

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

ISABELA DE SOUZA HONORIO

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL APÓS DESGASTE DE
DUTOS DE AÇO API 5L X52 UTILIZADOS PARA TRANSPORTE DE FLUIDOS**

BELO HORIZONTE

2025

ISABELA DE SOUZA HONORIO

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL APÓS DESGASTE DE
DUTOS DE AÇO API 5L X52 UTILIZADOS PARA TRANSPORTE DE FLUIDOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Wellington Lopes

BELO HORIZONTE
2025

ISABELA DE SOUZA HONORIO

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL APÓS DESGASTE DE
DUTOS DE AÇO API 5L X52 UTILIZADOS PARA TRANSPORTE DE FLUIDOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Wellington Lopes

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wellington Lopes – Orientador

Prof. Dra. Aline Silva Magalhães

Prof. Dra Elaine Carballo Siqueira Corrêa

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu forças e sabedoria para chegar até aqui. Sou eternamente grata, ao meu pai Sérgio, à minha mãe Dulcilene e ao meu irmão Lucas, pelo apoio constante e por sempre me incentivar em minha educação e crescimento pessoal.

Agradeço também ao meu orientador, Dr. Wellington Lopes, pela sua atenção e contribuição essencial na confecção deste trabalho. Sua orientação foi fundamental para a realização deste projeto.

Aos meus amigos Oseias, Fernanda, Isabela Auler e Guilherme, agradeço pela amizade, pelo apoio e pelos momentos de descontração que tornaram essa caminhada mais leve e agradável. E, por fim, agradeço aos meus companheiros de trabalho, Adélio e Wellington, pelos valiosos ensinamentos que adquiri ao longo dessa trajetória. Sou grata por toda a sabedoria compartilhada e por todo o aprendizado.

RESUMO

O transporte de fluidos por dutos é uma prática fundamental desde a antiguidade e permanece essencial na indústria de petróleo, gás natural e minério, com grande relevância no Brasil, especialmente após a inauguração da primeira dutovia na Bahia em 1942. A norma API-5L regulamenta os requisitos de composição química e resistência mecânica dos aços utilizados em dutos, como os aços de baixa liga (ARBL), que são valorizados por sua resistência mecânica, tenacidade e resistência à corrosão. Contudo, fatores como desgaste mecânico e corrosão podem comprometer a durabilidade desses materiais. O aço API 5L X52 é amplamente utilizado na construção de dutos devido às suas boas propriedades mecânicas, mas sob condições adversas, como o transporte de polpas abrasivas, suas propriedades podem ser alteradas. O objetivo deste estudo é analisar as alterações nas propriedades mecânicas e microestruturais do aço API 5L X52 devido ao desgaste causado durante o uso em dutos sob transporte de polpa fosfática. Fez-se a caracterização dos dutos com e sem desgaste por meio de técnicas de microscopia óptica (MO), fluorescência de raios X (FRX), difração de raios X (DRX) e ensaios mecânicos. Os resultados indicaram que o desgaste e a corrosão afetaram a superfície do material, evidenciando corrosão localizada, trincas ramificadas e redução na capacidade de absorção de energia, o que sugere fragilização do material.

Palavras-chave: dutos; aço API 5L X52; desgaste mecânico.

ABSTRACT

The transportation of fluids through pipelines has been a fundamental practice since ancient times and remains essential in the oil, natural gas, and mining industries. This is particularly relevant in Brazil, especially after the inauguration of the first pipeline in Bahia in 1942. The API-5L standard regulates the chemical composition and mechanical strength requirements of steels used in pipelines, such as low-alloy high-strength steels (HSLA), which are valued for their mechanical strength, toughness, and corrosion resistance. However, factors such as mechanical wear and corrosion can compromise the durability of these materials. API 5L X52 steel is widely used in pipeline construction due to its good mechanical properties, but under adverse conditions, such as the transportation of abrasive slurries, its properties may be altered. The objective of this study is to analyze the changes in the mechanical and microstructural properties of API 5L X52 steel due to wear caused during its use in pipelines transporting phosphate slurry. The characterization of pipelines with and without wear was carried out using optical microscopy (OM), X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), and mechanical testing techniques. The results indicated that wear and corrosion affected the material's surface, revealing localized corrosion, branched cracks, and a reduction in energy absorption capacity, suggesting material embrittlement.

Keywords: pipelines; API 5L X52 steel; mechanical wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição espacial dos minerodutos no Brasil.....	15
Figura 2 - Rugosidade em diferentes escalas.....	16
Figura 3 - Micrografias via microscópio eletrônico de varredura de diferentes formas de partículas - a) Esferas de vidro (63 – 106 mm); b) SiO ₂ (106 – 125 mm); c) Al ₂ O ₃ (106 – 125 mm).....	19
Figura 4 - Mecanismo de desgaste – erosão-corrosão.....	19
Figura 5 - Mecanismo de desgaste abrasivo.....	22
Figura 6 - Modo de desgaste abrasivo – Dois corpos.....	22
Figura 7 - Modo de desgaste abrasivo – três copos.....	23
Figura 8 - Mecanismo de desgaste – Fadiga.....	23
Figura 9 - Propagação de trincas	24
Figura 10 - Mecanismo de desgaste – Adesivo	25
Figura 11 - Microestrutura do X52, normalmente constituída por ferrita e perlita – 100x.	29
Figura 12 - Difratogramas de raios X das amostras em diferentes velocidades de soldagem de 400, 430 e 800 RPM.	30
Figura 13 - Fotomontagem da amostra do tubo 1 como recebida	32
Figura 14 - Fotomontagem da amostra do tubo 2 como recebida	34
Figura 15 - Fluxograma de etapas para a realização de ensaios	31
Figura 16 - Fotomontagem das regiões de corte e preparação das amostras -TB1	36
Figura 17 - Fotomontagem das regiões de corte e preparação das amostras -TB2	37
Figura 18 - Gráfico de referência estabelecida pela norma ASTM E112	37
Figura 19 - Amostras para os ensaios de DRX e FRX dos tubos 1 e 2.....	38
Figura 20 - Dimensões do corpo de prova ensaio de impacto.....	40
Figura 21 - Microestrutura do ponto 1 – TB1 com diferentes ampliações.....	42
Figura 22 - Microestrutura do ponto 1 – TB1 – Corrosão nas bordas com diferentes ampliações	42
Figura 23 - Micrografia da amostra retirada no ponto 2 mostrando trincas ramificadas na superfície	44
Figura 24 - Microestrutura do ponto 3 – TB1 – com diferentes ampliações.....	45
Figura 25 - Micrografia do ponto 3, evidenciando corrosão nas bordas inferior e superior	45
Figura 26 - Micrografia do ponto 4 – TB2 – com diferentes ampliações	47
Figura 27 - Difratograma da amostra 1 – Tubo 1 (com sinais de desgaste).....	49

Figura 28 - Difratograma da amostra 2 – Tubo 2 (sem sinais de desgaste).....	49
Figura 29 - Difratograma das amostras 1 e 2	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características principais do tubo 1.....	33
Tabela 2 - Composição química do tubo 1	33
Tabela 3 - Características principais do tubo 2.....	34
Tabela 4 - Composição química do tubo 2	34
Tabela 5 - Resultados dos cálculos Vd e Qmin	41
Tabela 6 - Resultados de análises de FRX da amostra do tubo 1 (amostra desgastada)	50
Tabela 7 - Resultados de análises de FRX da amostra do tubo 2 (sem sinais de desgaste)	51
Tabela 8 - Valores de dureza das amostras 1, 2, 3 e 4.....	52
Tabela 9 - Valores de energia absorvida no ensaio de impacto.....	54

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Área da secção transversal
AM	Amostra
API	<i>American Petroleum Institute</i>
CP	Corpo de prova
Di	Diâmetro interno da tubulação
DRX	Difratometria de raios X
FRX	Espectrometria por Fluorescência de Raios-X
HV	Hardness Vickers
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
TB1	Tubo 1
TB2	Tubo 2
F	Fator empírico
g	Aceleração da gravidade
N	Força normal
Pl	Densidade do Líquido
Pd	Densidade do sólido
Qmin	Vazão mínima
Vd	Velocidade da polpa

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	OBJETIVO	13
2.1.	Objetivo geral.....	13
2.2.	Objetivo específicos	13
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1.	Dutos para transporte no brasil	14
3.2.	Fundamentos da mecânica contato e atrito.....	15
3.3.	Fluxo de partículas em dutos	16
3.4.	Desgaste mecânico em dutos	17
3.4.1.	<i>Principais tipos de desgaste</i>	18
3.5.	Tratamento térmico	25
3.6.	Aço api 5l	26
3.6.1.	<i>Composição química dos aços api</i>	26
3.6.2.	<i>Aço api 5l x52</i>	28
3.6.3.	<i>Características estruturais do aço api 5l x52</i>	28
4.	MATERIAIS E METÓDOS.....	31
4.1.	Fluxograma de etapas do projeto	31
4.2.	Materiais.....	32
4.3.	Métodos.....	35
4.3.1.	<i>Cálculo da velocidade crítica de deposição e vazão mínima</i>	35
4.3.2.	<i>Caracterização microestrutural</i>	36
4.3.2.1.	<i>Análise metalográfica</i>	36
4.3.2.2.	<i>Difração de raios x (drx)</i>	38
4.3.2.3.	<i>Fluorescência de raios x (frx)</i>	39
4.3.3.	<i>Caracterização mecânica</i>	39
4.3.3.1.	<i>Ensaio de microdureza vickers</i>	39
4.3.3.2.	<i>Ensaio de impacto</i>	39
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1.1.	<i>Cálculo da velocidade crítica de deposição e vazão mínima</i>	41
5.1.2.	<i>Caracterização microestrutural</i>	41
5.1.3.	<i>Difração de Raios x (DRX)</i>	48
5.1.4.	<i>Fluorescência de Raios x (FRX)</i>	50

5.1.5. <i>Ensaio de microdureza vickers</i>	52
5.1.6. <i>Ensaio de impacto (Charpy)</i>	53
6. CONCLUSÃO	55
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1. INTRODUÇÃO

O transporte de fluidos por dutos é uma prática consolidada desde a antiguidade, remontando à antiga Assíria, e continua a ser essencial até os dias atuais, desempenhando um papel vital na indústria de petróleo, óleo, gás natural e minério (SILVA et al., 2020). No Brasil, essa infraestrutura tem grande importância, especialmente com a inauguração da primeira dutovia na Bahia, em 1942, e a subsequente expansão dos dutos que atravessam diversos estados, facilitando o escoamento eficiente de fluidos e contribuindo para a economia nacional (QUEIROZ, 2011). Esses sistemas são regulamentados pela norma API-5L, que especifica os requisitos de composição química e resistência mecânica dos aços utilizados nos dutos, sendo fundamental para garantir sua qualidade e durabilidade (API, 2009).

Os aços de baixa liga (ARBL), comuns na fabricação dos dutos, são fortemente valorizados devido à sua resistência mecânica, tenacidade e resistência à corrosão, propriedades essenciais para garantir a integridade das dutovias (AKSELSEN, 1990; CHEN, 1984). No entanto, ao longo do tempo, fatores como o desgaste mecânico e a corrosão podem afetar a durabilidade desses materiais, comprometendo sua eficiência e segurança.

O aço API 5L X52, amplamente utilizado na construção de dutos, possui boas propriedades mecânicas e resistência à corrosão, mas sob condições de operação adversas, como o transporte de polpas abrasivas, suas propriedades podem ser alteradas, impactando seu desempenho (GODEFROID et al., 2017). Neste contexto, foi realizado o cálculo da velocidade crítica e da vazão mínima, essenciais para entender o comportamento do fluxo no interior dos dutos e os efeitos sobre o desgaste do material. Esses cálculos contribuem para a análise de como o fluxo de polpa fosfática pode afetar a integridade do aço e otimizar o desempenho dos sistemas de transporte.

Este estudo tem como objetivo analisar as alterações nas propriedades mecânicas e microestruturais do aço API 5L X52 em função do desgaste causado durante o uso. Foram investigados os principais mecanismos de desgaste que podem resultar na formação de microfissuras e falhas estruturais. Para isso, utilizou-se técnicas de análise, como microscopia óptica (MO) e difração de raios X (DRX), para identificar as modificações microestruturais que afetam diretamente as propriedades do material e para avaliação mecânica foram utilizadas técnicas de ensaio como microdureza e impacto.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo geral

Analisar e caracterizar as alterações mecânicas e microestruturais ocorridas em dutos de aço API 5L X52 usados no transporte de polpa fosfática, comparando suas condições antes e após o desgaste.

2.2. Objetivo Específicos

- Calcular a vazão mínima e a velocidade crítica de deposição no duto e correlacionar com o desgaste do material;
- Efetuar análise estrutural do aço API 5L X52 a partir das técnicas de microscopia óptica (MO), difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX) para identificar possíveis mudanças estruturais antes e após o desgaste;
- Realizar a caracterização mecânica do aço API 5L X52 antes e após o desgaste por meio das técnicas de ensaios mecânicos de microdureza Vickers e impacto;
- Comparar os resultados das diferentes técnicas de caracterização nos dutos do aço API 5L X52 com e sem desgaste.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Dutos para transporte no Brasil

O uso de dutos para transporte tem uma história que remonta há tempos antigos. O primeiro registro de utilização de dutos ocorreu na Assíria, que compreende as regiões do atual Iraque e Síria, em 691 a.C., quando foram usados para a transferência de água doce. Os romanos, conhecidos por seus avanços em engenharia, aprimoraram essa tecnologia, construindo aquedutos cada vez mais complexos. Com o passar dos séculos, essa forma de transporte passou a ser utilizada para diversos tipos de materiais, incluindo minérios (SILVA, *et al*, 2020).

No Brasil, a primeira dutovia foi criada em 1942, na Bahia, com o propósito de conectar uma refinaria experimental ao porto. A partir desse marco, o transporte por dutos experimentou um significativo desenvolvimento, exibindo um mineroduto com 529 km de extensão que é utilizado para o transporte de minério de ferro entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro (SILVA, *et al*, 2020).

O transporte dutoviário, realizado por meio de dutovias, envolve o uso de tubulações para o transporte de materiais como óleos, gases e produtos químicos, seja por meio da gravidade ou da pressão. Essas tubulações são geralmente fabricadas em aço e podem ser revestidas com outros materiais para conferir propriedades específicas (QUEIROZ, 2011).

Os principais tipos de transportes dutoviários estão classificados como oleodutos, gasodutos, aquedutos e minerodutos. Os minerodutos são utilizados para o transporte de minérios, muitas vezes em longas distâncias, até o processo final de beneficiamento. Essa modalidade de transporte é escolhida com o objetivo de reduzir o impacto ambiental em comparação com os meios de transporte mais tradicionais (FURST, 2018).

Os dutos modernos, compostos por tubos fechados de metal e sistemas de bombeamento, surgiram nos Estados Unidos em 1865. Esses sistemas de transporte são amplamente disseminados globalmente e desempenham um papel indispensável na economia mundial (FOGLIATTI, 2004).

No Brasil existem cinco minerodutos em funcionamento, considerando dados referentes ao ano de 2020, com uma extensão total de 1.336 km, além de 601 dutos utilizados para diversos fins (SILVA, *et al*, 2020). No entanto, considerando a riqueza das reservas minerais do país, esses números ainda estão aquém do ideal para atender as necessidades de escoamento de minério. Entre as empresas que operam minerodutos no Brasil, destacam-se a

Anglo American, Samarco e Norsk Hydro. Na figura 1 é apresentada a distribuição espacial dos minerodutos no Brasil (SILVA, *et al*, 2020).

Figura 1 - Distribuição espacial dos minerodutos no Brasil.



Fonte: SILVA, *et al*, 2020.

3.2. Fundamentos da mecânica contato e atrito

Segundo Gonçalves (2017), atrito e desgaste não são propriedades intrínsecas dos materiais, mas dependem da interação de diversos fatores. Entre esses fatores, destacam-se o tipo de movimento relativo, a geometria do contato, a velocidade de deslizamento, a temperatura, além das características mecânicas, físicas e químicas dos materiais e de suas superfícies.

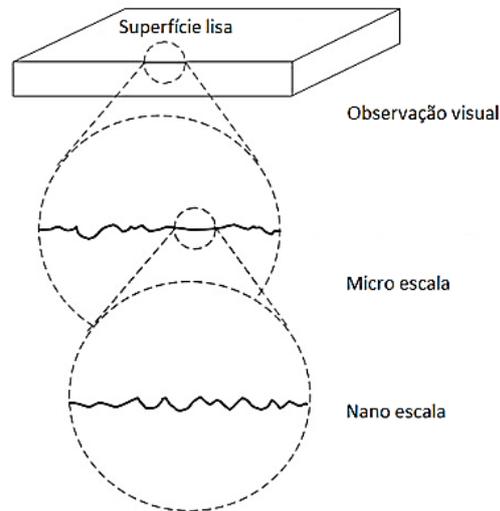
Para Chen (2014), o atrito é definido como uma força tangencial resistente que surge em uma interface deslizante dentro de um sistema dinâmico. O autor também enfatiza que o atrito está relacionado à topografia da superfície, sendo sua investigação tradicionalmente associada à determinação da área real de contato e à compreensão dos mecanismos envolvidos no contato.

A explicação de por que o atrito é independente da área de contato aparente foi proposta por Bowden e Tabor na década de 1940. Esses pesquisadores demonstraram que, devido à rugosidade das superfícies, há uma diferença significativa entre a área de contato aparente e a área real de contato. É essa área real que determina a magnitude do coeficiente de atrito.

De acordo com Chen (2014), tanto na natureza quanto na engenharia, não existem superfícies completamente lisas em termos topográficos. Embora possam parecer suaves em uma escala macroscópica, as superfícies sólidas apresentam asperezas perceptíveis quando comprovadas em uma escala microscópica. Ainda segundo o autor, essas superfícies são quase sempre descritas por variações estudadas na altura, conforme representado na Figura 2.

A definição de textura ou acabamento superficial abrange aspectos como rugosidade, ondulações, marcas e falhas.

Figura 2 - Rugosidade em diferentes escalas



Fonte: Adaptado de CHEIN, 2014.

3.3. Fluxo de partículas em dutos

O estudo do escoamento de partículas em dutos é de grande importância para entender o funcionamento dos processos de transporte de polpas, especialmente em sistemas industriais que envolvem a movimentação de sólidos suspensos. A interação entre as partículas e o fluido transportador pode resultar em fenômenos como o depósito de partículas nas paredes do duto, o que pode comprometer a eficiência do sistema, aumentando o risco de entupimentos e desgaste prematuro até chegar na ruptura do duto. Segundo Bello e Oliveira (2017), e Kok e Osherenko (2021), para evitar esse tipo de acontecimento, é crucial calcular e monitorar duas grandezas: a velocidade crítica de deposição e a vazão mínima.

A velocidade crítica, pode ser definida como à velocidade mínima do fluido necessária para manter as partículas em suspensão e evitar que se depositem nas paredes do duto. Quando a velocidade média do fluido cai abaixo dessa velocidade crítica, as partículas podem se aglomerar e formar depósitos, o que pode resultar em bloqueios no sistema e aumento do desgaste interno do duto Patel e Joshi (2018). Pode-se calcular essa velocidade crítica utilizando um dos modelos mais amplamente usados é o modelo de Durand e Condolios (1952), que calcula a velocidade crítica com base em parâmetros do duto e do material transportado. A fórmula é ilustrada na Equação (1):

$$V_d = F * \sqrt{\frac{(P_s - P_l)}{\rho_l} * 2gDi} \quad Eq.1$$

Vd: velocidade crítica de depósito em m/s;

F: Fator empírico dependente do tamanho das partículas e concentração volumétrica;

g: aceleração da gravidade (9,8 m/s²);

Di: diâmetro interno da tubulação (m);

Ps: densidade do sólido (g/cm³, t/m³ ou Kg/dm³);

Pl: densidade do líquido, usualmente é a água, (g/cm³, t/m³ ou Kg/dm³).

A vazão mínima é o fluxo mínimo de fluido necessário em um sistema de transporte de polpa ou fluido com sólidos para evitar que as partículas sólidas se depositem no fundo do duto. Em sistemas de escoamento bifásico (fluido e sólidos), como os dutos, a manutenção da suspensão das partículas sólidas é essencial para garantir o fluxo contínuo e evitar obstruções. A vazão mínima está diretamente associada à velocidade crítica de depósito, que é a velocidade mínima necessária para que as partículas não se depositem no fundo do duto. Caso a velocidade do fluido for inferior à velocidade crítica de depósito, as partículas podem sedimentar, bloqueando o fluxo e causando entupimentos, o que leva à perda de eficiência do sistema e aumento dos custos operacionais Schweizer e Lemoine (2009). Para o cálculo da vazão mínima de um fluxo, é utilizada a equação 2.

$$Q_{\min} = A * Vd \quad \text{Eq.2}$$

Sendo,

Q_{\min} = é a vazão mínima (m³/s),

A = área da seção transversal do duto (m²),

Vd = velocidade crítica de depósito (m/s),

3.4. Desgaste mecânico em dutos

O desgaste mecânico em dutos desempenha um papel crucial no surgimento de falhas, afetando diretamente a integridade e a durabilidade dessas estruturas. Com o tempo, o desgaste progressivo na superfície interna dos dutos, causado pelo transporte de polpas abrasivas e fluidos contendo partículas sólidas, reduz a espessura da parede do tubo, o que pode resultar em uma perda de resistência mecânica (SINHA, 2015).

Esse processo de desgaste pode ocorrer por diversos mecanismos, como abrasão (causada pelo atrito constante das partículas sólidas), corrosão erosiva (provocada pelo impacto das partículas a altas velocidades) e *fretting* (desgaste por vibrações em áreas de contato entre componentes da tubulação) e entre outros. Cada um desses mecanismos enfraquece a estrutura

ao longo do tempo, criando condições que favorecem a nucleação e propagação de trincas (SINHA, 2015).

À medida que o desgaste avança, especialmente em pontos de maior turbulência ou curvas, a capacidade de suporte do tubo é reduzida, o que eleva o risco de falhas catastróficas, como rompimentos e vazamentos.

3.4.1. Principais tipos de desgaste

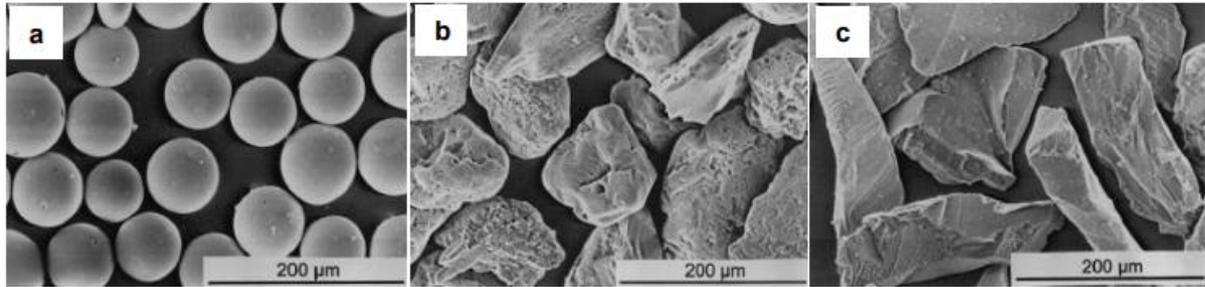
DESGASTE EROSIVO

O desgaste erosivo ocorre quando partículas sólidas ou líquidas, transportadas por um fluido em movimento, impactam uma superfície sólida, promovendo a remoção de material (ALAM, 2015). A degradação progressiva do material devido à interação mecânica de partículas sólidas suspensas em meios líquidos é conhecida como erosão por lama. O transporte de lama particulada pode envolver abrasão, erosão e corrosão. Dentre esses processos, a erosão representa a maior parte do desgaste total e da remoção de material (JAVAHERI, 2018). Em aplicações práticas, dutos de transmissão de petróleo e gás, minerodutos, máquinas hidráulicas, como hidroturbinas, e bicos são suscetíveis à erosão por lama. Os aços carbono e os aços de baixa liga são comumente utilizados na construção de dutos de petróleo e gás. Esses materiais podem ser degradados pela remoção de metal causada por partículas abrasivas. Como resultado, a vida útil dos dutos é reduzida e falhas catastróficas podem ocorrer, causando danos à vida humana e ao meio ambiente (ALAM, 2015).

Os fatores-chave que influenciam os mecanismos de erosão em meio líquido, segundo (CLARK, 2014) incluem: propriedades do material alvo, dureza, ângulo de impacto, composição da lama, tamanho das partículas e velocidade das partículas. Esses fatores estão intimamente interligados; portanto, estudar uma única variável, mesmo em escala laboratorial, torna-se muito difícil.

A resistência à erosão depende da microestrutura do material alvo, especialmente quando as partículas abrasivas são afiadas e angulares. As propriedades físicas dos materiais-alvo, como dureza, ductilidade e tenacidade, afetam significativamente o desgaste erosivo (ALAM, 2015). Quando a partícula abrasiva é mais dura que o material alvo, a erosão é mais severa. Além disso, partículas abrasivas afiadas e angulares causam mais danos erosivos do que partículas esféricas, na figura 3 ilustra diferentes formas de partículas que causam erosão. A microestrutura do aço, composta principalmente por ferrita e perlita, também influencia os mecanismos de erosão, onde a interação entre essas fases pode favorecer a remoção de material.

Figura 3 - Micrografias via microscópio eletrônico de varredura de diferentes formas de partículas



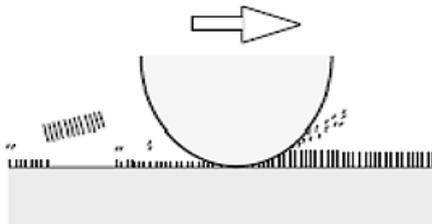
- a) Esferas de vidro (63 – 106 µm);
- b) Esferas de vidro SiO₂ (106 – 125 µm);
- c) Esferas de vidro Al₂O₃ (106 – 125 µm).

Fonte: Adaptado de SURESH BABU e *et al.*, 2011.

DESGASTE EROSIVO-CORROSIVO

Quando ocorre penetração, especialmente em ambientes com líquidos ou gases corrosivos, reações químicas ou eletroquímicas formam produtos na superfície do material. Se esses produtos de ocorrência aderirem à superfície e se comportarem de maneira semelhante ao material original. Esse tipo de mecanismo é ilustrado pela figura 4.

Figura 4 - Mecanismo de desgaste – erosão-corrosão



Fonte: RADI, SANTOS, *et al.*, 2007.

A erosão-corrosão é um mecanismo de perda de material por tribocorrosão, causado pelo fluxo de fluido (na presença ou ausência de partículas sólidas), que danifica tanto as camadas superficiais (como películas passivas ou produtos de corrosão) quanto o metal base, ou seja, é uma característica que combina abrasão de partículas sólidas com processos corrosivos (RADI, SANTOS, *et al.*, 2007).

Estudos demonstraram que a velocidade do fluxo e a dimensão das partículas influenciam significativamente a taxa de desgaste (LIU, 2020). Por exemplo, o aumento da turbulência e o tamanho das partículas levam a um aumento na perda de material. A presença de CO₂, H₂S e outros compostos químicos na polpa também pode aumentar a taxa de corrosão, especialmente em altas pressões.

No contexto de gasodutos de aço carbono, a presença de CO₂ dissolvido na água pode levar à formação de uma película protetora de carbonato de ferro (FeCO₃) na superfície do tubo, que atua como uma barreira contra a corrosão (ABDU, 2023). No entanto, esse filme é muito sensível a variáveis operacionais, como temperatura, pressão parcial de CO₂, pH e velocidade de fluxo. Em condições ideais, como temperaturas acima de 60 °C e pH maior que 5, uma camada de FeCO₃ pode se formar e oferecer proteção contra a corrosão. No entanto, a alta velocidade do fluido reduz a supersaturação de FeCO₃, impedindo a deposição adequada do filme. Além disso, quando partículas sólidas impactam a superfície da tubulação, elas erodem a película de FeCO₃, expondo o aço subjacente à corrosão acelerada.

O desgaste do filme protetor não só expõe o metal a novos ataques de corrosão, como também amplifica a ação mecânica das partículas, intensificando o desgaste. Isso faz com que a erosão-corrosão seja mais grave do que os efeitos individuais de erosão ou corrosão (ABDU, 2023). Em um ambiente com CO₂, a corrosão do aço carbono-manganês pode ser até 2 a 4 vezes mais prejudicial, especialmente em condições de alta temperatura e presença de umidade (ABDU, 2023).

Pode-se citar outros tipos de corrosão como:

Corrosão Uniforme ou Generalizada: este tipo de corrosão ocorre de forma homogênea em toda a extensão da superfície do material, resultando em uma perda de espessura igual em todos os pontos. Apesar de ser um ataque generalizado, é possível estimar com certa precisão a vida útil dos equipamentos afetados (NACE, 1984).

Corrosão Localizada: este tipo de corrosão envolve um ataque concentrado em áreas específicas do material. Geralmente, ocorre em condições em que a maior parte da superfície não está afetada ou está sujeita a um grau menor de corrosão do que as áreas localizadas (NACE, 1984). Um exemplo comum é a corrosão por pites, caracterizada pela formação de pequenas cavidades cujos diâmetros são menores do que suas profundidades (LIMA, 2007).

Corrosão Intergranular: este tipo de corrosão envolve um ataque localizado nos contornos dos grãos da estrutura cristalina do metal. Pode levar à corrosão sob tensão fraturante, conhecida como *stress corrosion cracking*, que resulta na fratura do material devido à redução da resistência mecânica da liga devido ao ataque corrosivo. Esse fenômeno é frequentemente causado por alterações na composição química ou na microestrutura (LIMA, 2007).

Corrosão Intragranular ou Transgranular: similar à corrosão intergranular, a corrosão intragranular ocorre dentro dos próprios grãos da estrutura cristalina do metal. Isso leva à perda das propriedades mecânicas do metal e pode resultar em fraturas sob carga mínima (GENTIL, 2003).

Corrosão sob Tensão: esse tipo de corrosão ocorre quando há uma combinação de um meio corrosivo com tensões aplicadas ou residuais no metal. Pode resultar na corrosão sob tensão fraturante, conhecida como *stress corrosion cracking*, levando à fratura do metal e sendo considerada uma das formas mais perigosas de corrosão localizada. Fatores como defeitos na superfície metálica, contornos de grãos e danos mecânicos podem iniciar trincas de corrosão sob tensão (MCCAFFERTY, 2010).

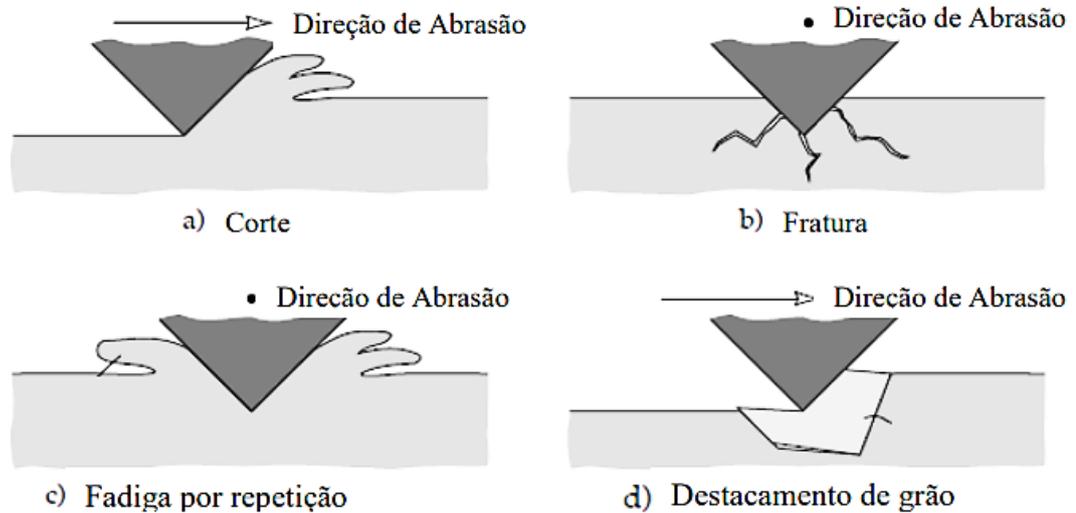
DESGASTE ABRASIVO

O desgaste abrasivo é um dos mecanismos mais comuns encontrados em sistemas mecânicos e ocorre devido à ação de partículas duras que são pressionadas e deslizadas sobre superfícies de menor dureza. Esse processo pode se manifestar em duas situações: em sistemas de dois ou três corpos. Especificamente, o desgaste acontece quando um objeto sólido é carregado contra partículas de um material que possui dureza igual ou superior à do material em questão. Tanto a abrasão quanto a erosão representam formas rápidas e severas de desgaste, podendo resultar em custos significativos se não forem controladas adequadamente. (STACHOWIAK, G.W, 2006.)

O tamanho das partículas abrasivas, afetam o desgaste. Sendo que partículas arredondadas causam menos desgastes enquanto, partículas maiores e com arestas mais afiadas causam um desgaste maior (STACHOWIAK, G.W, 2006.). Existem 4 tipos de mecânicos de desgastes abrasivos conforme ilustrado na Figura 5, são eles:

- a) Corte: Grão afiado ou de grande aspereza corta uma superfície macia, o material cortado é removido como resíduo do desgaste.
- b) Fratura: Em materiais frágeis, é possível que ocorra fratura da superfície desgastada. Nessa situação, o material desgastado resulta da convergência de trincas.
- c) Fadiga: Quando um material dúctil é submetido ao desgaste por um grão abrasivo, o corte é perigoso, e a superfície sofre deformações repetidas. Nesse caso, a exaustão gerada é decorrente da fadiga do material.
- d) Destacamento de grão: O último mecanismo apresentado refere-se ao descolamento ou arrancamento de grãos. Isso ocorre, principalmente, em cerâmicas, onde as fronteiras entre os grãos são relativamente frágeis. Assim, todo o grão se perde como destruição de desgaste.

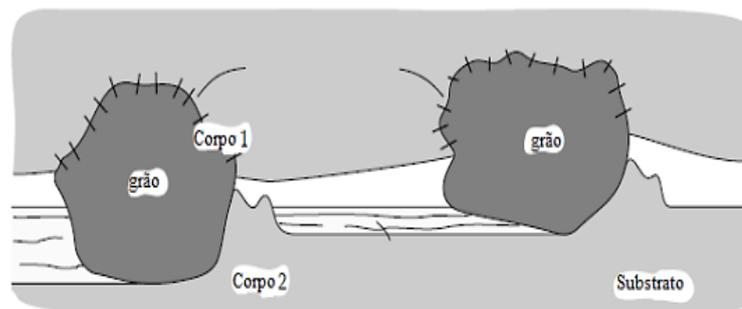
Figura 5 - Mecanismo de desgaste abrasivo



Fonte: Stachowiak, G.W, 2006.

Dois corpos: O desgaste abrasivo entre dois corpos é ilustrado pela interação de uma lixa com uma superfície (STACHOWIAK, G.W, 2006.). Asperezas duras ou grãos fortemente limitados se movimentam sobre a superfície, atuando como uma ferramenta de corte. (Ilustrado na Figura 6).

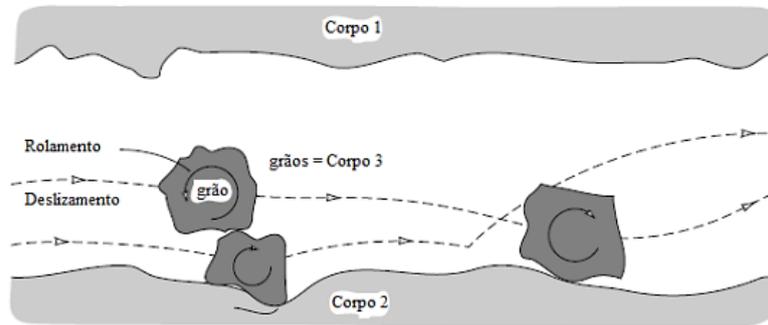
Figura 6 - Modo de desgaste abrasivo – Dois corpos



Fonte: Stachowiak, G.W, 2006.

Três corpos: Neste caso, os grãos têm tanto liberdade para rolar quanto para deslizar na superfície, pois não estão firmemente presos (STACHOWIAK, G.W, 2006.). (Ilustrado na figura 7).

Figura 7 - Modo de desgaste abrasivo – três corpos



Fonte: Stachowiak, G.W, 2006.

DESGASTE POR FADIGA: O desgaste por fadiga, conforme descrito pela ASTM E1823-13, é um processo gradual e permanente de alteração na estrutura do material, causado por variações repetidas de tensões e deformações. Esse tipo de desgaste pode levar à formação de trincas ou fraturas após múltiplos ciclos de carga. Ao contrário dos mecanismos de adesão e abrasão, que não necessitam de ciclos repetidos de contato para gerar partículas abrasivas, o desgaste por fadiga resulta do acúmulo de deformação plástica em pontos de concentração de tensão. Esses pontos, especialmente em contatos elásticos ou elastoplásticos, como os observados em elementos rolantes, são particularmente suscetíveis ao desenvolvimento de falhas. Após um número específico de ciclos de fricção, as trincas começam a surgir devido à fratura por fadiga de alto ciclo, e sua propagação é influenciada pela microestrutura do material. Esse tipo de mecanismo é (ilustrado pela figura 8).

Figura 8 - Mecanismo de desgaste – Fadiga



Fonte: RADI, SANTOS, et al., 2007.

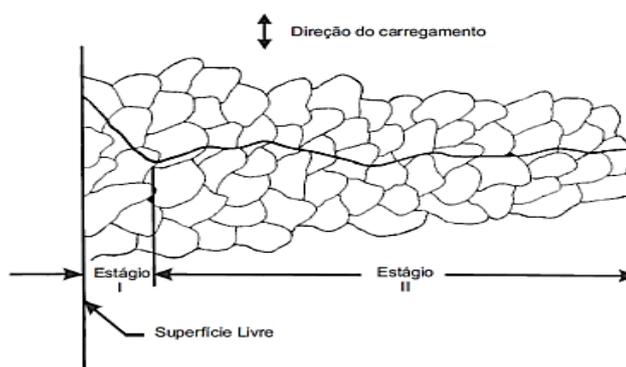
Em dutos, as variações de pressão interna e as mudanças térmicas durante a operação podem gerar microfissuras nas paredes dos tubos ao longo do tempo. Essas fissuras se propagam em resposta aos ciclos contínuos de estresse, podendo levar a falhas estruturais. Durante a operação, os tubos estão sujeitos a cargas de pressão cíclica que provocam variações extremas (alternadas ou flutuantes) nas tensões aplicadas, o que pode resultar em falha por fadiga. Mesmo quando a tensão aplicada é inferior à tensão máxima do material, a repetição de

cargas variáveis pode provocar o surgimento e a propagação de microtrincas até a fratura do componente (RADI, SANTOS, *et al.*, 2007).

As falhas por fadiga, geralmente, ocorrem de forma repentina e catastrófica, tornando-se um dos mecanismos mais comuns de falhas em componentes mecânicos, representando de 50% a 90% do total das falhas, o que torna seu estudo altamente relevante. Segundo Forsyth, o mecanismo de falha por fadiga pode ser dividido em três etapas, conforme ilustrado na figura 9. A etapa I, que envolve a nucleação e o crescimento de microtrincas; a etapa II, onde ocorre o crescimento dessas macrotrincas até um tamanho crítico; e a etapa III, na qual a propagação das trincas se torna catastrófica, resultando na falha do componente mecânico. Vale destacar que, em muitos casos, uma trinca que leva à falha por fadiga pode ser um defeito pré-existente, originado durante o processo de fabricação ou operação (RADI, SANTOS, *et al.*, 2007).

As falhas por fadiga têm a característica de serem localizadas, progressivas e cumulativas, o que exige uma modelagem detalhada para possibilitar a análise local do problema e evitar que a geração e propagação de uma trinca causem falhas graves na estrutura global. Além disso, a formação de fissuras depende de fatores como a geometria do componente, o material utilizado e as condições de carregamento. A presença de moedas ou amassamentos em componentes, como os dutos, pode atuar como um concentrador de tensão, comprometendo significativamente a vida útil à fadiga e acelerando o processo de falha. (FORSYTH, 1962).

Figura 9 - Propagação de trincas

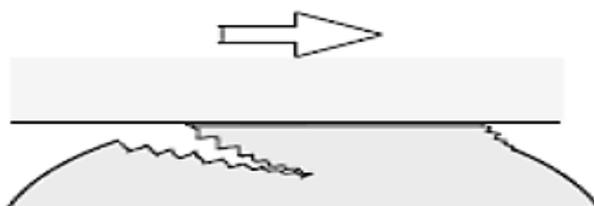


Fonte: Forsyth, 1962.

DESGASTE ADESIVO: Quando duas superfícies estão em contato plástico e a força de adesão entre elas é suficientemente forte para resistir ao movimento relativo, uma grande deformação plástica é gerada na região de contato, sob condições de compressão e cisalhamento. Esse deslocamento induz deformações significativas na área de contato, levando à formação de uma

trinca. A trinca se inicia e se propaga devido à combinação de tensões de tração e cisalhamento. À medida que a trinca avança até a interface de contato, ocorre o desprendimento de partículas de desgaste, finalizando o processo de transferência adesiva (RADI, SANTOS, et al., 2007). Esse tipo de mecanismo é ilustrado pela figura 10.

Figura 10 - Mecanismo de desgaste – Adesivo



Fonte: RADI, SANTOS, et al., 2007.

DESGASTE POR FRETTING: ocorre em junções estacionárias entre duas peças que estão solicitadas a pequenos movimentos relacionados, frequentemente causados por vibrações ou outras formas de oscilação. Esse tipo de desgaste é causado pela corrosão da superfície, presença de partículas de óxido (como ferrugem) e aumento da aspereza superficial. A combinação de movimentos repetitivos e a oxidação aceleram o processo de proteção, comprometendo a supervisão das superfícies em contato (RADI, SANTOS, et al., 2007).

3.5. Tratamento térmico

O uso de tratamento térmico para aço carbono, como graus API 5L, visa principalmente melhorar suas propriedades mecânicas, incluindo dureza, ductilidade, resistência ao escoamento, resistência ao impacto, resistência à tração e resistência à corrosão.

Pesquisas indicam que a resistência à corrosão de corpos de prova temperados em ambientes contendo dióxido de carbono (CO₂) e ácido acético é menos eficaz do que a de corpos de prova recozidos, sugerindo que o método de tratamento térmico pode influenciar a suscetibilidade à corrosão (ADNAN *et al.* 2018). O uso de inibidores, como inibidores orgânicos à base de amina, pode aumentar significativamente a resistência à corrosão, alcançando melhorias de até 96,67% (SWANDITO E MALA, 2020).

Processos de pós-tratamento térmico, como aqueles aplicados a tubulações API 5L X65, podem melhorar a resistência adesiva. Além disso, a formação de microestruturas de ferrita poligonais pode levar a reduções na resistência ao escoamento, mas pode aumentar a

plasticidade, demonstrando a interação complexa entre parâmetros de tratamento térmico e propriedades do material (THIANGPAK e RODCHANAROWAN 2018; JING *et al.*, 2009).

O tratamento térmico adequado pode otimizar essas microestruturas para melhorar a tenacidade à fratura e as propriedades de tração e dureza (GODEFROID *et al.*, 2017).

3.6. Aço API 5L

A norma API-5L, emitida pelo Instituto Americano de Petróleo (API), categoriza os aços utilizados na fabricação de dutos com base em sua composição química e resistência mecânica. Dentro dessa norma, diversos graus de aços para tubos são especificados, muitos dos quais pertencentes à categoria de aços de baixa liga (AKSELSEN, 1990; CHEN, 1984).

Os aços ARBL, apresentam alta resistência mecânica e baixa quantidade de elementos de liga, dessa forma são utilizados em diversas aplicações que necessitam de custos relativamente baixo, boa resistência mecânica, boa tenacidade à fratura, além de resistência à fragilização por hidrogênio. Essas propriedades excepcionais frequentemente estão associadas à presença de microligantes, como nióbio, titânio ou vanádio. Estes aços são empregados em tubos, vasos de pressão, vagões, tanques, construção civil, dentre outros (AKSELSEN, 1990; CHEN, 1984).

A resistência mecânica e a tenacidade à fratura são decorrentes da combinação de vários fatores, incluindo uma microestrutura composta por grãos finos, uma elevada densidade de discordâncias que se formam durante a deformação a frio do material, o endurecimento por precipitação causado pela presença de carbonetos de titânio, vanádio ou nióbio, distribuídos de maneira fina na matriz, bem como a influência de uma textura apropriada. A inclusão desses elementos microligantes desempenha inicialmente um papel significativo na redução do equivalente de carbono (AKSELSEN, 1988).

3.6.1. Composição química dos aços API

A aplicação do aço é fortemente influenciada por sua composição química. A seguir, de forma concisa será abordado o impacto dos principais elementos de liga nos aços da classe API:

- Carbono (C): o aumento do teor de carbono representa uma abordagem econômica para aumentar a resistência mecânica, especialmente no limite de escoamento, no entanto, isso prejudica a tenacidade do material e compromete a soldabilidade. Teores elevados também comprometem a solubilidade do aço. Em processos de soldagem, a manutenção de baixos teores de carbono, geralmente na faixa de 0,05 a 0,15%, é

essencial para evitar a formação de martensita. Além disso, teores reduzidos de carbono desempenham um papel crucial na prevenção da precipitação excessiva de carbonetos, além de contribuir para o refinamento da microestrutura (RASANEM, 1972).

- Manganês (Mn) : o acréscimo de manganês resulta no aumento da resistência mecânica e da resistência à fadiga, ao mesmo tempo em que reduz a temperatura de transformação de γ (austenita) para α (ferrita), promovendo, assim, o refinamento da microestrutura ferrítica do grão. Esse refinamento contribui para um incremento adicional na resistência mecânica e na tenacidade do material (CALDEIRA, 2005). Entretanto, é importante observar que o manganês tem a propensão de combinar com o enxofre, formando MnS, gerando inclusões alongadas dentro da matriz. Estas inclusões podem atuar como pontos de concentração de tensão, resultando em uma diminuição na ductilidade e na tenacidade do material (GRAY, 2007).
- Silício (Si): aumenta a resistência mecânica e à corrosão, além de reduzir a soldabilidade. Atua como desoxidante, reduzindo a porosidade e favorece a formação de ferrita pró-eutetóide e restringe a formação de austenita. (GRAY, 2007).
- Enxofre (S): prejudicial aos aços, diminui a ductilidade, tenacidade à fratura e a soldabilidade. (COSTA E SILVA, 2006).
- Fósforo (P): a adição desse elemento eleva o limite de escoamento e a resistência à corrosão, contudo, acarreta na redução da soldabilidade, da ductilidade e da tenacidade à fratura do material. Vale destacar que em teores específicos, o fósforo pode fragilizar o aço (COSTA E SILVA, 2006).
- Nitrogênio (N): é aconselhável que este elemento esteja presente em quantidades reduzidas devido à sua afinidade por elementos como Nióbio (Nb), Alumínio (Al), Vanádio (V) e Titânio (Ti). A presença excessiva de nitrogênio pode resultar em endurecimento por precipitação, o que, por sua vez, compromete a tenacidade do aço (CALDEIRA, 2005; HONEYCOMBE, 1982; GRAY, 2007).
- Nióbio: é considerado um dos elementos de liga mais significativos nos aços microligados, sendo quase indispensável na composição dos aços ARBL. Mesmo em quantidades reduzidas, o nióbio desempenha um papel fundamental no aumento dos limites de resistência e escoamento, possibilitando a redução dos teores de carbono e manganês. A introdução do nióbio na composição viabilizou a produção de aços com menores teores de carbono (IMLAU, 2007).
- Titânio: contribui para o aumento do limite de resistência e aprimora o desempenho em

condições de temperaturas elevadas. Além disso, atua estabilizando a fase ferrítica e, em concentrações mais elevadas, reduz a extensão do campo austenítico (KORCHYNSKY, 2000).

- Vanádio: o vanádio age como estabilizador da fase ferrita, sendo capaz de formar precipitados de VC e VN durante e após a transformação da γ para α . Esses precipitados têm a particularidade de se formar em temperaturas mais baixas, resultando em uma morfologia mais fina (KORCHYNSKY, 2000).

A quantidade de Nióbio, Titânio e Vanádio devem ser de no máximo 0,1%, para que o endurecimento não seja elevado demais, evitando assim que as propriedades do material sejam prejudicadas, especialmente a tenacidade à fratura.

3.6.2. Aço API 5L X52

O termo "API 5L" refere-se à norma *American Petroleum Institute* de especificação para tubos de aço utilizados em sistemas de transporte de fluidos, principalmente na indústria de petróleo e gás. O aço API 5L X52 é um tipo de aço de alta resistência e baixa liga utilizado na fabricação de tubos para transporte de fluidos, especialmente no setor de petróleo e gás. Esse aço apresenta boas propriedades mecânicas, incluindo alta resistência à tração e boa tenacidade e sua classificação "X52" indica um limite de escoamento mínima de 52.000 psi (cerca de 360 MPa) e resistência a tração mínima de 455MPa. Essas propriedades são essenciais para garantir a integridade estrutural dos tubos.

Diâmetro Externo (DE): Varia normalmente de 1/2 polegada (cerca de 12,7 mm) a 48 polegadas ou 1.219 mm, dependendo do uso.

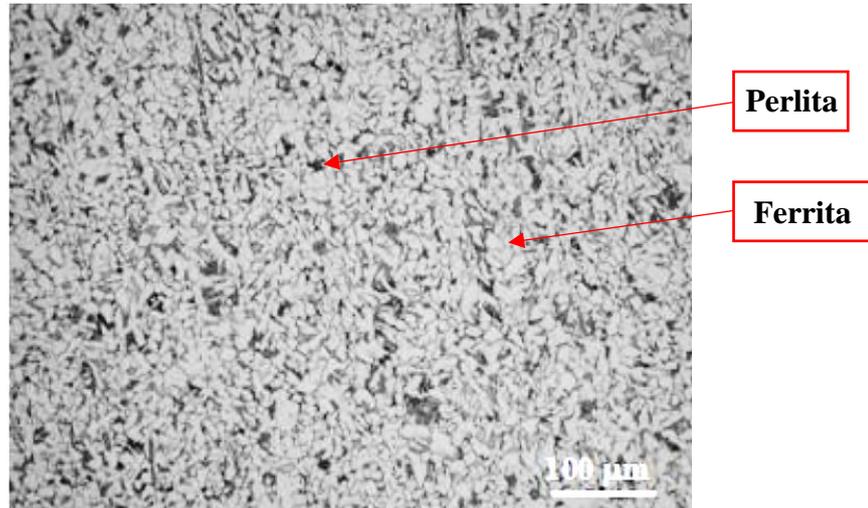
Espessura da Parede: A espessura pode variar de 3 mm a 30 mm, dependendo da resistência necessária.

3.6.3. Características Estruturais do aço API 5L X52

O aço API 5L X52 é geralmente composto por uma microestrutura predominantemente ferrítica, embora contenha uma quantidade de perlita, conforme a figura 11. A perlita é uma constituinte formada por 2 fases: cementita em uma matriz de ferrita, resultante de tratamentos térmicos específicos durante a fabricação do aço. Essa combinação de fases proporciona uma microestrutura equilibrada que contribui para as propriedades mecânicas desejáveis do aço, como tenacidade e resistência. (METALS, 2017).

A ferrita, apresentada na estrutura do material sendo uma fase sólida de ferro, confere ductilidade ao material, permitindo que ele deforme plástica e elasticamente. A presença de perlita melhora a resistência mecânica, mantendo uma boa usinabilidade.

Figura 11 - Microestrutura do X52, normalmente constituída por ferrita e perlita – 100x.



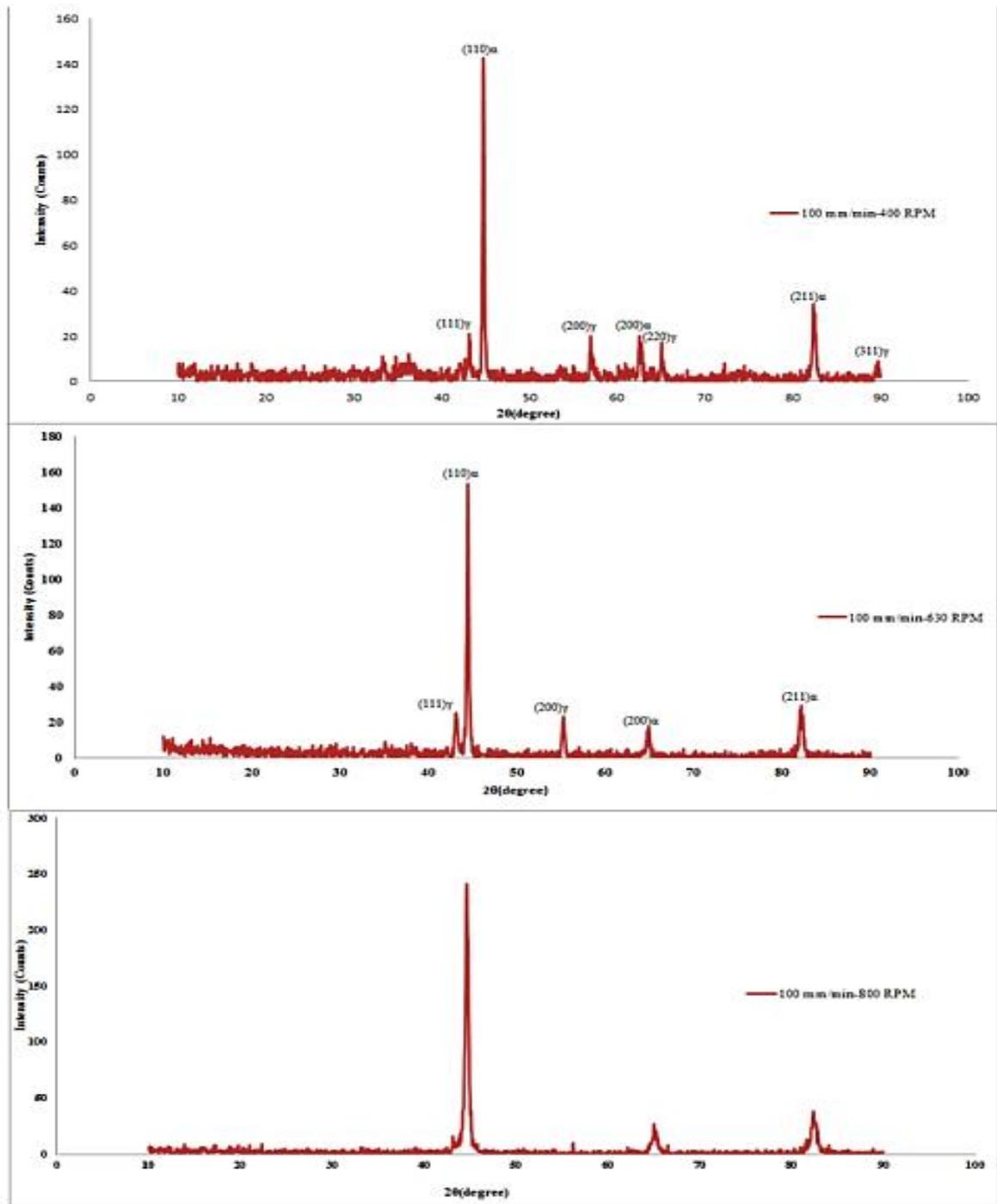
Fonte: CONTRERAS, 2015.

A análise de difração de raios X (DRX) é uma ferramenta fundamental para entender as fases de um material. O aço API 5L X52, em relação à predominância da ferrita em sua microestrutura resulta em picos intensos no padrão de difração. Esses picos são mais evidentes devido à maior abundância de ferrita, que contribui para uma estrutura cristalina mais bem ordenada e definida (GHARIBSHAHYAN, EHSAN *et al.*, 2015).

Segundo estudos de (GHARIBSHAHYAN, EHSAN *et al.*, 2015) com relação ao comportamento no DRX, os padrões observados nas amostras mostraram que o pico principal está relacionado à fase ferrítica, enquanto o pico de cementita foi invisível devido à sobreposição da ferrita. Também, foi observado que a quantidade de ferrita aumenta com a velocidade de soldagem devido ao refino dos grãos e à extensa deformação na Zona de Mistura (SZ).

A Figura 12 ilustra os difratogramas de raios X das amostras em diferentes velocidades de soldagem, evidenciando a predominância da ferrita.

Figura 12 - Difratoformas de raios X das amostras em diferentes velocidades de soldagem de 400, 430 e 800 RPM.



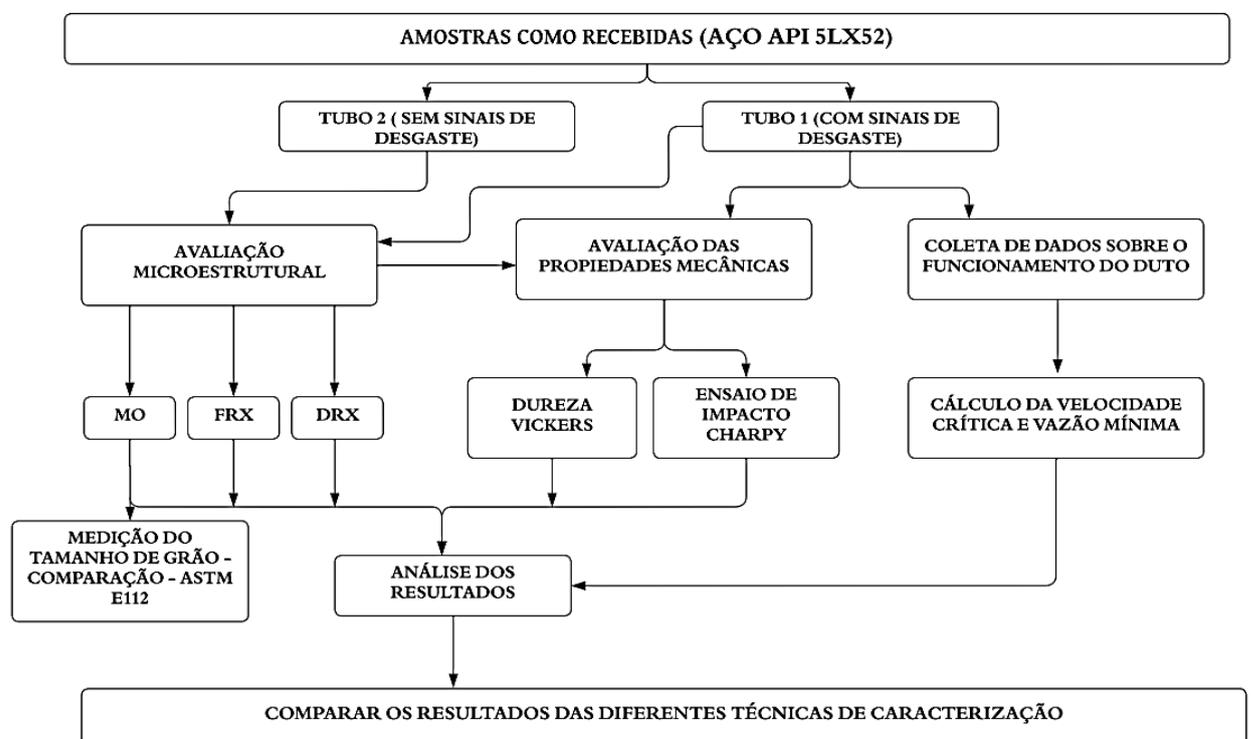
Fonte: GHARIBSHAHYAN, Ehsan et al., 2015.

4. MATERIAIS E METÓDOS

4.1. Fluxograma de etapas do projeto

Neste estudo, o foco foi analisar e caracterizar as alterações mecânicas e microestruturais ocorridas no aço API 5L X52 devido ao desgaste em dutos. A figura 13 oferece uma visão abrangente das etapas e dos ensaios conduzidos neste trabalho, proporcionando uma compreensão detalhada de todos os procedimentos.

Figura 13 - Fluxograma de etapas para a realização de ensaios



Fonte: Próprio autor, 2025.

4.2. Materiais

Neste estudo, foram utilizados dois tubos de aço com a especificação API 5L X52, ambos destinados ao transporte de polpa. O Tubo 1 apresenta sinais de desgaste e outros tipos de danos causados pelo uso contínuo em condições de operação reais, permitindo a avaliação dos efeitos do desgaste e da corrosão. O Tubo 2, fornecido pelo CTDUT - Centro de Tecnologia em Dutos, é um tubo de referência, sem danos, que possui especificações semelhantes ao Tubo 2. As características principais dos tubos estão descritas nas tabelas 1, 2, 3 e 4.

Na figura 14 é ilustrada a amostra de tubo 1 como recebida apresentando sinais evidentes de desgaste e corrosão. As características principais e análise da composição química do material são apresentadas na tabela 1 e tabela 2, respectivamente. Na figura 14 indica região de deformação, ocorrida após o rompimento do tubo. A área afetada mostra sinais de material desgastado e enfraquecido, com a corrosão visível nas superfícies externas.

Figura 14 - Fotomontagem da amostra do tubo 1 como recebida



Fonte: Próprio autor, 2025.

Tabela 1 - Características principais do tubo 1

TUBO 1				
Comprimento	170 cm			
Diâmetro	24,89cm			
Fluido	Polpa fosfática - 60% polpa e 40% água			
Composição da Polpa	P ₂ O ₅	35,01%	CaO	48,70%
	Fe ₂ O ₃	2,69%	SiO ₂	3,14%
	Al ₂ O ₃	0,28%	TiO ₂	1,63%
	MgO	0,55%	H ₂ O	40%
Densidade da Polpa	1,71 g/cm ³			
Pressão de Trabalho no Trecho com Falha	122 kgf/cm ²			
Histórico de Pressão no Momento da Falha				
Casa das Bombas	148 kgf/cm ²			
Trecho com Falha	131 kgf/cm ²			

Fonte: Próprio autor, 2025.

Tabela 2 – Composição química do tubo 1

Elementos	Carbono (C)	Manganês (Mn)	Fósforo (P)	Enxofre (S)	Silício (Si)
Concentração (%)	0,152%	0,832%	0,017%	0,017%	0,249%
Elementos	Níquel (Ni)	Cromo (Cr)	Molibdênio (Mo)	Nióbio (Nb)	Vanádio (V)
Concentração (%)	0,052%	0,099%	0,024%	0,037%	0,001%

Fonte: Próprio autor, 2025.

A Figura 15 indica a região do corte longitudinal, onde foram recebidas duas barras com dimensões de 25 cm por 10 cm cada. O tubo 2 em questão foi fornecido pela CTDUT e não foi utilizado em operação. Foi fabricado por laminação a quente e passou por um tratamento térmico de recozimento. Trata-se de um tubo com costura, produzido por soldagem por resistência elétrica longitudinal (ERW - Electric Resistance Welding). Na tabela 3 e 4, constam as informações principais do tubo 2 e a sua composição química, respectivamente.

Vale ressaltar que, apesar das amostras com e sem desgaste serem do mesmo aço (API 5L X52), elas não pertencem ao mesmo fabricante nem ao mesmo tubo. Isso significa que podem ter apresentado diferenças desde a sua condição inicial, ou seja, o aço da amostra sem desgaste pode não ter as mesmas características microestruturais e mecânicas que o tubo analisado com desgaste possuía antes de sofrer degradação.

Essa diferença se deve ao fato de que não foi possível obter um segmento idêntico ao tubo desgastado em sua condição original para comparação direta. Diante dessa limitação, foi necessário adaptar a abordagem experimental, utilizando uma amostra sem desgaste de outro tubo como referência para a análise comparativa. Dessa forma, qualquer variação observada entre as amostras pode estar relacionada tanto ao efeito do desgaste quanto a possíveis diferenças na condição inicial dos materiais.

Figura 15 - Fotomontagem da amostra do tubo 2 como recebida



Fonte: Próprio autor, 2025.

Tabela 3 - Características principais do tubo 2

TUBO 2	
Comprimento	120cm
Diâmetro	30,48cm
Fluído	Polpa de minério/Ar comprimido

Fonte: Próprio autor, 2025.

Tabela 4 - Composição química do tubo 2

Elementos	Carbono (C)	Manganês (Mn)	Fósforo (P)	Nióbio (Nb)	Vanádio (V)
Concentração (%)	0,26	1,40%	0,030%	< 0,015%	< 0,015%

Fonte: API 5L X52, 2009.

4.3. Métodos

4.3.1. Cálculo da velocidade crítica de deposição e vazão mínima

Para calcular a velocidade em que partículas sólidas da polpa se depositam no fundo do duto, foi utilizada a equação (2), descrita no tópico 3.2. Para encontrar o F (Fator empírico dependente do tamanho das partículas e concentração volumétrica), segundo (WILSON *et al.*; 2006), pode-se adotar o valor de F, como o valor empírico $F = 0,9$ é usado no modelo de Durand e Condolios (1952) porque, em experimentos realizados para estudar o transporte de sólidos em dutos, este valor foi identificado como uma média confiável para a maioria das condições típicas de escoamento.

É adequado para a maioria das aplicações práticas, especialmente quando as partículas transportadas têm propriedades comuns, como densidade e tamanho médios (como areias ou fosfatos).

A fórmula é ilustrada na Equação (2):

$$Vd = F * \sqrt{\frac{(Ps - Pl)}{\rho_l} * 2gDi} \quad Eq.2$$

Para o cálculo, foi adotado os parâmetros a seguir:

(Vd) - Velocidade crítica de deposição;

(F) - Fator empírico - 0,9;

(g) Aceleração da gravidade - 9,8 m/s²;

(Di) - Diâmetro interno - 23,38 cm ou 0,2338 m;

(Ps) - Densidade do sólido - 1,71 g/cm³ ou 1710 Kg/dm³ - Polpa fosfática;

(Pl) - Densidade do líquido - Usualmente é a água, (1 g/cm³ ou 1000 Kg/dm³).

Após o cálculo de velocidade crítica de deposição, foi realizado o cálculo da vazão mínima necessária para o transporte eficiente de polpa em dutos, com o objetivo de evitar a sedimentação das partículas sólidas no fundo do duto. Este processo envolve a determinação da velocidade crítica de depósito e o dimensionamento da vazão com base nos parâmetros característicos do sistema. Foi utilizada a equação (3), descrita no tópico 3.3.

$$Q_{\min} = A * Vd \quad Eq.3$$

Para o cálculo, foi adotado os parâmetros a seguir:

(Q_{min}) = vazão mínima (m³/s)

(A) = área da seção transversal do duto (m^2) – $0,04m^2$

(Vd) = velocidade crítica de depósito (m/s) – $1,60m/s$

Ao final dos cálculos, foi elaborada uma tabela para comparar os resultados. Os cálculos foram realizados exclusivamente para o tubo 1, que apresenta sinais de desgaste. O tubo em operação já possui as variáveis de processo em andamento, como pressão, temperatura, densidade da polpa e a composição real dos sólidos, o que possibilita uma análise mais precisa, refletindo o comportamento real da polpa no duto.

4.3.2. Caracterização microestrutural

4.3.2.1. Análise metalográfica

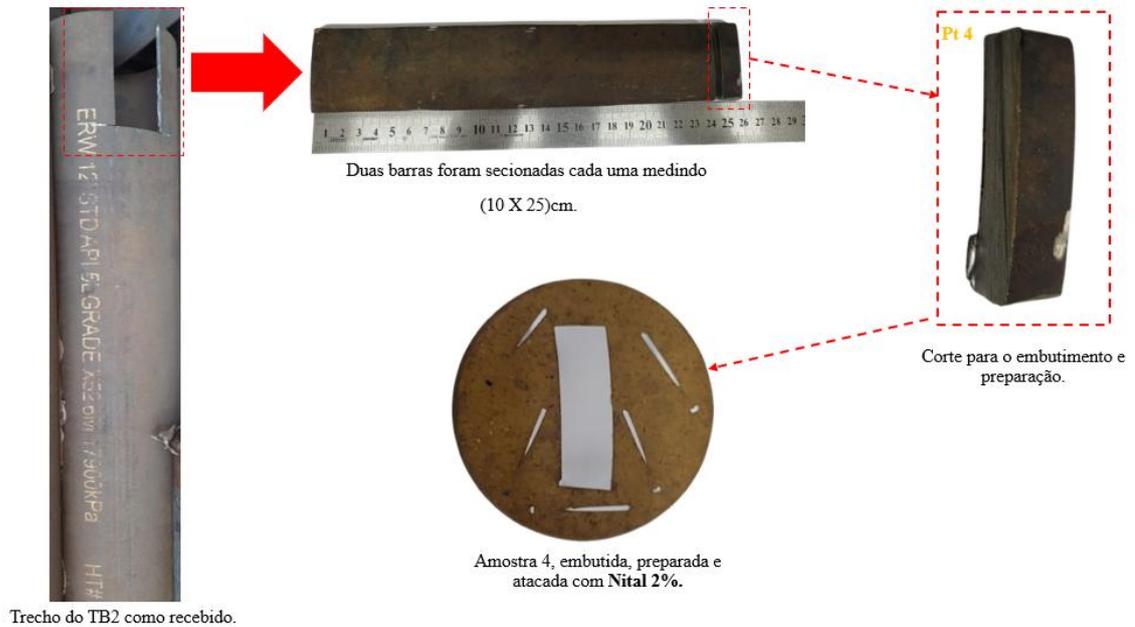
Para a análise microscópica do material, foi realizado um corte em seção transversal nas amostras desgastada (classificadas como TB1) na região superior do tubo e na região da trinca. Na amostra não desgastada, (classificadas como TB2) foi feito um corte na região superior do tubo distante da solda longitudinal, com intuito de analisar apenas o metal base, conforme ilustrado nas figuras 16 e 17, respectivamente. As amostras foram embutidas a quente, lixadas com lixas de granulometria #120, #240, #320, #400, #600, #1200 e #2000 mesh e polidas em pasta de diamante com granulometria de $3\mu m$. Após o polimento, as amostras foram atacadas com solução de Nital 2%. Após o ataque, as mesmas foram levadas ao microscópio óptico *Micron Scientific* para a realização do ensaio, o qual foi realizado com ampliações de 100x, 200x e 500x e as fotos de microestrutura foram registradas utilizando o software *Capture 2.0*.

Figura 16 - Fotomontagem das regiões de corte e preparação das amostras -TB1



Fonte: Próprio autor, 2025.

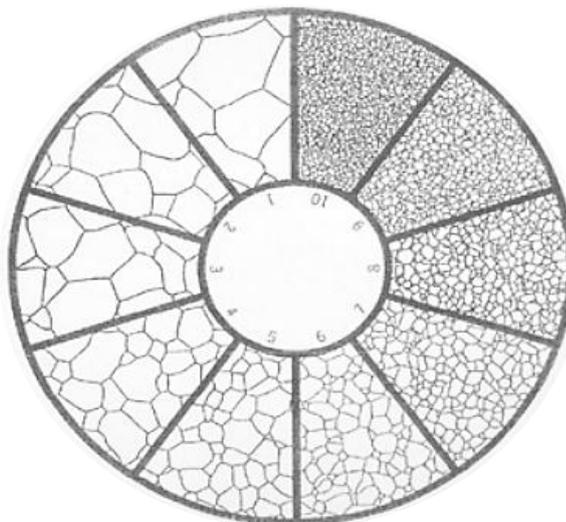
Figura 17 - Fotomontagem das regiões de corte e preparação das amostras -TB2



Fonte: Próprio autor, 2025.

Logo em seguida, a medição do tamanho de grão foi realizada pelo método comparação visual, sendo uma análise subjetiva para determinação do tamanho de grão. Esse método consiste na análise da microestrutura de uma amostra metalográfica polida e atacada quimicamente, comparando-a com padrões gráficos conforme figura 18 de referência previamente estabelecidos pela norma ASTM E112: “*Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*”.

Figura 18 - Gráfico de referência estabelecida pela norma ASTM E112



Fonte: ASTM E112.

4.3.2.2. *Difração de raios X (DRX)*

O ensaio de difração de raios X (DRX) foi realizado para caracterizar e comparar as fases das amostras retiradas dos dois tubos: um tubo desgastado (Tubo 1) e um tubo sem desgaste aparente (Tubo 2). As amostras para análise foram retiradas de duas regiões específicas: do (Tubo 1), que apresenta desgaste significativo devido ao uso em condições operacionais e do (Tubo 2), que não sofreu desgaste aparente, a figura 19, ilustra as regiões e as dimensões de cada corpo de prova para ensaio. O objetivo principal dessa análise foi investigar se houve alguma transformação de fase entre as amostras com e sem desgaste, o que poderia indicar alguma possível contaminação do aço API 5L. Para o ensaio de DRX, primeiramente as amostras foram decapadas para garantir que as camadas externas das amostras, que poderiam estar contaminadas fossem eliminadas.

O equipamento utilizado foi um difratômetro de raios X da marca Shimadzu modelo XRD 7000, com radiação Cu K α . O experimento foi conduzido com um intervalo de ângulo de varredura de 40° a 120° e com um passo de 0,02°, com um tempo de contagem de 2 segundos por passo.

Figura 19 - Amostras para os ensaios de DRX e FRX dos tubos 1 e 2



Fonte: Próprio autor, 2025.

4.3.2.3. *Fluorescência de raios X (FRX)*

O ensaio de fluorescência de raios X (FRX) foi conduzido com o objetivo de realizar uma análise da composição química das amostras retiradas dos dois tubos: um tubo desgastado (Tubo 1) e um tubo sem sinais de desgaste (Tubo 2). A análise foi fundamental para identificar alterações na composição química do material em função do desgaste. Para a realização do ensaio, foi utilizado um analisador por fluorescência de raios X Shimadzu modelo EDX-720, operando sob vácuo. A fonte de raios X foi o Rh, ajustado para uma tensão de 50 kV.

4.3.3. *Caracterização Mecânica*

4.3.3.1. *Ensaio de Microdureza Vickers*

Para a caracterização mecânica das amostras, tanto a não desgastada (TB 1) quanto a desgastada (TB 2), foram realizados ensaios de microdureza Vickers. O ensaio foi conduzido em um microdurômetro Shimadzu HMV-2T, utilizando uma carga de 200 gf e um tempo de indentação de 15 segundos. As amostras AM1, AM2, AM3 e AM4 foram previamente preparadas por lixamento, polimento e ataque químico com a solução de Nital a 2%, os mesmos procedimentos adotados para a análise microestrutural descritos no item 4.3.1.1.

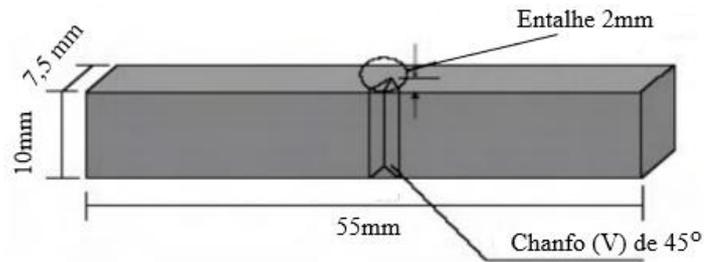
Para os pontos de dureza Vickers do TB1 e TB2, foram realizadas 12 medições em 4 amostras na secção transversal, após a conclusão dos testes, os dados foram compilados e organizados em uma tabela.

4.3.3.2. *Ensaio de Impacto*

Os ensaios de impacto foram realizados com o objetivo de avaliar a resistência ao impacto dos corpos de prova. Para o TB1, os ensaios foram executados na máquina de impacto PW 30/15 da Wolpert Amsier, identificação 41431, localizada no laboratório LabMAT, localizado no SENAI de Itaúna. Já para o TB2, os ensaios ocorreram na máquina do DEMAT, fabricante Arotec modelo JB-W300A, em ambos os casos, os corpos de prova foram confeccionados do mesmo modo, os corpos de prova foram usinados em um torno CNC, respeitando as dimensões padronizadas de 7,5 mm × 10 mm × 55 mm, conforme a norma ASTM A370. O entalhe tipo "V" foi produzido por meio de fresamento com ferramenta específica, apresentando profundidade de 2 mm, e o chanfro com ângulo de 45°. A necessidade de se utilizar duas máquinas ocorreu devido à indisponibilidade da máquina utilizada para o ensaio

nas amostras TB1 para executar os ensaios na condição TB2. Cada condição experimental (desgastado e sem desgaste) foi testada com três corpos de prova (CP), conforme especificado pela norma ASTM A 370, usando máquinas com capacidade máxima de absorção de energia de 300J e em temperatura ambiente, aproximadamente 22°C. As dimensões dos corpos de prova estão ilustradas na figura 20.

Figura 20 - Dimensões do corpo de prova ensaio de impacto



Fonte: Próprio autor, 2025.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1.1. Cálculo da velocidade crítica de deposição e vazão mínima

De acordo com os parâmetros utilizados no tópico 4.3.1, os resultados obtidos constam na tabela 5.

Tabela 5 - Resultados dos cálculos Vd e Qmin

Amostra	Vd	Qmin
TB1	1,60 m/s	0,06m ³ /s

Fonte: Próprio autor, 2025

De acordo com, Shook e Roco, 1991, velocidades críticas para dutos transportando polpas de partículas finas (diâmetro médio < 100 μm) em fluidos de densidade moderada (como polpas fosfáticas) variam de 1,0 a 2,0 m/s. O valor obtido 1,6 m/s está alinhado com esses intervalos, sugerindo que o transporte no duto ocorre em um regime adequado, prevenindo sedimentação de partículas finas. Para o valor de vazão mínima, 0,06 m³/s está dentro das faixas indicadas pela literatura.

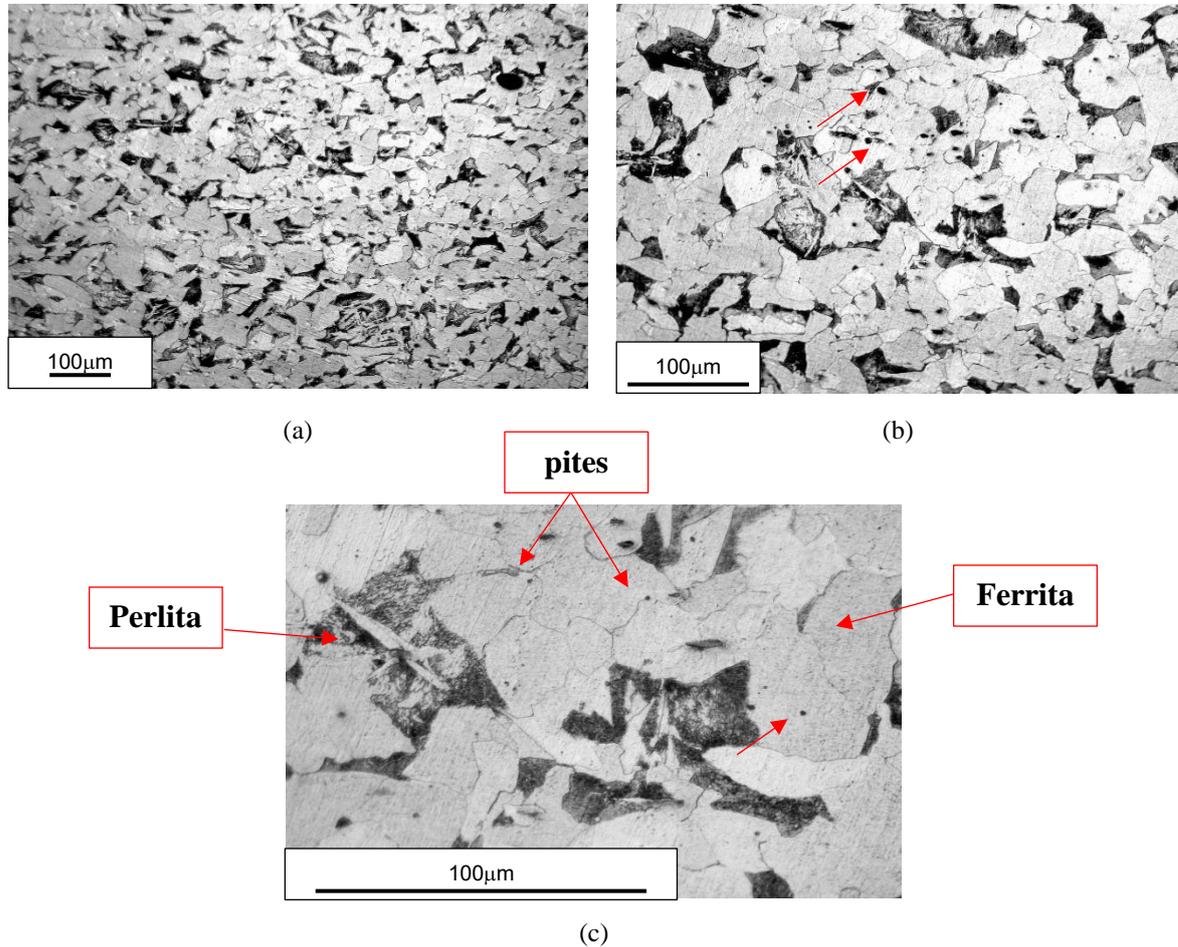
Segundo Shook e Roco, 1991, dutos com diâmetros de 0,2 m transportando polpas geralmente operam com vazões mínimas na faixa de 0,05 a 0,10 m³/s, dependendo da concentração volumétrica da suspensão e do tamanho das partículas. O valor de 0,06 m³/s está dentro das faixas indicadas pela literatura.

5.1.2. Caracterização microestrutural

No ensaio de caracterização microestrutural, observou-se que o Tubo 1 (TB1) apresentou microestrutura típica de um aço API 5L X52, consistindo de ferrita e perlita. Na amostra 1, retirada no ponto 1, na região interna do tubo distante da fratura, conforme ilustrado na Figura 16 do item 4.3.2.1, foram identificados pites em sua microestrutura (figura 21). Esse fenômeno também pode ser observado na figura 22, que evidencia corrosão nas bordas superiores e inferiores, além de alterações morfológicas, como a degradação da matriz de ferrita e a dissolução parcial das áreas perlíticas. Esses resultados indicam a presença de mecanismos de corrosão localizados, que podem estar associados a processos eletroquímicos devido ao ambiente operacional do duto e corrosão por pites (vide setas dispostas na figura 22).

A análise comparativa entre as regiões indica que o impacto do desgaste corrosivo está concentrado em pontos específicos, sugerindo uma possível interação entre fatores como fluxo turbulento e composição química do fluido em contato.

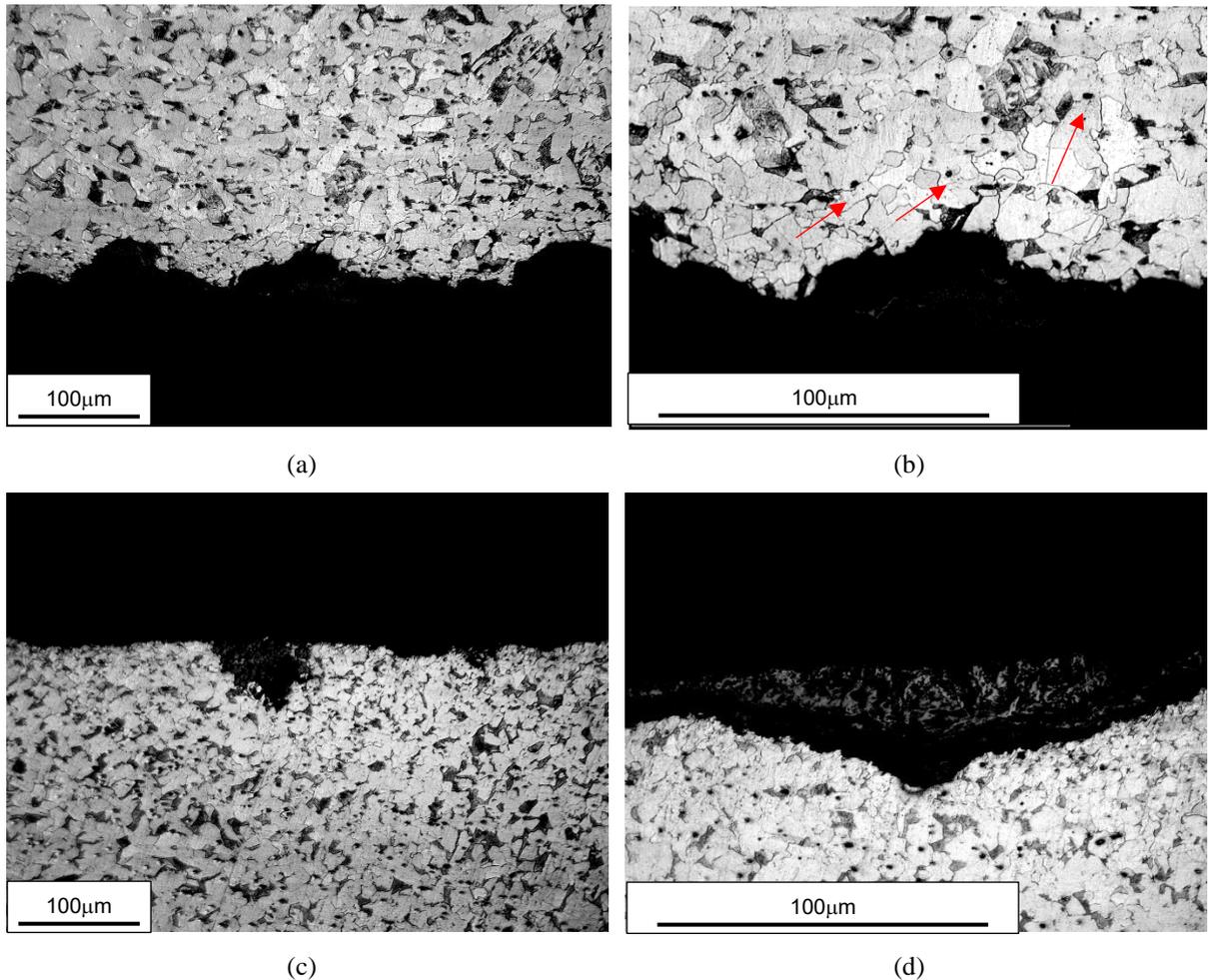
Figura 21 - Microestrutura do ponto 1 – TB1 com diferentes ampliações



- (a) Microestrutura do metal base composta por ferrita e perlita;
- (b) Presença de pites superficiais;
- (c) Presença de pites superficiais;

Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 22 - Microestrutura do ponto 1 – TB1 – Corrosão nas bordas com diferentes ampliações



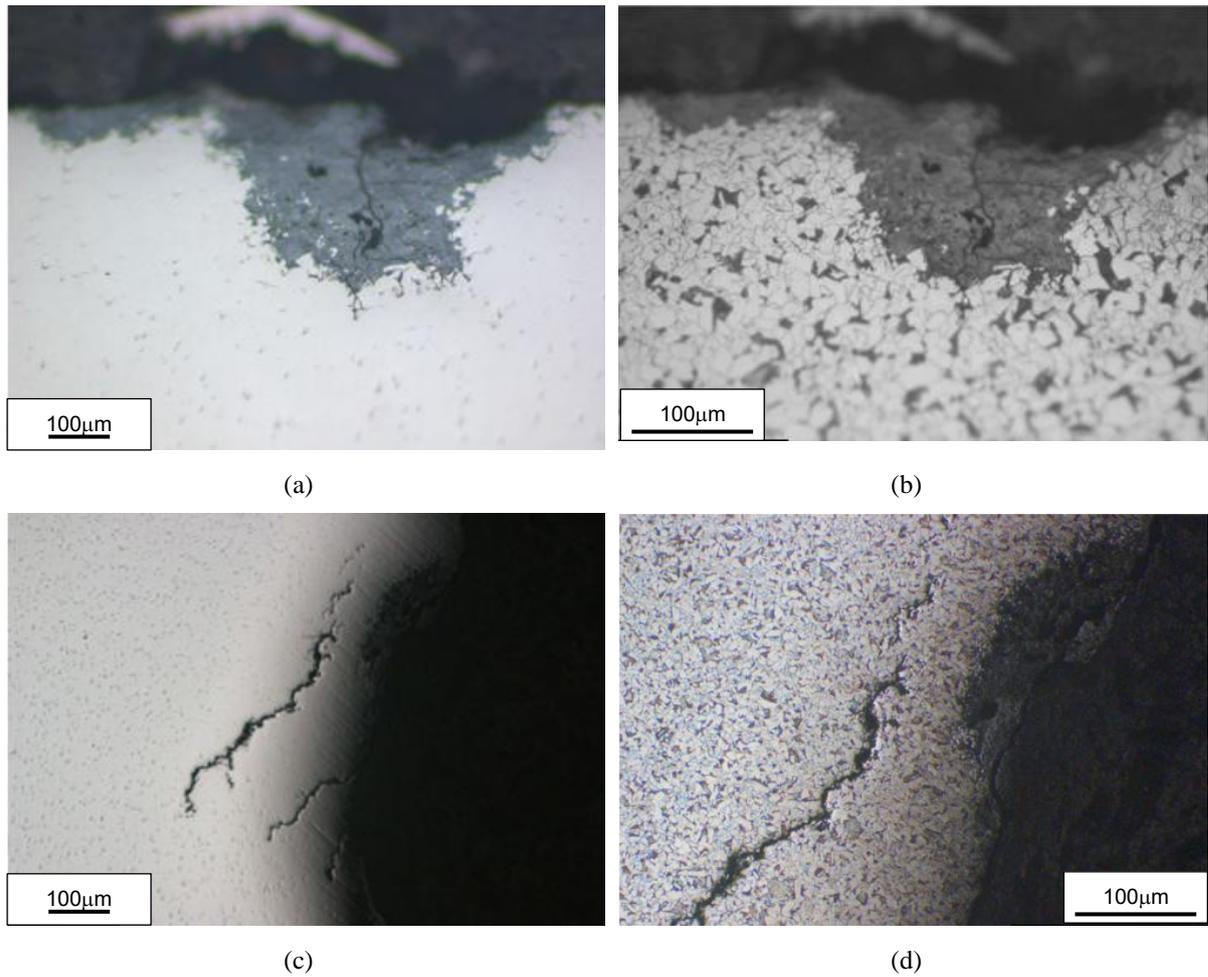
- (a) Corrosão na borda interna;
- (b) Corrosão na borda interna;
- (c) Corrosão na borda externa;
- (d) Corrosão na borda externa.

Fonte: Próprio autor, 2025.

No ponto 2, localizado na região da fratura e próxima ao desgaste conforme indicado na Figura 16 do item 4.3.2.1, a análise microestrutural revelou a presença de trincas ramificadas na superfície do material. Essas trincas, evidenciadas na Figura 23, se propagam de forma transangular e ramificadas indicando um processo de nucleação e crescimento favorecido por tensões concentradas e possíveis interações com o ambiente corrosivo, o que sugere a ação de um segundo mecanismo de corrosão, a corrosão sob tensão.

A microestrutura nessa região ainda apresentou características típicas do aço API 5L X52, com ferrita e perlita bem definidas, embora deformadas localmente devido ao mecanismo de fratura.

Figura 23 - Micrografia da amostra retirada no ponto 2 mostrando trincas ramificadas na superfície

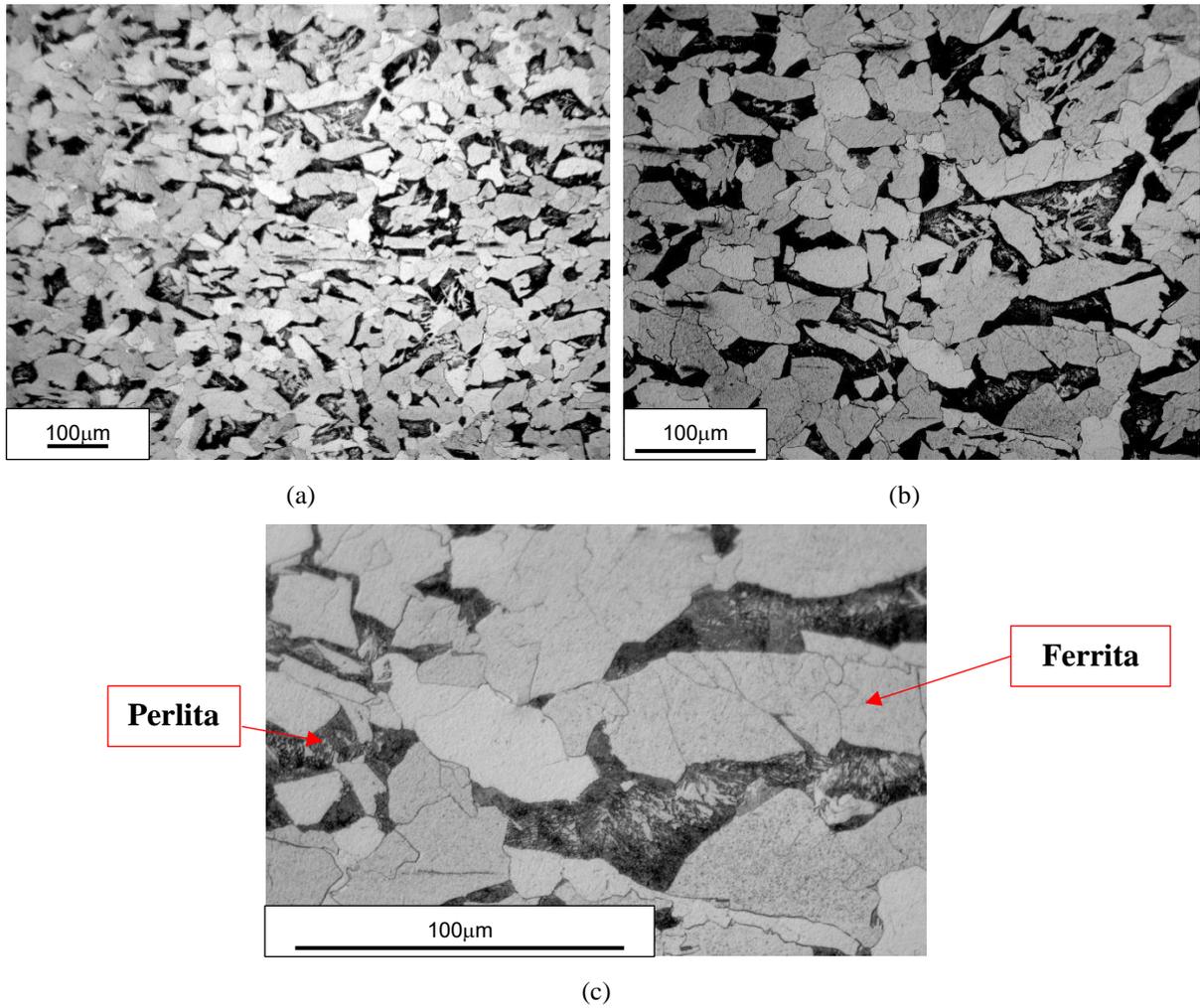


- (a) Trincas ramificadas;
- (b) Trincas ramificadas;
- (c) Trincas ramificadas;
- (d) Trincas ramificadas.

Fonte: Próprio autor, 2025.

No ponto 3, situado em uma região distante da fratura e próximo ao centro do desgaste, indicado na Figura 16 do item 4.3.2.1, apresentou no seu núcleo microestrutura típica do aço API 5L X52, composta por ferrita e perlita, sem a presença de pites, conforme figura 24.

Figura 24 - Microestrutura do ponto 3 – TB1 – com diferentes ampliações



(a) Microestrutura do metal base composta por ferrita e perlita.

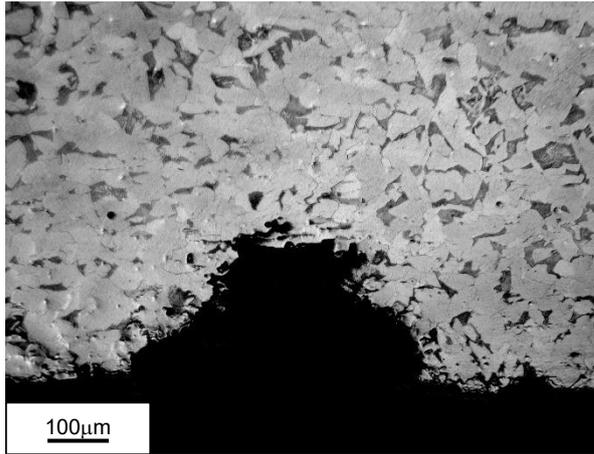
(b) Ampliação distintas.

(c) Ampliação distintas.

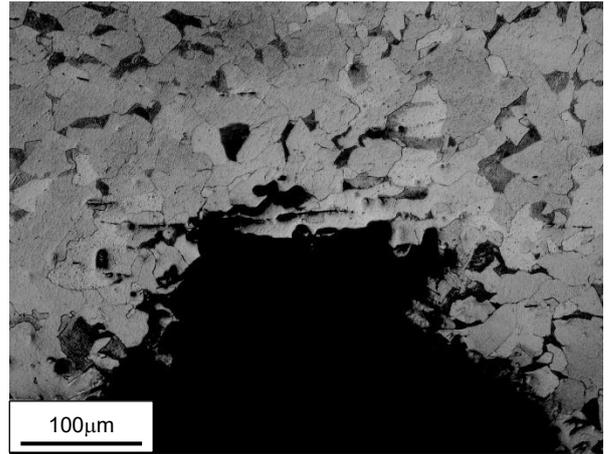
Fonte: Próprio autor, 2025.

Conforme a Figura 25, as áreas corroídas indicam que o ataque corrosivo está restrito às superfícies externa e interna, afetando principalmente as bordas expostas, enquanto o núcleo do material preserva suas propriedades típicas.

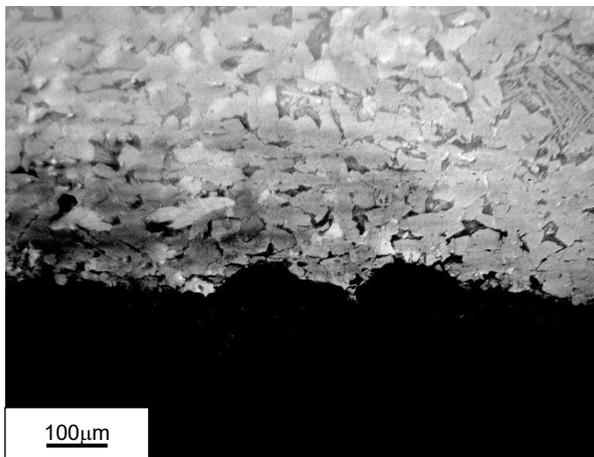
Figura 25 – Micrografia do ponto 3, evidenciando corrosão nas bordas inferior e superior



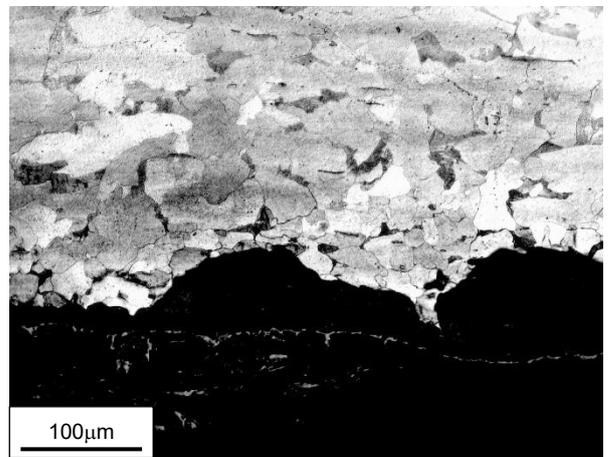
(a)



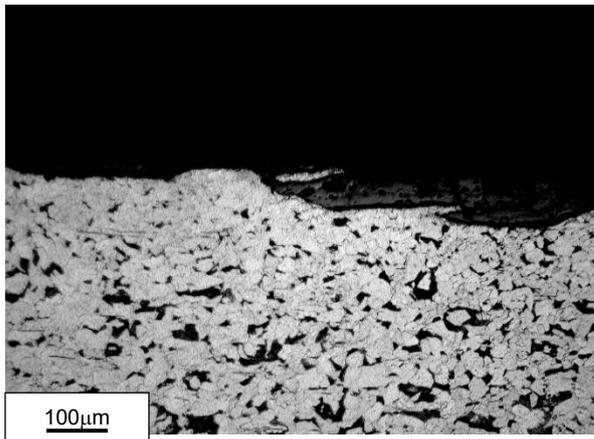
(b)



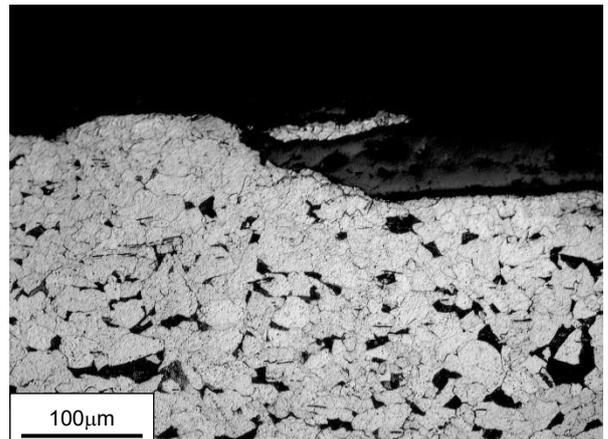
(c)



(d)



(e)

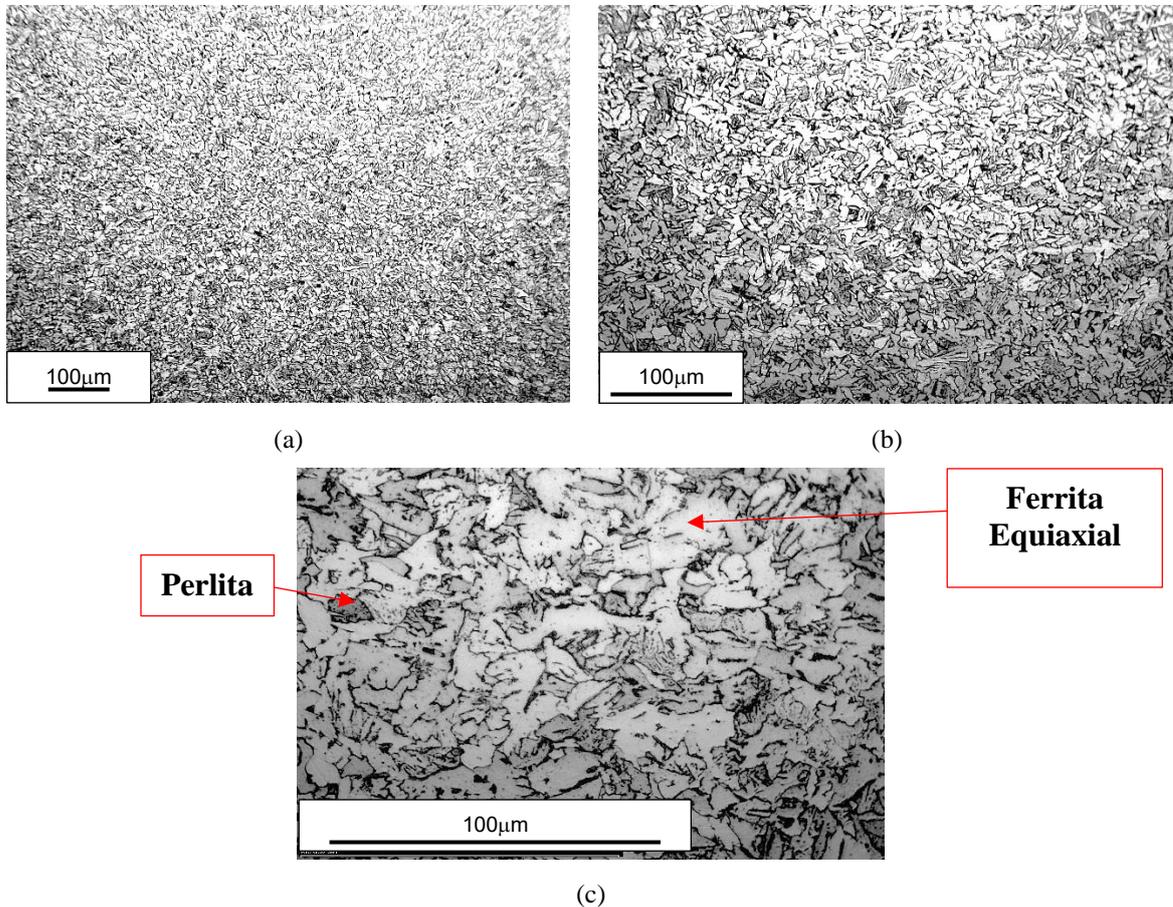


(f)

- (a) Corrosão na borda interna;
- (b) Corrosão na borda interna;
- (c) Corrosão na borda interna;
- (d) Corrosão na borda externa;
- (e) Corrosão na borda externa.

A figura 26, ilustra a microestrutura da amostra 4 do material sem sinais de desgaste (TB2), composta por ferrita equiaxial (regiões claras) e perlita (Regiões escuras).

Figura 26 - Micrografia do ponto 4 – TB2 – com diferentes ampliações



- (a) Microestrutura composta por ferrita equiaxial e perlítica;
- (b) Ampliação distinta;
- (c) Ampliação distinta;

Fonte: Próprio autor, 2025.

A análise microestrutural das amostras de aço API 5L X52 apresentou diferenças significativas entre os tubos desgastado e não desgastado. No tubo 1 (desgastado), a microestrutura observada era predominantemente ferrita e perlítica, além de apresentar trincas ramificadas, pites e bordas com sinais de corrosão. Já no tubo não desgastado, a microestrutura é composta por ferrita equiaxial e perlita, evidenciando diferenças na morfologia da ferrita entre as amostras.

No entanto, não foi observada transformação de fases entre as condições analisadas, sugerindo que as alterações estruturais estão relacionadas a processos térmicos distintos e não a uma mudança significativa na composição de fases.

Com relação à medição do tamanho de grão, utilizando o método comparativo conforme a norma ASTM E112, foi identificado que as amostras do Tubo 1 apresentaram um tamanho de grão padrão ASTM na faixa 5/6, enquanto as do Tubo 2 estavam na faixa 8/9. Na microestrutura típica do aço API 5L X52, o tamanho de grão é geralmente classificado como 6/7, o que indica um grão médio, característico de um material com boa combinação de resistência e ductilidade. A diferença no tamanho de grão indica que, embora ambos os tubos sejam do mesmo aço, eles não estavam na mesma condição inicial. A simples exposição ao solo como meio de transporte da polpa não seria suficiente para alterar o tamanho de grão do aço API 5L X52. Esse contraste pode estar relacionado às variações no processo de fabricação, como diferenças na taxa de resfriamento, temperatura, tempo de encharque, tratamentos térmicos e presença de elementos químicos, como manganês (Mn) que pode promover o refinamento da microestrutura ferrítica do grão, influenciando diretamente o tamanho final dos grãos do aço que influenciaram a microestrutura final dos materiais.

5.1.3. *Difração de raios X (DRX)*

Na figura 27 é observado o difratograma obtido para o aço API 5Lx52 amostra 1 do tubo 1 que apresentou sinais de desgaste. Já na figura 28 o difratograma da amostra 2 do tubo 2 sem sinais de desgastes. A análise dos padrões de DRX das amostras 1 e 2 do aço API 5L X52 apresentou picos significativos relacionados à fase ferrítica, evidenciando a predominância dessa fase na microestrutura do material.

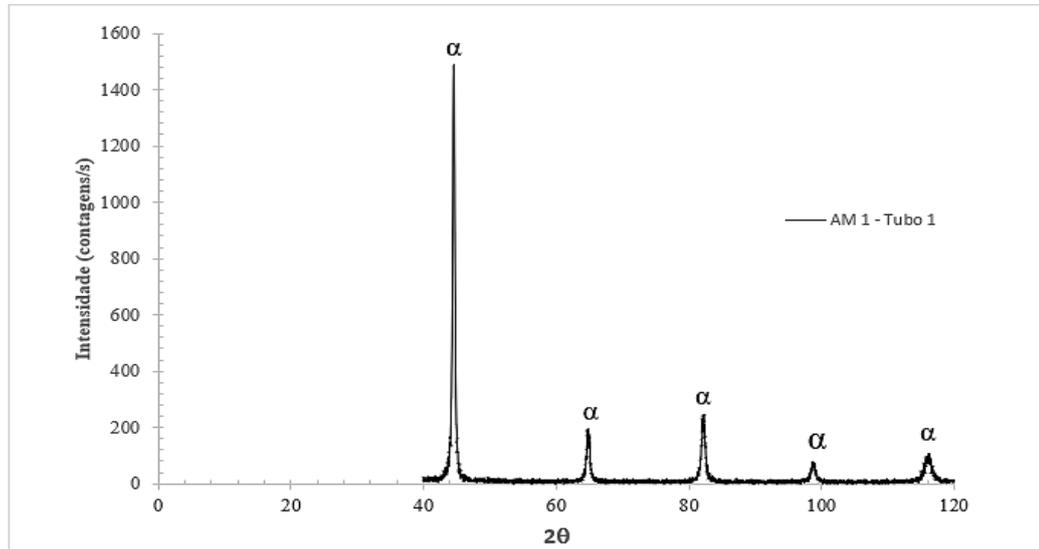
Os picos mais intensos foram observados em torno de $2\theta = 44^\circ$, 65° e 82° , valores típicos da ferrita. Essa predominância está de acordo com as propriedades esperadas para este tipo de aço, amplamente utilizado em dutos devido à sua ductilidade, resistência ao impacto e soldabilidade.

Não foram detectados picos característicos da cementita nas análises realizadas. Conforme discutido por Gharibshahiyan *et al.*, 2015, a ausência de picos de cementita em padrões de DRX pode ocorrer devido à sobreposição dos picos mais intensos da ferrita, que acabam mascarando as fases minoritárias. A cementita pode estar presente em quantidades reduzidas ou distribuída em forma extremamente fina e dispersa na matriz ferrítica.

Outro fator que pode ter influenciado a ausência de picos de cementita foi o tempo reduzido do ensaio de DRX. Ensaios com tempos curtos podem comprometer a detecção de fases secundárias, especialmente aquelas em baixas concentrações, pois a intensidade dos picos

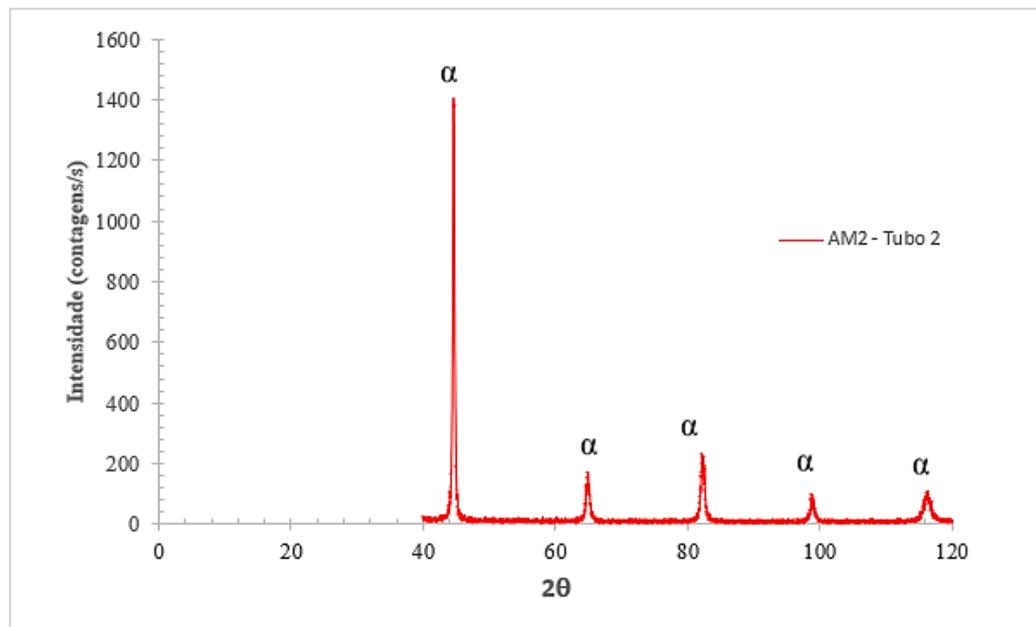
de difração gerados por essas fases pode ser insuficiente para ultrapassar o limite de detecção do equipamento.

Figura 27 - Difratrograma da amostra 1 – Tubo 1 (com sinais de desgaste)



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 28 - Difratrograma da amostra 2 – Tubo 2 (sem sinais de desgaste)

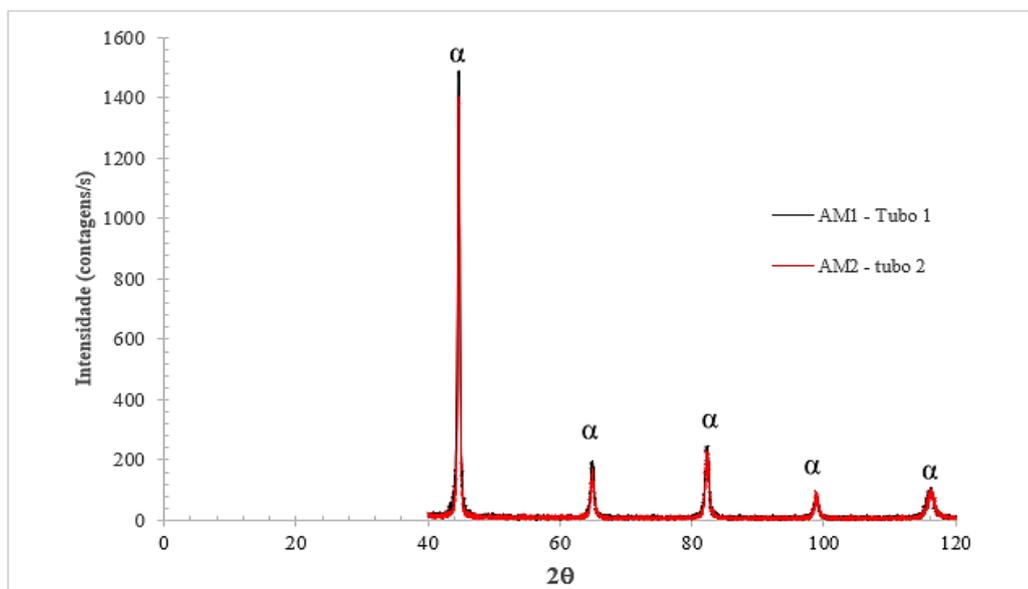


Fonte: Próprio autor, 2025.

No difratograma da figura 29, ao comparar as amostras (1 e 2), foi observada uma diferença sutil na intensidade dos picos de ferrita nos ângulos $2\theta = 44^\circ$, 65° e 82° . A amostra 2 sem sinais de desgaste apresentou picos com leve redução na intensidade em relação à amostra desgastada. Essa variação na intensidade dos picos pode estar relacionada à orientação

cristalográfica dos grãos ou à leve modificação no estado de tensão residual gerado pelo desgaste, mas não implica em alterações nas fases presentes.

Figura 29 - Difratrograma das amostras 1 e 2



Fonte: Próprio autor, 2025.

5.1.4. Fluorescência de raios X (FRX)

A análise por Fluorescência de Raios-X (FRX) das amostras do tubo 1 (desgastada) tubo 2 (sem sinais de desgaste) apresentou diferenças importantes na composição química, conforme a conforme as tabelas 6 e 7, evidenciando os efeitos do desgaste e da corrosão associados ao transporte de polpa fosfática do tubo 1.

Tabela 6 - Resultados de análises de FRX da amostra do tubo 1 (amostra desgastada)

Elementos	Concentração [%]	Incerteza de medição [%]
Fe	98,089	0,072
Mn	0,937	0,008
Si	0,241	0,008
Al	0,238	0,017
Cr	0,167	0,004
Cu	0,075	0,004
Hg	0,073	0,005
Nb	0,061	0,002
P	0,058	0,004
S	0,031	0,002
Mo	0,029	0,001

Fonte: Próprio autor, 2025.

Tabela 7 - Resultados de análises de FRX da amostra do tubo 2 (sem sinais de desgaste)

Elementos	Concentração [%]	Incerteza de medição [%]
Fe	97,382	0,071
Mn	1,218	0,009
Ca	0,926	0,008
Si	0,221	0,009
Al	0,22	0,018
S	0,033	0,002

Fonte: Próprio autor, 2025.

Os principais elementos do aço carbono API 5L X52 são, ferro (Fe) como base (>97%), carbono (C) em teores de 0,16% a 0,28% para resistência e dureza, e manganês (Mn) (1,00% a 1,40%) para resistência mecânica e ao impacto. Outros elementos como silício (Si) (0,15% a 0,45%) atuam na desoxidação, enquanto fósforo (P) e enxofre (S), mantidos abaixo de 0,03%, evitam fragilidade e corrosão. Pequenas quantidades de cromo (Cr), molibdênio (Mo) e nióbio (Nb) podem ser adicionadas para melhorar resistência ao desgaste, tenacidade e refinamento do grão.

Conforme a Tabela 6, o tubo 2, sem sinais de desgaste, apresentou resultados de FRX em conformidade com a especificação do material API 5L X52, destacando-se a presença de cálcio (Ca) em um percentual de 0,926%. Este elemento, juntamente com o enxofre, pode ser residual do processo de fabricação ou tratamento térmico do aço.

Para o tubo com sinais de desgaste, conforme tabela 7, a presença de enxofre 0,031% e fósforo 0,058% pode estar associada à interação química entre o aço e a polpa fosfática. O fósforo na amostra desgastada é relevante, pois pode ser um indicativo de produtos secundários de corrosão, como fosfatos de ferro, formados durante o ataque químico por íons fosfato. Esses compostos podem fragilizar a superfície do material e intensificar o desgaste erosivo-corrosivo.

A polpa fosfática contém partículas sólidas em suspensão que geram desgaste erosivo na superfície interna do duto e presença de íons fosfato aumenta a condutividade do meio, favorecendo reações corrosivas. O desgaste erosivo remove as camadas protetoras do material, expondo-o ao ataque químico contínuo, o que acelera a remoção seletiva de elementos de liga, como observado nos resultados de FRX.

Essa interação erosiva-corrosiva é intensificada pelos ciclos operacionais, que promovem a renovação constante do meio corrosivo e aumentam a taxa de desgaste. Estudos

de Zhang et al. (2020) mostram que a combinação de desgaste erosivo e corrosivo em ambientes ricos em fosfatos pode reduzir a vida útil de equipamentos metálicos.

5.1.5. Ensaios de Microdureza Vickers

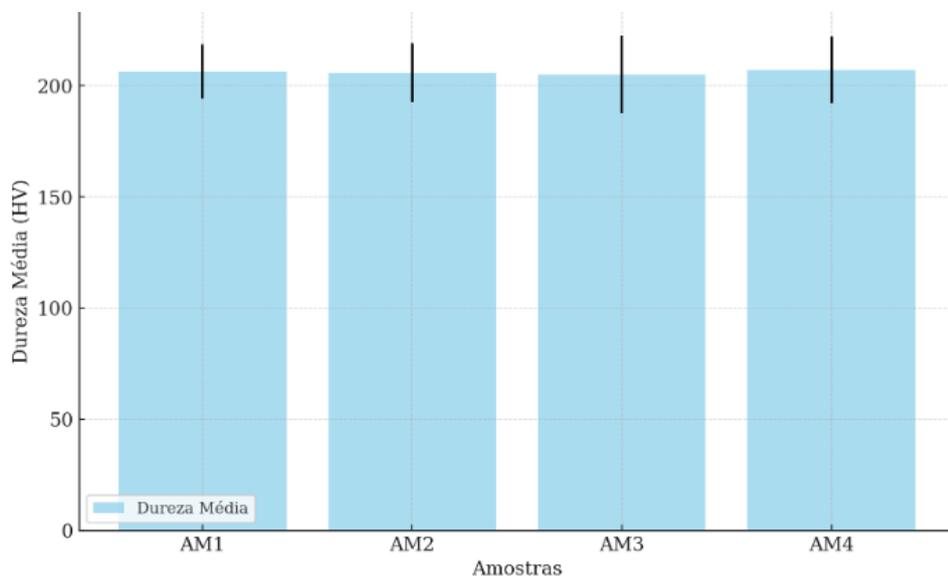
Na Tabela 8 são apresentados os dados coletados durante os ensaios de Microdureza a AM1 indica a região interna do tubo 1, AM2 região próxima a fratura, AM3 próxima ao centro de desgaste e por fim, a AM4 retirada do tubo 2 que não apresenta sinais de desgaste

Tabela 8 - Valores de dureza das amostras 1, 2, 3 e 4

Amostras	AM1	AM2	AM3	AM4
Local de retirada da amostra	Região interna	Região da fratura	Próximo ao centro de desgaste	Sem sinais de desgaste
Dureza média	206,3 HV	205,8 HV	204,9 HV	207,02 HV
Desvio Padrão	12,23 HV	13,38 HV	17,41 HV	15,10 HV

Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 30 - Gráfico de dureza média das amostras 1, 2, 3 e 4



Fonte: Próprio autor, 2025.

Os resultados de dureza das amostras 1, 2, 3 e 4 apresentaram uma média conforme a Tabela 8 e figura 30. Observou-se que as amostras 1, 2 e 3 do tubo com sinais de desgaste (Tubo 1) apresentaram valores de dureza ligeiramente menores em comparação à amostra 4 do tubo sem sinais de desgaste (Tubo 2). Esse comportamento pode estar associado às condições de

operação do duto, que podem ter influenciado a microestrutura e as propriedades mecânicas do material.

Além disso, é importante considerar que a condição inicial do aço API 5L X52 no estado como recebido (sem desgaste) pode não ser exatamente a mesma do estado inicial do aço que sofreu desgaste, o que também pode ter contribuído para a variação nos valores de dureza.

Segundo a norma API 5L X52, o limite de resistência à tração deste material é de 455 MPa. Baseando-se na norma ASTM A370, a dureza mínima correlacionada a este limite de resistência é de 137 HV. Isso indica que as amostras avaliadas possuem uma dureza superior ao valor mínimo especificado.

Segundo Godefroid *et al.*, (2017), tratamentos térmicos adequados podem otimizar as microestruturas do aço API 5L X52, melhorando a tenacidade à fratura e as propriedades de tração e dureza.

5.1.6. Ensaios de Impacto

Os resultados obtidos para a energia de impacto das amostras desgastada e não desgastada do aço API 5L X52 apresentaram uma redução significativa na capacidade do material de absorver energia após o desgaste. A amostra desgastada apresentou valores médios de energia de impacto de 32,3 J, enquanto a amostra não desgastada obteve uma média de 95,0 J, conforme tabela 9 indicando uma redução de aproximadamente 66% na energia absorvida.

Essa redução significativa pode ser explicada pelos mecanismos de desgaste que alteram a microestrutura do aço. Estudos como o de Santos *et al.* (2020) indicam que o desgaste abrasivo em materiais metálicos tende a introduzir descontinuidades na superfície, como microtrincas e cavidades, que atuam como concentradores de tensão.

No caso do aço API 5L X52, a presença de desgaste é frequentemente associada ao contato contínuo com polpas abrasivas, como apontado por Oliveira *et al.* (2018). Esses materiais particulados promovem a remoção progressiva de material superficial, expondo o aço a condições mais severas de fragilização. Como resultado, a resistência ao impacto é comprometida, tornando o material mais suscetível à fratura.

Outro ponto relevante é a variação observada nos valores de energia de impacto da amostra não desgastada (75,1 J a 110,2 J). Essa dispersão pode estar associada à heterogeneidade microestrutural do aço, como variações no tamanho de grão e na composição

química, conforme descrito por Callister e Rethwisch (2021). Essas diferenças intrínsecas do material influenciam a maneira como a energia é absorvida durante o impacto, mesmo em condições ideais.

Tabela 9 - Valores de energia absorvida no ensaio de impacto

Amostra	Teste 1 (J)	Teste 2 (J)	Teste 3 (J)	Média (J)	Desvio padrão
TB1	35	30	32	32,3	1,8
TB2	99,8	110,2	75,1	95	12,7

Fonte: Próprio autor, 2025.

6. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo permitiram compreender os mecanismos de desgaste e as alterações microestruturais no aço API 5L X52 utilizado no transporte de polpa. A análise da vazão mínima e da velocidade crítica indicaram que esses parâmetros estavam adequados à operação dos dutos, não sendo considerado variável que afetou o desgaste dos mesmos.

A caracterização microestrutural mostrou que o tubo desgastado apresentou corrosão localizada e trincas ramificadas, sugerindo degradação por corrosão sob tensão. Análises por difração de raios X confirmou a presença da fase ferrita, condição essa que não se alterou entre os dutos com e sem desgaste. Já a fluorescência de raios X indicou aumento nos teores de fósforo e enxofre, reforçando a influência do meio corrosivo no desgaste do duto de aço API 5L X52. A análise de microdureza Vickers mostrou que o desgaste e a corrosão afetaram a superfície do material sem comprometer significativamente sua dureza global.

Os ensaios de impacto evidenciaram uma diferença de aproximadamente 66% na capacidade de absorção de energia da amostra desgastada, indicando fragilização do material. Essa perda de resistência está associada ao mecanismo de desgaste corrosivo-abrasivo, no qual partículas sólidas removem progressivamente a superfície do aço, enquanto a corrosão acelera esse processo, tornando o material mais suscetível à fratura.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDU, M. T.; KHALIFA, W.; ABDELRAHMAN, M. S. **Investigation of erosion-corrosion failure of API X52 carbon steel pipeline**. 2023.

AKSELTEN, O. **Advances in high-strength low-alloy steels**. *Metallurgical Transactions A*, v. 21, n. 7, p. 1745-1752, 1990.

ALAM, T.; ISLAM, M. A.; FARHAT, Z. N. **Slurry erosion of pipeline steel: effect of velocity and microstructure**. *Wear*, [s.l.], 2015. DOI: 10.1115/1.4031599.

API. **API 5L X52: Specification for Line Pipe**. 2. ed. Houston, 2009.

ASTM. **ASTM E112 – Standard Test Methods for Determining Average Grain Size**.

BLANCO, A.; HALLEN, J.M.; NGUYEN, T.S.; LE MANH, T. **Influence of crystallographic texture on susceptibility to stress corrosion cracking mechanism of API 5L X52 steel for sour service**. [Year].

CALLISTER, W. D. Jr. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. Wiley, 2018.

CHEN, W. **The mechanical behavior of pipeline steels**. *Materials Science and Engineering A*, v. 102, p. 57-64, 1984.

CLARK, H. M. **Particle Velocity and Size Effects in Laboratory Slurry Erosion Measurements OR. Do You Know What Your Particles are Doing**. *Tribology International*, v. 35, n. 10, p. 617–624, 2002.

CONTRERAS, A.; QUEJ-AKÉ, L. M.; LIZÁRRAGA, C. R.; PÉREZ, T. **The role of calcareous soils in SCC of X52 pipeline steel**. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, v. 1766, 2015. DOI: 10.1557/opl.2015.416.

ENGENHEIRO DE MATERIAIS. **Desgaste e os seus mecanismos**. 3 nov. 2017. Disponível em: <https://engenheirodemateriais.com.br/2017/11/03/desgaste-e-os-seus-mecanismos/>. Acesso em: 8 dez. 2024.

FONTANA, M. G. **Corrosion Engineering**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1986. 556 p.

FORSYTH, P. J. **Proceedings of the Crack Propagation Symposium**. Cranfield: The College of Aeronautics, 1, 76–94, 1962.

FURST, O. **Mineroduto, o que é isto, para quê serve?** 2018. Disponível em: <https://bibocaambiental.blogspot.com/2018/04/mineroduto-o-que-e-isto-para-que-serve.html>. Acesso em: 17 mai. 2023.

GHARIBSHAHIAN, E.; HONARBAKHSR RAOUF, A.; PARVIN, N. **Microstructural evolution in friction stir welded API 5L-X52 steel**. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, v. 2, n. 11, nov. 2015. DOI: 10.17148/IARJSET.2015.21114.

HOUSECROFT, C. E.; SHARPE, A. G. **Inorganic Chemistry**. 2. ed. Reino Unido: Pearson Education, 2005. 949 p.

IMLAU, J. **Influence of niobium in low-alloy steels for pipelines**. *Journal of Materials Science*, v. 42, n. 5, p. 1345-1352, 2007.

JAVAHERI, V.; PORTER, D.; KUOKKALA, V.-T. **Slurry erosion of steel – Review of tests, mechanisms and materials**. *Wear*, v. 408-409, p. 248-273, 2018.

KORCHYNSKY, M. **Microalloyed steels for pipeline applications**. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 31, n. 4, p. 1045-1058, 2000.

LAVIGNE, O.; KOTOUSOV, A.; LUZIN, V. **Microstructural, Mechanical, Texture and Residual Stress Characterizations of X52 Pipeline Steel**. [Year].

LI, C. X. **Wear and Wear Mechanism**. The University of Birmingham, UK.

LIU, Z.; ZHANG, H. **Erosion-Corrosion Behavior of Pipeline Steels in Slurry Environments**. *Corrosion Science*, v. 164, p. 108359, 2020.

MATSUMOTO, T. **Fatigue properties of metallic materials**. *International Journal of Fatigue*, v. 57, p. 83-91, 2014.

QUEIROZ, J. O. **Análise de estabilidade de dutos rígidos submarinos sujeitos à ação de ondas e correntes marinhas**. 2011. 71 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Acesso em: 17 mai. 2023.

SCHWEIZER, S.; LEMOINE, M. **Slurry Transport in Pipelines: A Review**, 2009.

SILVA, M. M. B. da; SANTOS, M. S. S. dos; SANTOS, E. N. dos. **Utilização do mineroduto como transporte de minério alternativo**. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS, 5., 2020. Anais do V CONAPESC. Editora Realize, 2020.

SINHA, S. L.; DEWANGAN, S. K.; SHARMA, A. **A review on particulate slurry erosive wear of industrial materials: In context with pipeline transportation of mineral-slurry**. *Particulate Science and Technology*, v. 35, n. 1, p. 103-118, 2015.

SUMMER-SMITH, D.; NEALE, M. J. **Failure patterns and failure analysis - The Tribology Handbook**. 2. ed. London: Butterworth Heinemann, 1995.

WILSON, K. C.; ADDIE, G. R.; SELLGREN, A.; CLIFT, R. **Slurry transport using centrifugal pumps**. 3. ed. New York: Springer, 2006.

ZHOU, X.; ZHENG, L. **Effect of Calcium Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Steel**. Journal of Iron and Steel Research International, v. 17, n. 8, p. 55-59, 2010.

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and Wear of Materials**. [s.l.] Elsevier Science, 1987.