como é construído um tubo mangote.

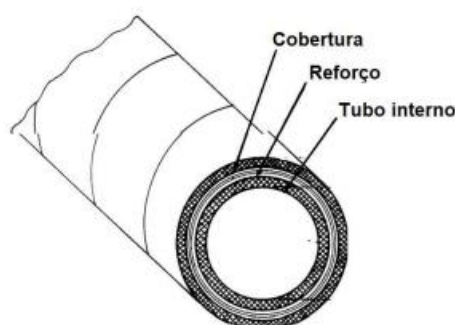


Figura 14 - Construção da tubulação Mangote
Fonte: Santini (2023).

A figura 14 demonstra como o mangote é constituído e de acordo com Santini (2023), a estrutura de uma tubulação mangote se define por:

- **Camada Interna (Tubo Interno):** A camada interna é feita de materiais compatíveis com o fluido transportado. Para líquidos corrosivos, como ácidos, são usados materiais como borracha nitrílica, borracha EPDM, ou outros polímeros resistentes a produtos químicos. Para aplicações alimentícias, são utilizados materiais atóxicos e aprovados para contato com alimentos. Esta camada serve para resistir à abrasão, corrosão, e efeitos químicos do fluido transportado, garantindo a integridade do sistema.

- **Camadas de Reforço:** São geralmente feitas de fibras têxteis (como poliéster ou nylon), fios de aço, ou uma combinação dos dois. O tipo de material de reforço depende da pressão que o mangote deve suportar. As camadas de reforço conferem resistência à pressão interna e externa, impedindo o colapso do mangote sob pressão de vácuo ou pressão positiva elevada. Também aumentam a resistência à torção e flexão.

- **Camada Externa (Capa):** A camada externa é feita de borracha sintética ou termoplástico, resistente ao desgaste, intempéries, ozônio, e raios UV. Protege o mangote contra danos externos, como abrasão, cortes e impactos. Também é responsável pela resistência à intempérie e proteção contra o envelhecimento causado por exposição ao sol e produtos químicos.

2.5.1.1 Processos de Fabricação de uma tubulação mangote

Segundo All hose & valves (2023), O processo de fabricação desse equipamento consiste:

- **Extrusão do Tubo Interno:** A fabricação começa com a extrusão do tubo interno, onde o material é moldado na forma desejada e dimensionado de acordo com as especificações;

- **Aplicação das Camadas de Reforço:** As camadas de reforço são aplicadas ao redor do tubo interno através de enrolamento ou trança, dependendo da especificação técnica. Isso pode incluir várias camadas, dependendo da pressão de operação e da flexibilidade necessária;

- **Cobertura Externa:** A camada externa é adicionada através de um processo de extrusão secundário, cobrindo as camadas de reforço para proporcionar proteção adicional e durabilidade;

- **Vulcanização:** Em mangotes de borracha, o conjunto é então vulcanizado, um processo que usa calor e pressão para curar a borracha, proporcionando maior resistência e elasticidade;
- **Montagem das Conexões:** As conexões finais são anexadas nas extremidades do mangote. O processo pode incluir crimpagem, onde as conexões são pressionadas de forma permanente ao mangote, garantindo uma vedação segura;
- **Testes de Qualidade:** O mangote completo é submetido a uma série de testes, incluindo testes de pressão, vácuo, resistência à abrasão, e flexibilidade para garantir que ele atenda às especificações de desempenho. Logo após o teste o mangote está pronto para uso como mostra a figura 15



Figura 15 - Tubulação mangote
Fonte: Pesquisa direta (2024).

A figura 15 mostra um mangote industrial de grande diâmetro que será aplicado na linha de tubulação. De acordo com Nayyar (1999), tubulações mangotes como as da figura 15 são projetadas para ser altamente flexível e resistente, adequada para transportar uma ampla variedade de fluidos sob diferentes pressões e condições. A escolha dos materiais para o tubo interno, as camadas de reforço, e a cobertura externa é crucial para garantir a durabilidade e a eficiência operacional do mangote, sendo necessária a consideração de fatores como resistência química, abrasão, e flexibilidade para a aplicação específica.

2.5.2 TUBULAÇÃO REVESTIDAS

A norma DIN 30670 (2012) explica que, tubulações revestidas consistem em tubos metálicos que recebem revestimento interno ou externo podendo ter a finalidade de ser anticorrosivo anti abrasivo ou anti erosivo.

De acordo com Telles (2001, pg.20):

O objetivo geral do emprego dos tubos com algum revestimento interno é sempre aliar as vantagens do baixo custo, boa resistência mecânica, boa soldabilidade e ampla disponibilidade do aço-carbono com as propriedades de resistência à corrosão, à abrasão ou às altas temperaturas do material de revestimento.

De acordo com Chaves (2012), o transporte de polpas minerais através de tubulações exige soluções que resistam à intensa abrasividade das partículas. Nesse contexto, o uso de tubulações revestidas internamente surge como uma alternativa eficaz para prolongar a vida útil do sistema, especialmente em operações contínuas de beneficiamento mineral.

2.5.2.1 Tubulação revestida de borracha

Roman (2011), ressalta que a borracha é amplamente utilizada na indústria devido à sua elasticidade, resistência à abrasão e capacidade de absorver choques e vibrações. Aplicada como revestimento interno em tubulações, ela contribui significativamente para a redução de falhas operacionais causadas por impactos repetitivos de sólidos.

Chaves (2012) detalha que em sistemas de bombeamento de polpas, o desgaste nas paredes internas das tubulações é uma das principais causas de interrupção de processos. O revestimento com materiais como borracha natural ou sintética reduz drasticamente esse desgaste, minimizando os custos com manutenção e substituições.

Para Gent (1992), os tipos de borracha utilizado nas tubulações são definidos conforme o ambiente a qual esses tubos serão utilizados e as propriedades dos materiais que serão transportados, a borracha natural e usada em aplicações com alta abrasão sendo ideal para transporte de polpa de minério, já borracha sintéticas como Neoprene, nitrílica e EPDM, são mais adequadas quando a necessidade de obter resistência química ou térmica. A escolha

do elastômero adequado está diretamente relacionada à natureza do fluido transportado e às condições operacionais da tubulação.

De acordo com Kleemann e Weber (1998), a fabricação de um tubo revestido com borracha deve seguir certas etapas sendo elas a preparação da superfície metálica, a aplicação de borracha crua e o processo de vulcanização, a superfície interna do tubo passa por jateamento abrasivo para garantir a aderência, em seguida e colocado manualmente mantas de borracha e depois os tubos sofrem vulcanização no autoclave, sendo o processo de vulcanização responsável por ativar agentes químicos e cria ligações cruzadas entre as cadeias do elastômero, resultando em um revestimento fortemente aderido, elástico e resistente à abrasão e à ação química. A figura 16 mostra um tubo revestido de borracha



Figura 16 - Tubo de aço revestido de Borracha
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A figura 16 mostra que o corpo desse tubo é em aço, garantindo resistência estrutural e capacidade para operar sob altas pressões, enquanto o revestimento interno de borracha tem a função de reduzir o desgaste, proteger o aço contra abrasão e corrosão e aumentar a vida útil do equipamento.

2.5.2.2 Tubulação revestida de borracha com cerâmica

Segundo a Associação brasileira de cerâmica (ABCERAM) cerâmica é definida por todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento em temperaturas elevadas.

Acchar (2018), ressalta que a alumina é uma cerâmica técnica de alta dureza e resistência mecânica, com excelente comportamento térmico e dielétrico, tornando-a amplamente aplicada em setores industriais e de engenharia.

Para Nascimento *apud* Ceramitec (2023) a utilização do revestimento borracha com pastilhas de cerâmica e método recente, mas que vem se mostrando bastante eficaz. Este revestimento tem como característica mesclar tanto propriedades de absorção de impacto da borracha quanto características de resistividade a abrasão da cerâmica, aumentando bastante a vida útil das tubulações.



Figura 17 - Tubo revestido de borracha com cerâmica
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Na figura 17 é possível observar a manta de borracha com cerâmica revestindo o tubo de aço, STAINER *et al* (1996) explicam que a cerâmica utilizada como revestimento tem como principal características alta dureza, estabilidade térmica, boa resistência à corrosão, inerte quimicamente, isolante elétrico, temperaturas de trabalho de até 1200°C.

2.5.3 Conexão de tubulação

Para Telles (2001), existem diversos meios usados para conectar tubos, que não somente são utilizados para conectar tubos, mas também válvulas, acessórios e outros equipamentos como tanques e bombas. A figura 18 mostra alguns desses meios de ligação que compõem as tubulações chamados flanges parafusados.

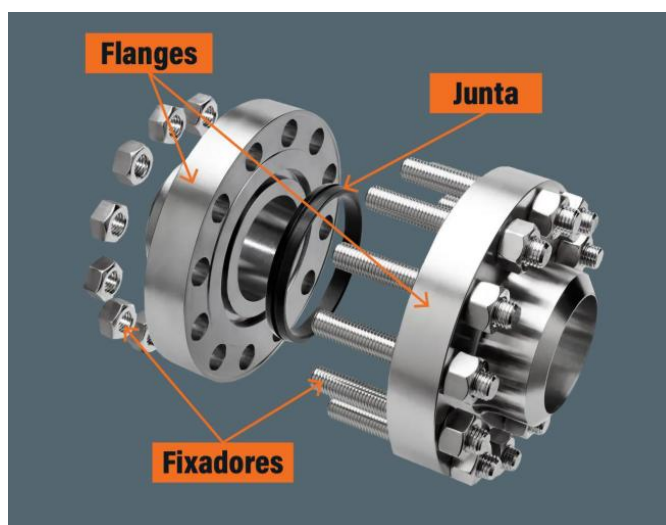


Figura 18 - Flanges juntas e fixadores
Fonte: Hytorc Rio (2025).

A figura 18 mostra uma ligação flangeada que é composta de dois flanges, barras roscadas, estojos com porcas e arruelas e uma junta de vedação. Para FERRAZ (2009) ligações flangeadas se empregam em dois casos específicos, ligar os tubos com outros equipamentos como válvulas e bombas compressoras, e também em determinados pontos, no correr da tubulação, onde seja necessário facilidade de desmontagem.

Segundo Telles (2001) a soldagem é a melhor maneira de unir peças de tubulação. Ela oferece resistência mecânica equivalente ao tubo, ótima estanqueidade, boa aparência e facilita a aplicação de isolamento térmico e pintura. No entanto, os efeitos térmicos precisam de ser corrigidos. Isso é especialmente importante para ligas de cromo e molibdênio. Também podem ser necessários tratamentos térmicos para aliviar de tensões.

A norma ANSI/ASME B31.3 ressalta que a utilização de uniões soldadas em qualquer material metálico para o qual se possa especificar um procedimento de soldagem aceitável,

sem restrições quanto à pressão ou temperatura do fluido, a figura 19 mostra uma união soldada de tubulações.



Figura 19 - Ligação soldada
Fonte: Realum (2025).

A figura 19 mostra uma curva de tubulação metálica (cotovelo) com juntas soldadas circunferenciais, Pereira (2011) destaca que apesar dos benefícios das justas soldadas existem algumas desvantagens associadas a este tipo de ligação, como a dificuldade na desmontagem dos dutos uma vez que o tubo deverá ser cortado, e a necessidade de mão-de-obra especializada para a soldagem da tubulação.

3 METODOLOGIA

3.1 Tipos de pesquisa

Para Gil (2002, p.17), “pode-se definir pesquisa como o procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos.”

Creswell (2021) aborda que a pesquisa qualitativa é uma abordagem metodológica que visa explorar e compreender os significados atribuídos pelas pessoas a fenômenos sociais ou humanos. essa forma de pesquisa busca investigar o fenômeno em seu ambiente natural, permitindo que o pesquisador capture a complexidade das experiências, interações e percepções.

Gil (2002) ressalta que enquanto a pesquisa quantitativa busca quantificar dados e estabelecer padrões por meio de medições numéricas e análises estatísticas, a pesquisa qualitativa se concentra em descrever e interpretar fenômenos, buscando compreender significados e comportamentos em seu contexto natural.

Segundo Macedo (1994, p. 13), a pesquisa bibliográfica: “trata-se do primeiro passo em qualquer tipo de pesquisa científica, com o fim de revisar a literatura existente e não redundar o tema de estudo ou experimentação.”

Conforme Lakatos e Marconi (2021), é um tipo de investigação que utiliza documentos, como fonte primária de dados, para a análise de um fenômeno ou problema. Ela envolve a coleta, análise e interpretação de informações provenientes de documentos escritos ou não escritos.

Ainda segundo Gil (2008), a pesquisa documental diferencia-se da pesquisa bibliográfica por focar em materiais menos tratados ou analisados academicamente, como documentos internos de instituições, arquivos governamentais ou registros históricos. Esse tipo de pesquisa é útil para obter uma visão detalhada e contextualizada sobre temas específicos, permitindo que o pesquisador reconstrua fatos, avalie práticas ou descubra novos elementos a partir da análise de documentos.

Sátyro e D’Albuquerque (2020) afirmam que o estudo de caso é uma abordagem metodológica utilizada para investigar de forma profunda e detalhada um fenômeno específico, geralmente dentro de seu contexto real.

Para GIL (2008) o estudo de caso busca examinar uma unidade (que pode ser uma organização, uma comunidade, um indivíduo ou um evento) com o objetivo de entender suas características, dinâmicas e complexidades. Essa metodologia é especialmente útil quando se deseja obter uma compreensão ampla e contextualizada de fenômenos complexos e quando os limites entre o fenômeno e o contexto não estão claramente definidos.

Este estudo tem como objetivo analisar qualitativamente a aplicação de procedimentos de manutenção, e Análise e Modo de Efeito de Falhas (FMEA) adotados por uma empresa e como podem influenciar no resultado de produção. O trabalho será um estudo de caso, pois usará como fontes livros e artigos acadêmicos, além de documentos e padrões usados e fornecidos pelas empresas estudadas do projeto.

3.2 Matérias e métodos

A metodologia geral deste trabalho é apresentada na Figura 20.

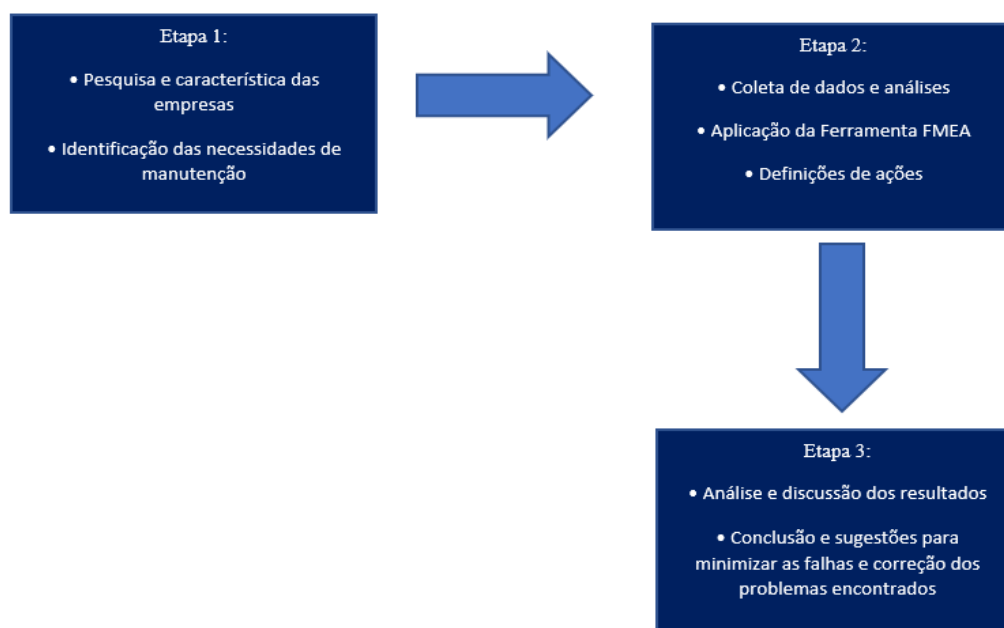


Figura 20 - Fluxograma da metodologia de trabalho
Fonte: Pesquisa direta (2025)

O fluxograma apresentado pela Figura 20 descreve as principais etapas definidas para a realização deste projeto. A etapa 1 deste trabalho é a compreensão do contexto da pesquisa

onde será abordado as realidades das empresas deste estudo de caso e a Identificação da necessidade de manutenção da linha de tubulação que será estudada.

A etapa 2 consiste na coleta de dados de manutenção feitos por técnicos especialista sendo estes dados essenciais para elaboração dos FMEA também foi consultado documentações técnicas dos dutos na operação, bem como de procedimentos técnicos internos da companhia, a fim de identificar vulnerabilidades que possam trazer menor eficiência para as atividades e com isso foi definido as ações necessárias para mitigar as falhas na operação.

Por fim, é realizado uma análise qualitativa das contribuições da aplicação da ferramenta FMEA na linha de tubulação e sugestões de métodos de manutenção e prevenção para evitar falhas na operação.

3.3 Variáveis e indicadores

De acordo com Creswell (2021), as variáveis são características ou atributos que podem assumir diferentes valores e são essenciais para a formulação de hipóteses e teorias em pesquisas comportamentais, diferenciando-se em independentes, dependentes e controladas.

Por outro lado, Kaplan e Norton (1996) destacam que os indicadores são métricos utilizadas para mensurar o desempenho organizacional, traduzindo variáveis estratégicas em resultados quantificáveis

O uso de variáveis e indicadores em um trabalho de pesquisa é essencial para garantir precisão, mensurabilidade e uma análise rigorosa dos fenômenos investigados. Neste projeto foram levantados alguns pontos de grande relevância para a pesquisa conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1- Variáveis e indicadores da pesquisa

Variáveis	Indicadores
Tubulação	Revestimento Interno Durabilidade Tipos de falhas
Ferramenta	FMEA

Fonte: Pesquisa direta (2024)

3.4 Instrumento de coleta de dados

A coleta de dados para a pesquisa foi realizada por meio de dados, relatórios fornecidos pelas empresas estudadas, de maneira que possibilitou o acompanhamento de todos os processos além de artigos livros acadêmicos e reportagens referentes ao tema da pesquisa.

3.5 Tubulação de dados

Para tabulação dos dados serão utilizados os softwares: Microsoft Word na qual todos as informações relevantes para o estudo foram inclusas nesse software e o Microsoft Excel que foi utilizado para execução de cálculos e elaboração de gráficos e tabelas e a ERP TOTVS, onde foi coletado dados de todos os materiais para produção da linha de tubulação.

3.6 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo apresentou a metodologia aplicada para implementação de manutenção estratégica, métodos de manutenção preditiva, e Análise e Modo de Efeito de Falhas (FMEA) definindo as variáveis e indicadores utilizados. No capítulo seguinte será explicado passo a passo como se iniciou o processo, a aplicação da ferramenta FMEA e os resultados obtidos pela mesma.

4 METODOLOGIA

4.1 Empresa em estudo

A empresa em estudo está situada na região de Minas Gerais na cidade de Itabirito possui mais de 50 anos de atuação no mercado acumulou amplo know-how na fabricação de artefatos de borracha, passando por diferentes processos de reinvenção para atender às demandas variadas do setor em que está inserida, incluindo seu ramo principal que é equipamentos e sobressalentes destinados a área da mineração, Atualmente oferece um variado leque de soluções para as diversas necessidades de cada negócio entre elas, fabricação de válvulas, peças e revestimentos em poliuretanos e o fornecimento de resinas especiais anti-desgaste. A empresa em questão está sempre criando e desenvolvendo novos produtos, oferecendo projetos inovadores para atender as demandas dos clientes.

O processo produtivo de como é feito a fabricação de equipamentos pela a empresa é descrito pela figura 21.

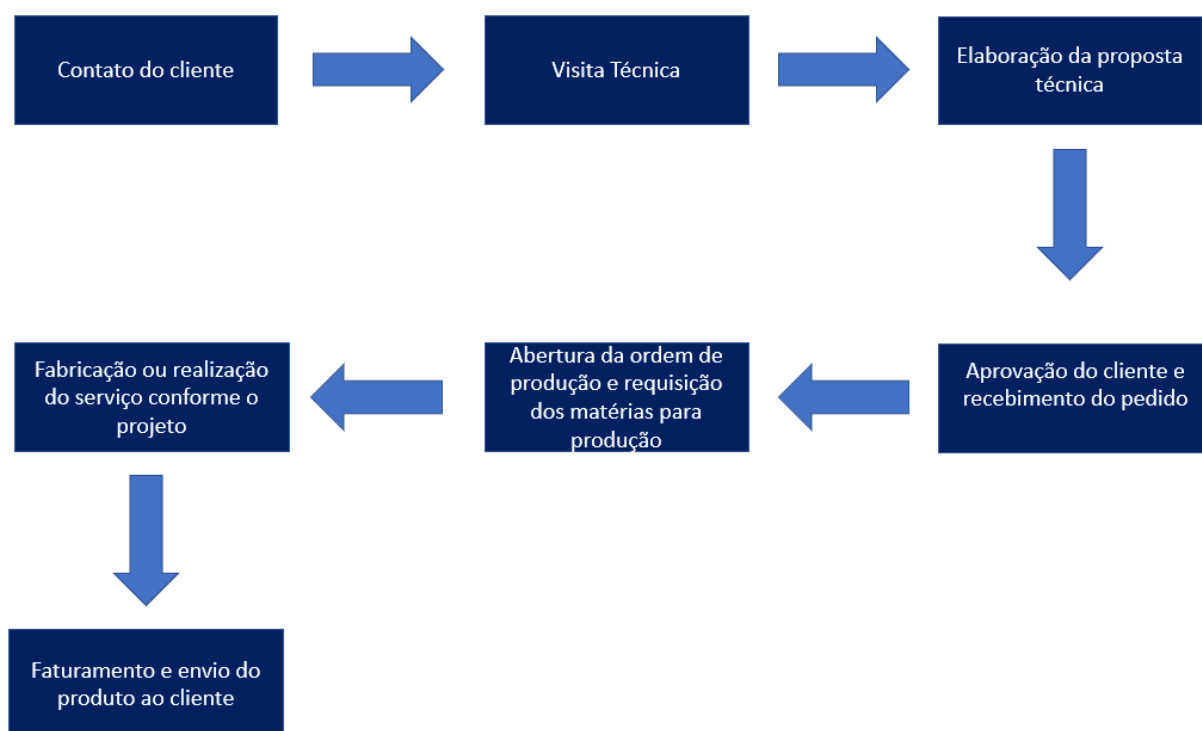


Figura 21 - Fluxograma do processo de produção da empresa em estudo
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Tendo em base esse fluxograma nota-se que todo processo se inicia com o contato do cliente com a empresa onde o mesmo apresenta suas necessidades, após esse contato inicial uma equipe técnica é mandada ao local para levantar informações detalhadas sobre a necessidade do cliente essa etapa garante um diagnóstico preciso, coleta de medidas, verificação de condições e entendimento do problema, com as informações obtidas na visita, o setor responsável elabora uma proposta técnica e comercial, contendo especificações, prazos, materiais, custos e condições de trabalho, após o envio e a aprovação formal por parte do cliente, ocorre a abertura da ordem de produção e a requisição dos materiais necessários. A partir desse ponto, inicia-se a fabricação do produto ou a execução do serviço conforme o projeto previamente definido. Concluída a etapa produtiva, o produto é faturado e enviado ao cliente, encerrando o ciclo do processo.

4.2 Estudo de caso

O estudo de caso teve início quando uma grande empresa reconhecida pela produção de minério de ferro e pelotas, localizada em Minas Gerais na região do quadrilátero ferrífero entrou em contato pedindo para realizar um serviço de reparo em uma linha de tubulação pois a mesma apresentava diversas paradas não programadas.

Após o contato inicial e a solicitação formalizada, a empresa responsável pelos reparos junto da equipe técnica da mineradora deu início a uma inspeção minuciosa da linha quando ocorreu uma parada programada utilizando métodos adequados para avaliar seu estado real de conservação. Durante essa etapa, foram identificados pontos críticos das quais deveriam ser atacados. A inspeção se mostrou essencial para o diagnóstico pois destacou as condições operacionais da tubulação, permitindo compreender a extensão dos danos e definir quais trechos deveriam ser recuperados ou substituídos.

Após a conclusão da inspeção, os tubos comprometidos foram devidamente removidos e enviados para o setor de reforma especializado da empresa das quais a equipe de engenharia da mesma realizou uma análise minuciosa dos principais pontos de falhas dessa linha de tubulação.

4.3 A linha de tubulação

A linha em questão era composta por tubos revestidos internamente com borracha e por mangotes, componentes amplamente utilizados em sistemas industriais que transportam polpas abrasivas. O revestimento em borracha exerce a função de proteger a estrutura metálica contra desgaste, corrosão e abrasão, enquanto os mangotes garantem flexibilidade e absorção de vibrações ao longo da linha.

A linha de tubulação referente a esse estudo de caso encontrava-se conectada a bombas de polpa, sendo responsável pelo transporte do material bombeado ao longo do sistema. Essa conexão é essencial para o funcionamento do processo, uma vez que a bomba fornece a energia necessária para o escoamento da polpa mineral através dos dutos. Porém devido às elevadas pressões, à abrasividade do material transportado e às vibrações geradas durante a operação, esse trecho da tubulação está sujeito a condições extremas, o que reforça a importância de sua correta inspeção, manutenção e verificação de integridade da linha para garantir a continuidade da operação.

4.4 Inspeção dos tubos

Após o contato inicial uma equipe técnica foi enviada ao local para avaliar a inspeção da linha. Toda a inspeção seguiu conforme as normas da empresa que solicitou o serviço de reparo da tubulação, abaixo segue a tabela 2 explicando todos os procedimentos utilizados nessa inspeção.

Tabela 2- Métodos de Inspeção de tubulação

Oque deve ser inspecionado	Descrição	Inspeção	Frequência
	Validação pelo PIG Geométrico ou PIG Placa Calibradora		
	Inspeção com PIG UT (ultrassom) para detectar variações de espessura devido ao desgaste	Inspeção da variação da espessura transversal do duto	2-5 anos
	Inspeção com PIG Inercial para definir o traçado do duto e compará-lo com o “ <i>As-Built</i> ”, identificando deslocamentos em relação ao posicionamento inicial. É necessária a validação pelo PIG Geométrico ou PIG Placa Calibradora	Inspeção da movimentação do tubo em relação ao traçado original	2-5 anos
Dutos não pigaveis e aéreos	Inspeção da espessura de parede a partir de dispositivo externo por ultrassom e/ou termografia (para tubos com revestimentos internos)	Inspeção da corrosão interna	2-5 anos
	Inspeção visual de rotina de faixa de dutos, o operador deve avaliar os segmentos das faixas de dutos de acordo com a densidade demográfica da área adjacente e também de acordo com grau de vulnerabilidade dos ambientes atravessados considerando um eventual vazamento dos produtos transportados	Inspeção de vazamentos condições externas dos tubos flanges e juntas	Passagem permanente de inspetor pelo percurso

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Seguindo as normas da tabela 2 utilizando todos os métodos de inspeção da mesma foi identificado quais tubos da linha tinham que ser substituídos e reparados para dar continuidade a operação.

Após a inspeção e retiradas dos tubos que apresentavam falhas foi encaminhado a empresa que irá prestar o serviço de reparo dessas tubulações.

4.5 Peritagem dos tubos

Após a chegada dos tubos imediatamente foi realizado uma inspeção para verificação das falhas e dos reparos que serão necessários pra eles voltarem a operação

4.5.1 Falha crucial no revestimento

Quando o revestimento começa a falhar, a tubulação fica exposta ao contato direto com a polpa, aumentando significativamente o risco de corrosão e erosão do metal. Isso não apenas reduz a vida útil do mineroduto, como eleva a possibilidade de rompimentos, vazamentos e paradas não programadas.



Figura 22 - Falha de Revestimento
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Na figura 22 é possível perceber sobre dois pontos essenciais a estrutura metálica sofreu com oxidação, mas ainda assim não foi comprometida e o revestimento de borracha se desprendeu

da superfície metálica, deixando áreas expostas e evidenciando perda de aderência entre o revestimento e o tubo. Esse tipo de falha geralmente ocorre devido desgaste abrasivo devido ao material que passa nessa tubulação.

4.5.2 Falha dos flanges

Os flanges são elementos essenciais para a integridade mecânica e vedação do sistema em tubulações industriais. Ao longo do tempo, podem surgir várias falhas, geralmente relacionadas a condições operacionais rigorosas, montagem inadequada ou manutenção insuficiente. A figura 24 mostra que um flange dessa linha da qual a furação foi danificada



Figura 23 - Falha de flanges
Fonte: Pesquisa direta (2025)

A figura 23 mostra que um flange dessa linha apresenta danos nas furações, ocasionados pelo uso de maçarico durante a remoção dos parafusos de fixação, isso ocorreu devido a falhas no torque dos parafusos onde impediu a remoção por meio convencionais e

fazendo com que seja obrigado a corta-los isso acarretou não somente na perda do flange como também em vazamentos pois o a junta de vedação também foi danificada.

O torqueamento correto dos parafusos em flanges deve seguir procedimentos padronizados para garantir a vedação adequada, a integridade mecânica do conjunto e a distribuição uniforme das tensões a figura 24 mostra um exemplo da ordem correta para apertar os parafusos conectar os flanges

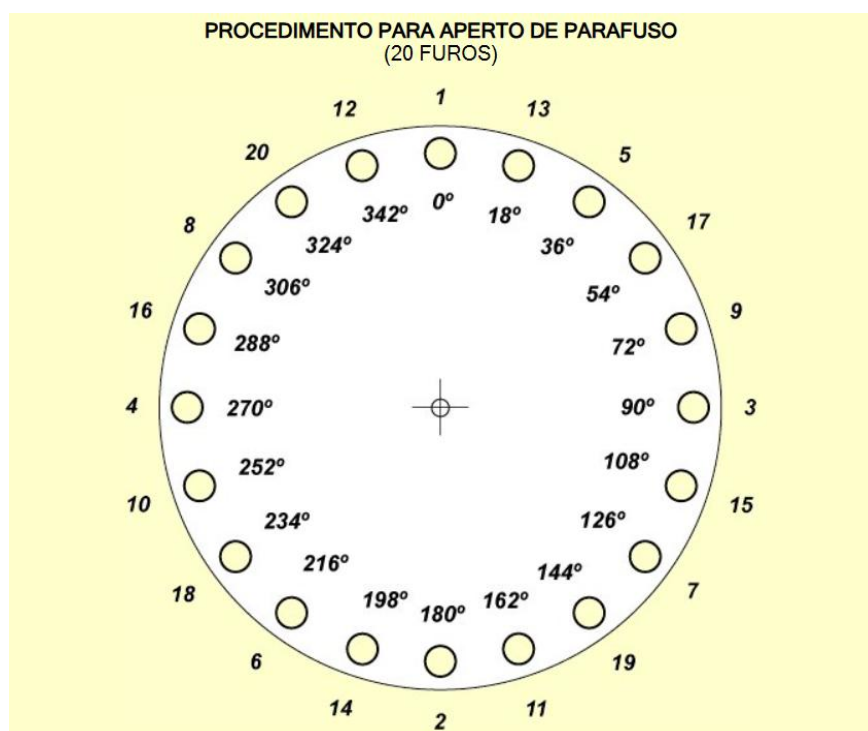


Figura 24 - Método de aperto de parafusos em flanges
Fonte: Val aço (2025)

A imagem demonstra o método adequado para apertar parafusos em um flange com 20 furos, utilizando a sequência cruzada. Esse método visa assegurar uma distribuição equilibrada da carga, prevenindo deformações no flange e compressão irregular da junta de vedação.

O método correto para calcular o torque correto dos parafusos é usando a formula:

$$T = D \times K \times P$$

Sendo T = Torque de aperto (Nm); D = Diâmetro nominal da rosca do fixador (mm); K = Fator de torque, sendo este dependente do revestimento do fixador, do material dos substratos

a serem unidos, entre outros fatores; P = Força de aperto, que corresponde a carga de prova do parafuso, os valores de carga de prova são tabelados por normas e dependem da classe de resistência considerada.

Todos os elementos de fixação dos flanges seguiram a norma NBR 7635 o que significa que os parafusos de cabeça sextavada, as porcas sextavadas e as arruelas para fixação dos flanges devem ser de aço ABNT 1020 ou ASTM A 307, galvanizados a fogo conforme ASTM A 153, Classe C, ou de aço inox AISI A 304 sendo que a quantidade de parafusos depende exclusivamente do número de furos do flange devendo ser utilizado uma porca e duas arruelas.

4.5.3 Estrutura metálica das tubulações danificada

A estrutura metálica das tubulações de aço revestido desempenha um papel crucial na proteção e na confiabilidade dos sistemas industriais, pois é encarregada de aguentar as pressões de funcionamento, as forças mecânicas, as mudanças de temperatura e as cargas externas ao longo de toda a linha. Ademais, essa estrutura serve de suporte para os revestimentos protetores, assegurando resistência ao desgaste, à corrosão e à abrasão, porém quando essa estrutura metálica é comprometida pode gerar vazamentos e paradas não planejadas. A figura 25 mostra um tubo da linha a qual a estrutura metálica foi comprometida



Figura 25 - Falha da estrutura metálica por desgaste
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Nota-se pela figura 25 que fizeram um reparo emergencial pra garantir a continuidade da operação e evitar vazamento porem sua estrutura foi comprometida e será necessário a substituição das mesmas, isso ocorreu, pois, a tubulação sofreu desgaste severo por abrasão a ponto de remover o revestimento deixando o a parte metálica em contato com o material a ser transportado oque logo depois resultou no desgaste da parede do tubo.

Porém a casos onde o revestimento não está comprometido, mas a estrutura metálica externa apresenta trincas que representam um tipo de falha estrutural crítica, pois funcionam como pontos de concentração de tensões e podem evoluir para rupturas completas caso não sejam identificadas e tratadas a tempo.



Figura 26 - Falha da estrutura metálica por trincas
Fonte: Pesquisa direta (2025)

A figura 26 demonstra um caso onde foi feito um reparo de solda localizado na junção das tubulações devido a trincas, isso pode ter ocorrido por diversos fatores como fadiga mecânica, provocada por variações cíclicas de pressão, vibrações e partidas e paradas frequentes do sistema; defeitos de soldagem, como falta de fusão, porosidade ou tensões residuais elevadas. Caso não seja reparado as trincas podem comprometer a integridade da tubulação, podendo resultar em vazamentos, redução da vida útil e riscos à segurança operacional e ambiental.

4.5.4 Desgaste dos mangotes

Os mangotes têm uma função essencial nas redes de tubulação, principalmente em instalações industriais e no setor de mineração, pois oferecem flexibilidade, capacidade de absorver vibrações e acomodação a desalinhamentos que tubos rígidos não conseguem resolver. O seu uso diminui a transferência de cargas mecânicas para a tubulação metálica, flanges e soldas, ajudando a reduzir tensões estruturais e o risco de falhas precoces no sistema. Porém igualmente a tubulação de aço revestidos esse tipo de duto esta suscetível a falhas, na figura 27 é possível visualizar um mangote da linha que terá que ser substituído



Figura 27 - Ruptura em mangotes
Fonte: Pesquisa direta (2025)

Conforme visualizado na figura 27 é possível ver que a um rasgo no mangote isso pode ter ocorrido por um desgaste da camada de abrasão do mesmo, ou uma ruptura geralmente causada por sobre pressões, fadiga mecânica, vibrações excessivas ou instalação inadequada.

4.6 Análise de Falha

Após a realização da peritagem nos tubos, foi possível identificar de forma sistemática as falhas existentes no sistema de tubulações, bem como compreender suas principais causas e os efeitos associados ao processo operacional. A inspeção permitiu a coleta de dados técnicos relevantes, incluindo condições geométricas, estado superficial, integridade das soldas e possíveis indícios de degradação por mecanismos como corrosão, erosão ou fadiga. Essas informações foram fundamentais para a caracterização do estado atual da tubulação e para a definição dos modos de falha mais críticos, servindo como base para uma análise mais aprofundada da confiabilidade do sistema.

Com base nos dados levantados durante a etapa de inspeção, elaborou-se a tabela FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*), ferramenta amplamente utilizada na engenharia para a análise preventiva de falhas.

Tabela 3 - Análise FMEA

Componente	Modo de falha	Efeito da falha	Causa Potencial	Método de Detecção	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detecção (D)	RPN
Tubos de aço revestido	Desgaste do revestimento interno	Exposição do metal e redução da vida útil	Abrasão por polpa de minério	PIG UT/Ultrassom / Termografia	7	6	5	210
	Desgaste da parede do tubo	Rasgos no tubo que pode acarretar vazamentos	falha no revestimento	PIG UT/Ultrassom / Termografia	8	5	5	200
	Vazamento em flanges	Perda de produto e risco ambiental	Falha de vedação ou aperto inadequado dos elementos de fixação	Inspeção visual	5	4	2	40
	Trinca em solda	Possível ruptura do duto	Fadiga mecânica / defeito de soldagem	END / inspeção visual	8	4	4	128
	Deslocamento dos dutos	Tensões excessivas na linha	Movimentação do solo / vibração	PIG inercial / inspeção visual	8	2	5	80
Mangotes	Desgaste da camada interna de abrasão	Redução da espessura e falha prematura	Abrasão por polpa de minério	PIG UT	7	6	6	252
	Ruptura do mangote	Vazamento súbito e parada operacional	Sobre pressão / envelhecimento	Inspeção visual	8	5	6	240
	Vazamento em flanges	Perda de produto e risco ambiental	Falha de vedação ou aperto inadequado dos elementos de fixação	Inspeção visual	5	4	2	40

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Severidade (s)		Ocorrência (o)		Detecção (d)	
Índice	Descrição do Impacto	Índice	Frequência Estimada	Índice	Capacidade de Detecção
1	Nenhum efeito perceptível na operação	1	Falha extremamente rara (quase improvável)	1	Falha sempre detectada imediatamente
2	Efeito muito baixo, sem impacto operacional	2	Muito rara (uma vez a cada vários anos)	2	Altíssima chance de detecção
3	Pequeno impacto, sem necessidade de intervenção	3	Rara (poucos casos registrados)	3	Alta chance de detecção
4	Impacto leve, com correção simples	4	Ocasional (eventual ao longo da vida útil)	4	Boa chance de detecção
5	Impacto moderado, sem parada do sistema	5	Moderada (ocorre algumas vezes)	5	Detecção moderada
6	Impacto significativo, exige manutenção programada	6	Relativamente frequente	6	Baixa chance de detecção
7	Alto impacto, causa redução da eficiência	7	Frequente	7	Difícil de detectar
8	Falha grave, provoca parada parcial do sistema	8	Muito frequente	8	Muito difícil de detectar
9	Falha crítica, parada total e risco operacional	9	Quase sempre ocorre	9	Quase impossível detectar
10	Falha catastrófica, risco à segurança e ao meio ambiente	10	Ocorre continuamente	10	Impossível detectar antes da falha

Figura 28 - Legenda tabela FMEA
 Fonte: Pesquisa direta (2025)

A Tabela 3 mostra como foi aplicada a metodologia FMEA (Análise de Modos de Falha e Efeitos) na análise do sistema de tubulações em foco, que abrange tubos de aço revestido e mangotes usados para transportar polpa de minério. Com a FMEA, conseguimos identificar de forma sistemática os modos de falha possíveis, suas causas e efeitos, além de avaliar os riscos que vêm com a operação. Essa abordagem ajuda a fazer uma análise preventiva, o que contribui para aumentar a confiabilidade operacional, garantir a segurança do processo e minimizar impactos no meio ambiente.

Após a inspeção realizada pela própria mineradora, os componentes do sistema que foram enviados para recuperação foram peritados separadamente, o que nos permitiu reconhecer os principais modos de falha, como a deterioração do revestimento interno, desgaste nas paredes dos tubos, vazamentos nos flanges, fissuras nas soldas, deslocamento dos dutos e até rupturas nos mangotes. Para cada modo de falha, foi descrito os possíveis efeitos sobre o sistema, que vão desde a redução da durabilidade dos componentes até vazamentos de polpa, interrupções nas operações e riscos ambientais. Também foram identificadas as causas prováveis dessas falhas, destacando a abrasão causada pela polpa mineral, falhas no revestimento, fadiga mecânica, imperfeições nas soldas, movimentações do solo, vibrações e o desgaste dos materiais.

Na coluna sobre métodos de detecção da tabela FMEA, foi detalhado os métodos utilizados para reconhecer os modos de falha. Isso incluiu inspeções visuais, testes não destrutivos como ultrassom e termografia, além do uso de PIGs equipados, como os ultrassônicos e inerciais. Essa diversidade de métodos ressalta a importância de aplicar diferentes estratégias de inspeção, já que algumas falhas podem ser internas e difíceis de detectar, exigindo técnicas mais avançadas para a detecção precoce.

A análise de risco foi realizada utilizando os índices de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D). Esses valores foram definidos com base nas características operacionais do sistema e no histórico de falhas. Os resultados da análise mostram que as falhas relacionadas à abrasão interna, tanto nos tubos quanto nos mangotes, tiveram os maiores índices de RPN, o que indica ser uma falha de suma importância no transporte de polpa de minério. Problemas como o desgaste da camada interna, a ruptura dos mangotes e o desgaste do revestimento interno são os que mais precisam de ações corretivas e preventivas. Assim, a aplicação da FMEA se mostrou uma ferramenta necessária para gerenciar os riscos do sistema de tubulações, ajudando na tomada de decisões técnicas e na definição de estratégias de manutenção e inspeção.

4.7 Definição e implementação de ações preventivas e corretivas e melhorias

Com base na análise da tabela FMEA elaborada, foram encaminhadas à empresa solicitante do serviço de reforma algumas medidas corretivas e preventivas a serem tomadas, sendo priorizadas de acordo com o RPN (Número de prioridade de risco) identificados. Essas ações tiveram como objetivo principal mitigar as falhas mais críticas da linha de tubulação, reduzir a probabilidade de recorrência e minimizar os impactos à segurança e à operação.

4.7.1 Revestimento interno

Foi identificado na tabela FMEA que uma das principais falhas é o revestimento interno tanto nos tubos revestidos quanto nos mangotes, tendo isso posto foi realizado uma inspeção detalhada para coletar dados desses revestimentos e propor uma solução adequada para aumentar a vida útil das tubulações.

A camada de abrasão dos mangotes inspecionados que estavam em operação apresentavam as seguintes propriedades:

Tabela 4- Borracha de abrasão dos Mangotes

PROPRIEDADES BORRACHA DE ABRASÃO		
Especificação	UN	Valor
Material	-	Borracha Natural
Dureza	Shore A	45 (± 5)
Resiliência	%	66 ($\pm 10\%$)
Abrasão	mm ³	170mm ³ ($\pm 10\%$)

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Os dados apresentados na tabela indicam que a borracha natural utilizada possui características adequadas para os mangotes. A dureza de 45 Shore A confere flexibilidade e capacidade de absorção de impactos, enquanto a resiliência de 66% demonstra boa recuperação elástica após deformações. O valor de abrasão de 170 mm³ evidencia resistência aceitável ao desgaste na maioria das aplicações da linha de mineração porém em trechos severos como em descargas da bomba de polpa pode apresentar desgaste prematuro.

Assim como os mangotes os revestimentos dos tubos de aço de borracha também foram inspecionados e os seguintes dados foram encontrados:

Tabela 5 - Revestimento dos tubos de aço

PROPRIEDADES DO REVESTIMENTO		
Especificação	UN	Valor
Material	-	Borracha Natural
Dureza	Shore A	50 (± 5)
Resiliência	%	57 ($\pm 10\%$)
Abrasão	mm ³	150mm ³ ($\pm 10\%$)
Tensão de ruptura	Mpa	21,28
Alongamento	%	656,26
Rasgo	N/mm	57,742

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Os dados apresentados na tabela indicam que a borracha natural avaliada possui propriedades mecânicas e tribológicas adequadas para aplicação em tubulações. A dureza de 50 Shore A (± 5) confere uma maior resistência mecânica que a borracha de abrasão dos mangotes. A resiliência de 57% ($\pm 10\%$) indica capacidade satisfatória de recuperação elástica, enquanto o valor de abrasão de 150 mm³ ($\pm 10\%$) demonstra maior resistência ao desgaste que os tubos de borracha, além disso, a tensão de ruptura de 21,28 MPa e o alongamento de 656,26% evidenciam elevada resistência mecânica e grande capacidade de deformação antes da ruptura, características essenciais para suportar variações de pressão e esforços dinâmicos, porém ainda sim conforme a peritagem realizada esses tubos ainda sofriam elevado desgaste abrasivo.

Após o fim da análise foi proposto a empresa tomadora do serviço a substituição dos revestimentos das tubulações de aço e borracha e da camada abrasiva de borracha dos mangotes por manta de borracha e cerâmica, a qual foi prontamente aceito.

O processo de criação da manta de borracha com cerâmica se inicia com a utilização de borracha natural, formada com moléculas de isopreno (metilbut-1,3-dieno), essa borracha não curada possui limitações como baixa resistência térmica e tendência à deformação por isso ela é misturada com cargas (como negro de fumo), agentes de vulcanização, antioxidantes e plastificantes e logo após isso ela é vulcanizada, esse processo promove a formação de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas, resultando em um material com melhores propriedades mecânicas e térmicas, como maior resistência à tração, elevada

elasticidade, boa estabilidade térmica na faixa de 80 a 90 °C, além de flexibilidade em baixas temperaturas (até cerca de -55 °C).

Para criação da manta de borracha com cerâmica é necessário fazer um processo de prensagem, utiliza-se um conjunto de moldes (matriz) especialmente projetados para essa finalidade. Inicialmente, aplica-se na base da matriz uma camada de borracha natural não curada e logo acima dessa camada de borracha e colocado as pastilhas de cerâmicas nas quais as mesmas são posicionadas conforme o arranjo previamente definido em projeto, garantindo a distribuição adequada para resistência ao desgaste. Os espaços existentes entre as cerâmicas também são preenchidos com borracha não curada

Após essa etapa de montagem, a matriz é encaminhada à prensa, onde ocorre simultaneamente a aplicação de pressão e calor. O aquecimento promove a conformação da borracha ao formato da matriz e, ao mesmo tempo, ativa o processo de vulcanização, responsável por conferir ao material suas propriedades mecânicas finais



Figura 29 - Manta de borracha e Cerâmica
Fonte: Pesquisa direta (2025)

A figura 29 mostra as mantas de borracha e cerâmicas prontas para serem utilizadas como revestimento na linha de tubulação. Diferente dos tubos de aço que em sua maioria

pode ser reparado e ter seu revestimento interno substituído nenhum mangote pode ser aproveitado e foram fabricados novos.

O processo para utilizar a manta nos mangotes e nos tubos de aço revestidos são diferentes, enquanto nos tubos de aço é realizada uma preparação para receber a mesma passando uma cola específica para elastômeros em toda a superfície interna do tubo de aço, logo após isso a manta de borracha é pressionada contra esta cola, realizando assim a fixação da mesma. Devido ao comprimento e o diâmetro do tubo foi necessário utilizar um equipamento chamado torpedo, ele é colocado no interior do tubo já revestido e expandido com a ar comprimido fazendo a manta colar na parede interna da tubulação. Após esse processo, esses tubos foram levados à autoclave para serem vulcanizados e depois foram pintados conforme especificação do cliente

Já os mangotes que foram fabricados novamente utilizou essa manta de borracha e cerâmica como substituta da borracha de abrasão, a mesma foi aplicada sobre uma matriz (um molde cilíndrico) que define o diâmetro interno do mangote, a aplicação pode ser feita por calandragem ou extrusão, assim formando a camada interna responsável pela vedação e resistência ao desgaste, após a formação da camada interna, foi inserida as camadas de reforço, normalmente constituídas por lonas têxteis (nylon, poliéster) e arames de aço, que conferem resistência à pressão interna e aos esforços axiais e ao fim de toda a construção foram levados ao autoclave para passarem pelo processo de vulcanização para atingirem a robustez necessária para poder entrar na operação da linha

Através do laboratório da empresa prestadora do serviço de reforma foi possível coletar alguns dados sobre a cerâmica utilizada na manta;

Tabela 6- Propriedades da Cerâmica

PROPRIEDADES DA CERÂMICA DE ALTA ALUMINA	
DUREZA VICKERS @20°C	9 GPa
MÓDULO DE YOUNG	270 GPa
MÓDULO DE CISALHAMENTO	110 GPa
TEOR DE ALUMINA	92%
DENSIDADE	3.62 g/cm ³
RESISTENCIA A COMPRESSÃO @20°C	1,77 GPa
TEMPERATURA DE TRABALHO (MAX)	1250°C

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Os dados coletados são para cerâmica com teor de 92% de alumina, esse alto teor concede a cerâmica alta dureza, como mostrado pelo valor de 9 GPa na escala Vickers, além de excelente resistência mecânica. Os altos valores de módulo de Young (270 GPa) e módulo de cisalhamento (110 GPa) indicam elevada rigidez estrutural, enquanto a resistência à compressão de 1,77 GPa demonstra sua capacidade de suportar grandes esforços sem deformação significativa. A densidade de 3,62 g/cm³ está associada à robustez do material, e a temperatura máxima de trabalho de 1250 °C evidencia sua estabilidade térmica, tornando a cerâmica de alta alumina adequada para ambientes industriais agressivos e de alta abrasividade.

4.7.2 Sensor de Desgaste de revestimento

Tendo como base a tabela FMEA outro ponto crítico são o desgaste da parede da tubulação e rupturas dos mangotes, tendo como uma das principais causas dessas ocorrências as falhas no revestimento então após reunião com a empresa solicitante do serviço além da troca do revestimento interno com maior resistência a desgaste a abrasão foi colocado também um sensor de desgaste de revestimento interno.

Conforme a tabela essas falhas apresentaram alta severidade e baixa detectabilidade por métodos convencionais, como a inspeção visual externa. Em linhas de polpa, o desgaste ocorre de forma progressiva e interna, dificultando sua identificação antes que haja comprometimento estrutural do tubo ou falha catastrófica, como vazamentos ou rompimentos. Dessa forma, a inserção de sensores de desgaste contribui significativamente para aumentar o índice de detecção (D) no FMEA, reduzindo o RPN (Número de Prioridade de Risco), permitindo o monitoramento contínuo da espessura do revestimento, a antecipação de falhas, a programação adequada de manutenções e a redução de riscos operacionais, ambientais e financeiros.

4.7.3 Reparos estruturais dos tubos e flanges

Alguns tubos de aço que sofreram danos estruturais críticos foram irrecuperáveis e não poderiam ser aproveitados novamente tendo que ser fabricados novos dutos, porém alguns ainda se encontravam em condições de reparo portanto seguindo rigorosamente as normas técnicas e os procedimentos internos do cliente, foram realizados os reparos nas estruturas de tubulação de aço, garantindo a conformidade com os requisitos de segurança, qualidade e desempenho operacional.

Toda a tubulação reparada e as novas tubulações que foram fabricadas seguiram conforme a norma ASME B31 sendo que a espessura mínima do tubo deve considerar principalmente a pressão interna de projeto, o diâmetro externo, o material do tubo, a tensão admissível do material, a temperatura de operação, o fator de qualidade da solda e os fatores de segurança aplicáveis. Também foi solicitado uma inspeção na ancoragem da tubulação para garantir que os deslocamentos não ocorram, pois isso pode ser uma falha que acarreta em acúmulo de tensão e trincas nos tubos.

Os flanges que apresentaram danos foram devidamente substituídos em conformidade com os requisitos estabelecidos pelas normas ANSI B 16.5, garantindo a padronização dimensional, a compatibilidade com a classe de pressão e a segurança operacional do sistema. A troca seguiu as especificações normativas aplicáveis quanto ao tipo de flange, material, acabamento das faces e furação, assegurando a correta vedação e o alinhamento da linha de tubulação, figura 30 uma parte do catálogo de um dos fornecedores de flanges conforme a norma que são utilizados pela empresa tomadora do serviço de reparo.

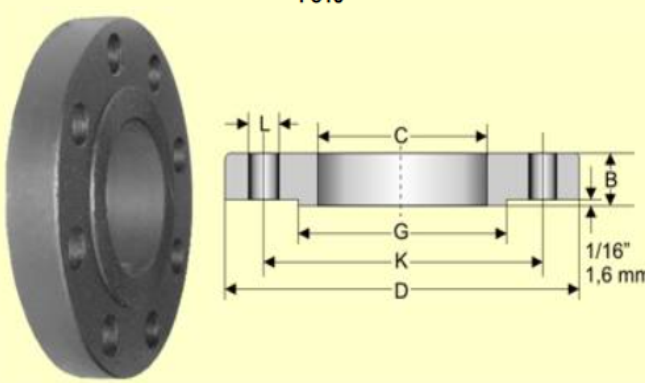
FLANGE SOBREPOSTO PLANO - BASEADO NA NORMA ANSI B 16.5 - 150 LBS								
FIGURA				CARACTERÍSTICAS				
F310 				• Dimensões baseadas na Norma ANSI B 16.5; • Materiais: - Aço Carbono ASTM A 181 Gr. I; - Aço Carbono ASTM A 105; - Outras Ligas Sob Consulta; • Tipos de faceamento: - Com Ressalto (RF - Raised Face); - Plano (FF - Flat Face); - RTJ (Ring Type Joint); - Macho e Fêmea Pequeno; - Macho e Fêmea Grande; - Macho Duplo e Canal Pequeno; - Macho Duplo e Canal Grande; • Tipos de acabamento da face de Junção: - Sobreposto Plano; - Ranhura Standard; - Ranhura Espiral; - Ranhura Tipo 125 RMS; - Ranhura Concêntrica.				
DIMENSÕES E PESO APROXIMADO								
DN (pol.)	Nº de Furos	B (mm)	C (mm)	D (mm)	G (mm)	K (mm)	L (mm)	Peso Aprox. (kg) (1)
1/2"	4	11,1	22,4	88,9	34,9	60,3	15,9	0,5
3/4"	4	12,7	27,7	98,4	42,9	69,8	15,9	0,9
1"	4	14,3	34,5	108,0	50,8	79,4	15,9	0,9
1.1/4"	4	15,9	43,2	117,0	63,5	88,9	15,9	1,4
1.1/2"	4	17,5	49,5	127,0	73,0	98,4	15,9	1,4
2"	4	19,0	62,0	152,0	92,1	121,0	19,0	2,3
2.1/2"	4	22,2	74,7	178,0	104,8	140,0	19,0	3,2
3"	4	23,8	90,7	190,0	127,0	152,0	19,0	3,6
3.1/2"	8	23,8	103,0	216,0	140,0	178,0	19,0	5,0

Figura 30 - Catálogo de Flanges segundo a norma ANSI B16.5
Fonte: Valaço (2025)

O flange da imagem acima é um flange padrão do mercado pois vários fornecedores adotam essa norma para fabricação de flanges, existem casos como os flanges que são conectados as bombas que fogem do padrão para esse tipo de situação foi necessário solicitar um flange com os dimensionais necessários requisitados no projeto ou realizar o corte interno na empresa.

Com a tabela FMEA foi constatado vazamentos em diversos flanges tanto nos tubos de aço quanto nos mangotes, todos os novos flanges que foram fabricados e os aqueles que ainda tinha condição de uso foram inspecionados e atestados que cumpriam a normas do projeto, foi informado a empresa solicitante do serviço sobre os vazamentos e instruído a passar um treinamento de capacitação para montagem de linha de tubulações a fim de diminuir o número de ocorrências.

4.8 Resultados

Após a aplicação da FMEA e a implementação das ações de melhoria definidas a partir da análise dos modos de falha, foi possível observar resultados significativos no desempenho da linha de tubulação. A adoção de um novo revestimento interno de manta de borracha com cerâmica, contribuiu diretamente para o aumento da vida útil dos tubos, reduzindo a taxa de desgaste e a necessidade de intervenções corretivas frequentes. Esse aprimoramento refletiu positivamente na confiabilidade do sistema e na continuidade operacional da linha.

Tabela 7 - Análise de vida útil dos revestimentos

Análise comparativa dos revestimentos	
Tipos	Vida útil (meses)
Borracha	6
Manta de borracha e cerâmica	15

Fonte: Pesquisa direta (2025)

Conforme mostra a tabela 7 o tempo de vida útil do revestimento está 2,5 vezes maior diminuindo consideravelmente a ocorrências de paradas não programadas. Durante esses 15 meses após a reforma da tubulação nenhum sensor de desgaste constatou desgaste total do revestimento interno.

Além disso, foi realizado um treinamento específico para a equipe de montagem de tubulações, com foco no aprimoramento da instalação de flanges, aplicação adequada de torque e alinhamento dos componentes e o posicionamento correto da junta de vedação. Como resultado dessa capacitação, verificou-se uma redução aproximada de 40% nos casos de vazamento em flanges anteriormente relatados, evidenciando a eficácia das ações implementadas. Esses resultados demonstram que a utilização da FMEA, aliada a melhorias técnicas e operacionais, é uma ferramenta fundamental para a redução de falhas e para a melhoria contínua dos processos.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

A aplicação da FMEA na linha de tubulação mostrou-se uma ferramenta essencial para a identificação dos principais modos de falha, suas causas e efeitos associados ao transporte de polpa de minério. Por meio da análise dos índices de severidade, ocorrência e detecção, foi possível priorizar os riscos mais críticos, especialmente aqueles relacionados ao desgaste do revestimento interno, desgaste da parede do tubo, ruptura de e vazamentos em flanges. A partir dessa avaliação, foram definidas ações corretivas e preventivas alinhadas às normas técnicas e às boas práticas industriais, permitindo uma abordagem estruturada e eficiente para a mitigação dos riscos operacionais.

Como resultado da implementação das melhorias propostas, destacam-se o aumento da vida útil da tubulação, devido a adoção de um revestimento interno de borracha com cerâmica pois é mais resistente à abrasão, e a redução significativa de falhas operacionais, comprovada pela diminuição de aproximadamente 40% nos vazamentos em flanges após a realização de treinamentos específicos de montagem. Dessa forma, conclui-se que o uso da FMEA contribuiu de maneira decisiva para a melhoria da confiabilidade, segurança e desempenho da linha de tubulação, além de servir como base para a manutenção contínua e para a tomada de decisões técnicas mais assertivas em sistemas de transporte de polpa na mineração.

5.2 Recomendações

A partir do estudo realizado, recomendam-se os seguintes trabalhos futuros:

- Realização estudo comparativo de diferentes materiais de revestimento interno de tubulações determinado qual é o ideal para determinada aplicação;
- Avaliação da Eficácia da ferramenta FMEA na aplicação de outros equipamentos industriais;
- Integração da FMEA com outras ferramentas de gestão de riscos e confiabilidade para aumentar a eficiência da manutenção;
- Comportamento em fadiga de soldas, flanges e mangotes, considerando as condições reais de operação, como variações de pressão, vibração e deslocamentos térmicos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luís Duarte. **Confiabilidade e Manutenção industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2009
- KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção - Função Estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2009. 384p
- XENOS, Harilaus Georgius D'Philippos. **Gerenciando a manutenção produtiva: o caminho para eliminar falhas nos equipamentos e aumentar a produtividade**. Nova Lima: Falconi, 1998. 302p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5462: **Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994. 37p.
- MOUBRAY, J. **Introdução à manutenção centrada na confiabilidade**. São Paulo: Aladdin, 1996
- SIMARD, S; GAMACHE, M; POULIN, P. Current Practices for Preventive Maintenance and Expectations for Predictive Maintenance in East-Canadian Mines. Mining, v.3, p. 26-53, 2023
- TORRES, A. S. G. **Inertização de Minerodutos para Mitigação de Sua Corrosão Interna**. 2021. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.
- OLIVEIRA, T. **Controle e Manutenção Complexos: Anglo American e Samarco detalham como realizam a manutenção de seus minerodutos, os maiores do Brasil, reduzindo os riscos inerentes a esses sistemas**. IN THE MINE 72 ed 30 abril 2018. Disponível em <https://inthemine.com.br/site/wp-content/uploads/2018/04/transporte.pdf>. Acessado em 23 Jul 2024.
- MONCHY, François. **A Função Manutenção**. São Paulo: Durban, 1987, p. 97
- TELLES, P; **TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS MATERIAIS, PROJETO E MONTAGEM**. 10. Ed São Paulo, Editora LTC 2001
- NAYYAR, M; **PIPING HANDBOOK**. 7. Ed, Europe Editora Mcgraw-hill Education 1999

SILVA, M; SANTOS, M; SANTOS, E; **UTILIZAÇÃO DO MINERODUTO COMO TRANSPORTE DE MINÉRIO ALTERNATIVO**; EDITORA REALIZE; Campina Grande, 2020

SALGADO, O. R.; CHAVES, A. P. **Transporte de Sólidos por Dutos**. Aspectos teóricos e equipamentos envolvidos. Metalurgia-ABM, v. 44, n. 370, 0, p. 904-11, set. 1988

FILHO, H; **A amostragem de polpas de minério de ferro**. ADNORMAS v.3 Ed 152 p.21 mar. 2021

ABULNAGA B. E. **Slurry Systems Handbook**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2002. 629 p.

SOUZA, Valdir Cardoso. **Organização e Gerência da Manutenção – Planejamento, Programação e Controle da Manutenção**. 3ª Ed, revisada. São Paulo: All Print, 2009.

INSPEÇÃO, MANUTENÇÃO E SUBSTITUIÇÃO DE MANGOTES DE OFFLOAD. Disponível em: <https://www.continentalmaquinas.com.br/inspecao-manutencao-e-substituicao-de-mangote-de-offload/> Acessado em 28 Ago 2024

Thickness Testing of Reinforced Rubber Conveyor Belts. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/en/applications/thickness-testing-rubber-conveyor-belt/> Acessado em 27 Ago 2024.

MAZZINI, C. **Comparação de Métodos de Inspeção de Integridade de Dutos: Método PIG e CIS/DCVG** – Curso de engenharia mecânica, Projeto de graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo Vitória 2009

Souza, R.D., “**Avaliação Estrutural de Dutos com Defeitos de Corrosão Reais**”. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 112p, 2003

CALIPER INSPECTION (GEOMETRY PIG) SERVICES Disponível em: <https://www.pipecaregroup.com/caliper-inspection/> Acessado em 29 Ago 2024.

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> Acessado em 05 Set 2024

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15424 – **Ensaio não destrutivo – Termografia – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2006

ALL HOSE & VALVES, **An In-Depth Guide to Industrial Hose Manufacturing Processes** Disponível em: <https://www.allhose.com.au/hose-manufacturing-process/> Acessado em 05 Set 2024.

ANDREUCCI, Ricardo. **Ensaio por Ultrassom**. São Paulo, 2016.

TE CONNECTIVITY, **Sensors for Corrosion Under Insulation Monitoring**. Disponível em: <https://www.te.com/en/industries/oil-gas-marine/applications/sensors-for-oil-and-gas/cui-detection-monitoring-sensors.html>. Acessado em 05 Set 2024

SIQUEIRA, I. P. de. **Manutenção centrada na confiabilidade: manual de implementação**. [S.l.]: Qualitymark, 2012.

BORSALLI, B. **FMEA - O que é e como implementar na sua empresa**. Disponível em: <https://blog.softexpert.com/pt-br/fmea-como-implementar/> Acessado em 15 set 2024

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. [S.l: s.n.], 2002. v. 38

CRESWELL, J. W. **Projeto de Pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2021. 222 p.

MACEDO, N. D. **Iniciação à pesquisa bibliográfica: guia do estudante para a fundamentação do trabalho de pesquisa**. São Paulo, SP: Edições Loyola, 1994.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021. 354 p.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6.ed São Paulo: Atlas 2008

SÁTYRO D. G. N.; D’ALBUQUERQUE W.R; **O que é um Estudo de Caso e quais as suas potencialidades?** Revista Sociedade e Cultura. 2020, v. 23

KAPLAN S. R.; NORTON P. D. **A Estratégia em Ação. Balanced Scorecard** 1.ed Elsevier 1997

Leemis L. **Reliability: probabilistic models and statistical methods**. Nova York: Prentice-Hall; 1995;384.

ROMAN, J. C. O. **A Indústria da Borracha**. 2ª ed. ABTB, 2011

Gent, A. N. (1992). **Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components**. Hanser Publishers.

Kleemann, W. & Weber, K. (1998). **Elastomer Processing – Formulas and Tables**. Hanser Publishers.

ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica. Disponível em: <<https://abceram.org.br/>>. Acesso em: 04 Jun. 2015

ACCHAR, Wilson. **Estrutura e propriedades de materiais cerâmicos**. 1. ed. Natal: EDUFRN, 2018.

REIS, Zaida Cristiane dos; DENARDIN, Carina Desconzi; MILAN, Gabriel Sperandio. **A Implantação de um Planejamento e Controle da Manutenção**: Um estudo de caso desenvolvido em uma empresa do ramo alimentício. In: VI Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 2010, Niterói. Disponível em: <http://www.excelenciaemgestao.org/Portals/2/documents/cneg6/anais/T10_0268_0981.pdf> Acesso em 9 jun 2025

NASCIMENTO, J.F.S **Metodologia kaizen aplicado para realização de melhorias em uma tubulação de aço relacionados a três tipos de revestimentos: poliuretano, borracha e borracha com cerâmica**. (2023) Orientador: Prof. Me. Savio Sade Tayer. Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica.

STACHOWIAK, Gwidon & BATCHELOR, W Andew. **Engineering Tribology** 3. Ed Elsevier, 2011

Cordell, J., & Vanzart, H. (2003). **The Pipeline PIGging Handbook** 3 ed.. Houston: Clarion Technical Publishers And Scientific Surveys Ltd.

Curvelo, E. V. (Abril de 2016). **ESTUDO PARA PROJETO DE MÓDULO DISCRIMINADOR DE UM PIG MFL** . p. 56.

Sarti, C., Araújo, R., & Pinto, S. (2011). **PIG - Tecnologia para tubulações**. Centro Universitário Estadual da Zona Oeste – UEZO, Rio de Janeiro.

JUNIOR, A.P.M **Minerodutos e implicações socioambientais: panorama legal e reflexões para o cenário de Minas Gerais** Revista da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, v. 27, n. 3, p. 344–369, 2021.

R, KEITH MOBLEY (2002) **An introduction to predictive maintenance**. 2 ed. Butterworth-Heinemann

DELREY MINERALS PRODUTOS - Disponível em: < <https://delreyminerals.com/produtos/> > Acessado em 28 nov 2025

LIMA J. F. T. **DESENVOLVIMENTO DO TRATAMENTO DE DADOS NO PROGRAMA REAL TIME SCAN** (2012) Orientador: Antonio Petraglia, Dissertação (Graduação) – Departamento de Engenharia Eletrônica e de Computação, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CERDEIRA, F.; VÁSQUEZ, M. E.; COLLAZO, J.; GRANADA, E. Applicability of infrared thermography to the study of the behavior of stone panels as building envelopes. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 43, p. 1 845-1 851, 2011.

CARDOSO, FERNANDES, VALENTIM; 2015, “**Termografia em instalações elétricas industriais**”, Trabalho de conclusão de curso, IFF, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DIMAS M. W. A.; TORRES P. E. K.; BARBOSA R. H. C. B.; KURITA R. Y. **TÉCNICA DE TERMOGRAFIA APLICADA NA INSPEÇÃO DE TUBULAÇÕES REVESTIDAS** (2023) Orientador: Dacio Germano Xavier Rebouças Junior - Coordenação de curso de Engenharia Mecânica ANIMA educação.

STAINER, D.; FRECCIA, C.; FURLAN, J. B.; ZANETTE, W.; JÚNIR, O. V.; COSTA, F.; MAZZUCO M.; MARTINS, G. M.; **O aperfeiçoamento da moagem da monoporosa. Alta alumina x sílex**. 1996. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587656f77f8c9d6e028b45cb/pdf/ci-1-1-587656f77f8c9d6e028b45cb.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2025.

TUBULAÇÃO FLANGEADA CORZAN CPVC - Disponível em: <https://www.corzan.com/pt-br/sistemas-de-tubulacao/instalacao/flanges> Acesso em 29 nov 2025

FERRAZ F. **MEIOS DE LIGAÇÃO DE TUBOS CONEXÕES DE TUBULAÇÃO VÁLVULAS INDUSTRIAIS** 2009 Disponível em: https://fabioferrazdr.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/08/1_apostilamem.pdf Acesso em 06 dez 2025

HYTOR RIO – Disponível em <https://hytorc-rio.com.br/> Acesso em 13 dez 2025

PROCEDIMENTO PARA APERTO DE PARAFUSO Disponível em:
https://www.valaco.com.br/inf_tecnicas/fl_20furos.html Acesso em 13 dez 2025

ASME – AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS.
ASME B31.3: Process Piping. New York: ASME, 2022.

**PEREIRA M. R. S.; CRIAÇÃO DE NOVO PROCEDIMENTO QUE POSSIBILITE
A RASTREABILIDADE DAS TUBULAÇÕES DE UMA INDÚSTRIA QUÍMICA**
(2011) Orientador Prof Dr. Guilherme Eugênio Filippo Fernandes Filho; Universidade
Estadual Paulista Graduação Engenharia Mecânica