

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Departamento de Metalurgia

**ANÁLISE DE CAUSA RAÍZ EM FALHA DE JUNTA *LENS RING*  
DE VÁLVULA DE CONTROLE DE PRESSÃO EM INDÚSTRIA  
PETROQUÍMICA**

**João Pedro Camargo Santos**

Trabalho de Diplomação de Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Favaro Borges

Porto Alegre

2025

## CIP - Catalogação na Publicação

Camargo Santos, João Pedro  
ANÁLISE DE CAUSA RAÍZ EM FALHA DE JUNTA LENS RING  
DE VÁLVULA DE CONTROLE DE PRESSÃO EM INDÚSTRIA  
PETROQUÍMICA / João Pedro Camargo Santos. -- 2025.  
70 f.  
Orientador: Marcelo Favaro Borges.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2025.

1. Análise de falhas. 2. Análise de causa raiz. 3.  
Indústria petroquímica. 4. Junta Lens Ring. 5. Válvula  
de controle de pressão. I. Favaro Borges, Marcelo,  
orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

*“Se eu tivesse uma hora para resolver um problema, gastaria 55 minutos mergulhando em sua essência e apenas 5 minutos criando a solução.”*

*Albert Einstein*

## AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos mais sinceros às pessoas direta ou indiretamente envolvidas no meu desenvolvimento pessoal, acadêmico e profissional, que contribuíram para a realização deste trabalho. Com certeza, nada mais sou do que um reflexo de todos vocês.

À minha família, em especial aos meus pais, Marluza e Evandro, que me incentivaram desde criança a ser estudioso. Obrigado por acreditarem em mim e por me proporcionarem todos os recursos para chegar até aqui, mesmo quando as condições eram adversas.

Aos meus líderes de estágio, Eng. Marcelo Ohlweiler e Eng. Luiz Carlos Fabian Junior, por me concederem a oportunidade de estagiar e, principalmente, de aprender tanto durante esses dois anos na indústria petroquímica.

Aos Engenheiros Dirceu Vilant Rodrigues e Vinícius Jangell, por todo suporte técnico prestado durante meu período de estágio.

Ao meu orientador, Dr. Marcelo Favaro Borges, agradeço pelas orientações que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do Grupo de Análise de Falha do LAMEF, que me ajudaram durante a realização da parte prática deste estudo. Um agradecimento especial ao Dr. Márcio Medeiros de Magalhães pelo apoio e atenção dedicados.

Aos professores Dr. Antônio Vilela e Dr. Afonso Reguly, obrigado pelo suporte durante a disciplina de Trabalho de Conclusão, que foi essencial para que este estudo tomasse forma.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, meu agradecimento por ter me proporcionado a oportunidade de cursar Engenharia Metalúrgica e por ter sido um ambiente essencial para meu crescimento acadêmico e profissional.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABELAS .....	XI
LISTA DE ABREVIACÕES .....	XII
RESUMO .....	XIII
ABSTRACT .....	XIV
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1. PROCESSO DE PEBD E EVA EM REATORES TUBULARES .....	3
3.2. VÁLVULA DE CONTROLE DE PRESSÃO .....	6
3.3. JUNTAS LENS RING .....	9
3.4. MANUTENÇÃO PREDITIVA.....	10
3.5. ANÁLISE DE CAUSA RAÍZ.....	13
3.5.1. ESTUDOS DE CASO SOBRE MECANISMOS DE FALHA.....	15
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
4.1. MATERIAIS COMO RECEBIDOS .....	23
4.2. ESTUDO DA SEÇÃO A: FALHA .....	26
4.3. ESTUDO DAS SEÇÃO B: PROCESSO DE FABRICAÇÃO .....	27
4.4. ESTUDO DA SEÇÃO C: GEOMETRIA DA AMOSTRA.....	27
4.5. ESTUDO DA AMOSTRA SECUNDÁRIA: PROPAGAÇÃO DA TRINCA .....	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	29
5.1. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA PEÇA.....	29
5.2. GEOMETRIA DA JUNTA .....	34
5.3. FALHA.....	42
6. CONCLUSÕES.....	51

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	53
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma simplificado de planta de PEBD/EVA (Fonte: Adaptado de Caliani, 2005) .....	4
Figura 2 - Partes de uma válvula de controle (Fonte: Ribeiro, 1999) .....	6
Figura 3 - Árvore de falha para falha em válvula de controle de alta pressão (Fonte: Kuhn, 2021) .....	15
Figura 4 - Árvore de falha para válvula de controle de pressão (Fonte: o Autor, 2024)	20
Figura 5 - Fluxograma das etapas realizadas neste trabalho (Fonte: o Autor, 2024) .....	21
Figura 6 - Amostra principal da junta lens ring marcada nas seções A, B e C com linhas representando o seccionamento (Fonte: o Autor, 2024).....	22
Figura 7 - Vista frontal e adjacentes da amostra principal da junta lens ring (Fonte: o Autor, 2024) .....	24
Figura 8 - Vista posterior da amostra principal da junta lens ring (Fonte: o Autor, 2024) .....	24
Figura 9 - Vista frontal e superior da amostra secundária da junta lens ring (Fonte: o Autor, 2024) .....	25
Figura 10 - Vista frontal e superior da seção A em detalhe (Fonte: o Autor, 2024) .....	26
Figura 11 - Microestrutura de martensita revenida em 200x (Fonte: o Autor, 2024) ....	32
Figura 12 - Microestrutura de martensita revenida em 500x (Fonte: o Autor, 2024) ....	32
Figura 13 - Raio externo de vedação da amostra principal e sua ampliação, nota-se fortes marcas de usinagem e ferramentas no local (Fonte: o Autor, 2024).....	33
Figura 14 - Raio externo com marca grosseira de ferramenta (Fonte: o Autor, 2024) ..	34
Figura 15 - Um caso de acoplamento da junta lens ring no corpo da válvula por quatro pontos (Fonte: o Autor, 2024) .....	35

Figura 16 - Um caso de desmontagem da válvula. Junta lens ring acoplada pelos quatro pontos (Fonte: o Autor, 2024) .....	35
Figura 17 - Registro na lupa dos raios intermediários formados da amostra principal e secundária, respectivamente (Fonte: o Autor, 2024).....	37
Figura 18 - Desenho representativo da vedação. Da direita para esquerda: sede, junta lens ring e flange de entrada. Setas indicam o esmagamento. (Fonte: o Autor, 2024) ..	37
Figura 19 - Amassamento e trinca no raio intermediário (Fonte: o Autor, 2024).....	38
Figura 20 - Trinca propagando do raio intermediário para o externo (Fonte: o Autor, 2024).....	38
Figura 21 - Trinca no raio externo (Fonte: o Autor, 2024).....	38
Figura 22 - Trinca com resina termoplástica dividindo-se em duas (Fonte: o Autor, 2024).....	38
Figura 23 - Trinca volta a se propagar em direção aos raios (Fonte: o Autor, 2024).....	39
Figura 24 - Trinca secundária que se propagou às arestas (Fonte: o Autor, 2024) .....	39
Figura 25 - Trinca percorrendo ambos lados da amostra, região com baixa seção resistente (Fonte: o Autor, 2024).....	39
Figura 26 - Proximidade de falha com o furo roscado, ambos com resina que vazou (Fonte: o Autor, 2024).....	39
Figura 27 - Regiões de superfície estudadas, corte longitudinal (Fonte: o Autor, 2024)	40
Figura 28 - Superfície do raio externo no perfilômetro (Fonte: o Autor, 2024).....	40
Figura 29 - Superfície do raio intermediário no perfilômetro (Fonte: o Autor, 2024) ...	41
Figura 30 - Superfície do raio intermediário no rugosímetro (Fonte: o Autor, 2024)....	41
Figura 31 - Seção A, após o corte vertical. Seção A2, A1 e A3, da esquerda para direita (Fonte: o Autor, 2024).....	43

Figura 32 – Superfície da fratura da subseção A2 (Fonte: o Autor, 2024).....	43
Figura 33 – Superfície de fratura da subseção A1. Setas indicam os possíveis pontos de início de trinca (Fonte: o Autor, 2024) .....	43
Figura 34 - Subseção A3, após abertura de fratura (Fonte: o Autor, 2024) .....	43
Figura 35 - Subseção A2 com marcas de praia (Fonte: o Autor, 2024) .....	44
Figura 36 - Subseção A1 com marcas de praia (Fonte: o Autor, 2024) .....	44
Figura 37 - Marcas de esforço e trinca secundária (Fonte: o Autor, 2024).....	45
Figura 38 - Marcas de esforço (Fonte: o Autor, 2024).....	45
Figura 39 - Terceiro possível ponto de início de trinca (Fonte: o Autor, 2024).....	45
Figura 40 - Fratura evidenciando o raio externo (Fonte: o Autor, 2024) .....	45
Figura 41 - Marca de praia e região de fadiga da Subseção A1 (Fonte: o Autor, 2024)	46
Figura 42 - Marcas que convergem para o semicírculo, possível nucleação (Fonte: o Autor, 2024) .....	46
Figura 43 - Região ampliada da marca de praia (Fonte: o Autor, 2024).....	46
Figura 44 - Ampliação de 400x na região do ponto II (Fonte: o Autor, 2024) .....	46
Figura 45 - Aumento em 120x do ponto I (Fonte: o Autor, 2024).....	47
Figura 46 - Trinca secundária próxima do ponto II (Fonte: o Autor, 2024).....	47
Figura 47 – Semicírculo no ponto III, possível nucleação (Fonte: o Autor, 2024).....	47
Figura 48 - Ampliação de 200x na região e amassamentos no ponto III (Fonte: o Autor, 2024).....	47
Figura 49 - Ampliação de 500x na região e degraus de fadiga (Fonte: o Autor, 2024) .	48
Figura 50 - Estrias de fadiga em 500x (Fonte: o Autor, 2024).....	48
Figura 51 - Erosão por onde ocorre o fluxo de produto, (a) na amostra principal e (b) na	

secundária (Fonte: o Autor, 2024).....	49
Figura 52 - Alguns componentes da válvula de controle de pressão em sequência de encaixe. Da direita para esquerda: haste/obturador, sede e junta lens ring (Fonte: o Autor, 2024) .....	49
Figura 53 - Caso crítico de junta lens ring acoplada no flange de entrada com vazamento de produto (Fonte: o Autor, 2024).....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1.1	Ensaio de caracterização química da junta <i>lens ring</i> . .....	30
Tabela 5.1.2	Composições químicas de 30CrNiMo8 em porcentagem por massa de acordo com a norma DIN EN 10083. ....	30
Tabela 5.1.3	Durezas do aço DIN 1.6580 em HRC, carga 150 kg.....	31
Tabela 5.3.1	Seccionamentos da amostra principal na região de falha. ....	43
Tabela 5.3.2	Falhas na região de fratura.....	44
Tabela 5.3.3	Análise microscópica em MEV dos pontos I e II no aço DIN 1.6580. .	46
Tabela 5.3.4	Análise microscópica em MEV do ponto III no aço DIN 1.6580. ....	47

## LISTA DE ABREVIACOES

AISI	Instituto Americano de Ferro e Aço (American Iron and Steel Institute)
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais (American Society for Testing and Materials)
DIN	Instituto Alemão para Normatização (Deutsches Institut für Normung)
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva (Energy Dispersive Spectroscopy)
EVA	Etileno Acetato de Vinila
FEA	Análise de Elementos Finitos (Finite Element Analysis)
FTA	Análise da árvore de Falhas (Failure Tree Analysis)
HRC	Dureza Rockwell C (Hardness Rockwell C)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MTBF	Tempo Médio entre Falhas (Mean Time Between Failures)
OES	Espectrometria de Emissão ptica (Optical Emission Spectrometry)
PE	Polietileno
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de Vinila (Polyvinyl Chloride)
RCA	Análise de Causa Raíz (Root Cause Analysis)
SAE	Sociedade de Engenheiros da Mobilidade (Society of Automotive Engineers)

## RESUMO

As indústrias petroquímicas desempenham um papel essencial na produção de materiais básicos utilizados em diversos setores. Nesse contexto, equipamentos como válvulas de controle de pressão são cruciais para manter a operação segura e eficiente. Este trabalho teve como objetivo analisar o mecanismo de falha de uma junta *lens ring*, um componente utilizado em válvulas de alta pressão em plantas petroquímicas. A trinca foi identificada durante uma parada de manutenção, evidenciando o risco que falhas desse tipo representam para a segurança dos colaboradores e a continuidade operacional, além de impactos financeiros. Para compreender as causas do defeito, foi elaborada uma Árvore de Falhas (FTA) e o componente foi seccionado para análise detalhada. Cada seção foi submetida a testes para investigar possíveis origens da falha, como problemas de projeto, fabricação ou montagem do componente. Os resultados apontaram que a falha ocorreu por fadiga, com três potenciais pontos de início associados ao funcionamento sistemático da peça. Como recomendação, sugeriu-se a adoção de uma geometria alternativa para a junta *lens ring*, com raios mais suaves, visando reduzir concentrações de tensão e prevenir falhas semelhantes.

**Palavras-chave:** indústrias petroquímicas, junta *lens ring*, falha, fadiga.

## ABSTRACT

The petrochemical industries play a vital role in producing basic materials used across various sectors. In this context, equipment such as pressure control valves is crucial for maintaining safe and efficient operations. This study aimed to analyze the failure mechanism of a lens ring gasket, a component used in control high-pressure valves in petrochemical plants. The crack was identified during a maintenance shutdown, emphasizing the risk that such failures pose to worker safety, operational continuity, and financial impacts. To understand the root causes of the defect, a Failure Tree Analysis (FTA) was developed, and the component was sectioned for detailed examination. Each section underwent testing to investigate potential causes of the failure, such as issues related to the project design, manufacturing, or assembly processes. The results revealed that the failure occurred due to fatigue, with three potential initiation points associated with the systematic operation of the component. As a recommendation, an alternative geometry for the *Lens ring* gasket, incorporating smoother radii, was suggested to reduce stress concentrations and prevent similar failures.

**Keywords:** petrochemical industries, *lens ring* gasket, failure, fatigue

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria petroquímica desempenha um papel fundamental na transformação e produção de matérias-primas derivadas do petróleo, por meio de processos de refino. No Brasil, o setor petroquímico tem grande relevância global, sendo responsável pela produção de resinas termoplásticas, como Polietileno (PE), Polipropileno (PP) e Policloreto de Vinila (PVC), além de diversos solventes utilizados em diferentes segmentos, como embalagens, componentes industriais, automotivos, tintas e revestimentos. Ademais, o país é um importante produtor mundial de biopolímeros, destacando-se na fabricação a partir de fontes renováveis.

Em polos petroquímicos, há plantas de alta pressão capazes de produzir uma variedade de produtos, entre os quais se destacam o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) e o copolímero de Etileno Acetato de Vinila (EVA), sendo a etapa de polimerização crucial, onde o gás é convertido em polímero. Diversos processos e equipamentos são empregados para a produção destes materiais, dentre eles a válvula de controle de pressão envolvida nesse processo trabalha sob condições extremas de temperatura e pressão, sendo um componente crucial e de alta complexidade. Por sua relevância no processo, surgem constantemente oportunidades para otimizar sua eficiência operacional.

Uma falha na válvula de controle de pressão acarreta, especificamente, perda de estanqueidade no sistema, comumente causada por uma trinca na junta *lens ring*. A junta é responsável por garantir, nesse caso, a vedação entre a sede e o flange de entrada da válvula de controle de pressão e esta análise visa entender o processo que leva à ocorrência desse mecanismo de falha.

As equipes de engenharia de manutenção das plantas petroquímicas são responsáveis por assegurar o bom funcionamento dos equipamentos. As paradas de planta são momentos críticos, planejados para minimizar os impactos na produção, sendo fundamentais para a realização de manutenções preventivas e preditivas. Assim, o presente estudo se justifica pela importância de combinar diferentes fatores que podem influenciar a falha de um componente, demonstrando a relevância do procedimento de análise de causa raiz para evitar novas ocorrências.

## 2. OBJETIVOS

Este trabalho visa identificar e compreender o mecanismo de falha da junta *lens ring*, um componente da válvula de controle de pressão que opera sob condições de alta pressão em uma planta petroquímica

Os objetivos específicos incluem a correlação de condições que possam ter influenciado a falha, a análise microestrutural e de geometria da junta para verificar sua conformidade com o projeto, além da aplicação da Análise de Causa Raíz (RCA) para identificar as causas subjacentes.

Por fim, serão propostas possíveis melhorias que podem envolver tanto ajustes na operação do equipamento quanto atualizações nos projetos futuros, visando aumentar a eficiência, confiabilidade do sistema e diminuir a recorrência dessa falha e minimizar a perda de produção em futuras operações.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado a revisão bibliográfica dos principais tópicos para a base teórica do presente trabalho. A revisão foi dividida nos seguintes segmentos: explicação do processo de PEBD e EVA em reatores tubulares, revisão sobre válvulas de controle de pressão, juntas *lens ring*, manutenção preditiva, conceituação de análise de causa raiz e na verificação de estudos já realizados sobre mecanismos de falha no contexto industrial.

#### 3.1.PROCESSO DE PEBD E EVA EM REATORES TUBULARES

Em plantas de alta pressão com tecnologia tubular, são produzidos tanto o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) quanto o copolímero Etileno Acetato de Vinila (EVA), este último mediante a adição de acetato de vinila. Esses processos exigem pressões extremamente altas, entre 1000 e 3000 bar, e temperaturas que variam de 100°C a 300°C, ocorrendo em três etapas principais: compressão, reação e separação de produto. Embora o processo de produção seja relativamente simples, ele demanda uma elevada quantidade de energia, principalmente durante a compressão do monômero, que deve atingir pressões altíssimas para permitir que a polimerização ocorra de maneira eficiente (PEREIRA, 1997).

O Eteno, fornecido pelas indústrias petroquímicas por meio de tubulações, chega à planta a uma pressão de 40 atm e temperatura de 30°C. O gás eteno é então enviado para a primeira etapa, a compressão, onde é comprimido até 250 atm em dois estágios de compressão e resfriamento em um compressor primário. Em seguida, é encaminhado para o compressor secundário, que também opera em dois estágios de compressão e resfriamento. Após essa compressão, o monômero atinge pressões entre 1200 e 3000 atm e é alimentado no reator para iniciar o processo de polimerização. Caso esteja sendo produzido EVA, acetato de vinila é adicionado antes de ir para o reator (CALIANI, 2005).

O reator tubular utilizado na polimerização de PEBD consiste em um tubo em forma de espiral, com comprimentos de até 1 quilômetro e diâmetros da ordem de centímetros, com uma relação comprimento-diâmetro entre 250 e 12000 (NEUMANN, 2001). O reator é composto por tubulações metálicas em espiral, sendo alimentado frontalmente com eteno e iniciadores, como peróxidos e/ou oxigênio, com possíveis

injeções laterais ao longo do reator. Ele é dividido em três regiões principais: a região de pré-aquecimento, onde o monômero é aquecido pelo vapor até a temperatura de polimerização; a região de reação, onde ocorre a maior parte da conversão de eteno em polietileno; e a região de resfriamento, onde o polímero formado é resfriado até o término da reação. Os tubos do reator possuem uma camisa para preaquecimento e refrigeração, permitindo a troca de calor com o fluido reacional. As diferentes zonas do reator são responsáveis por controlar o calor gerado durante o processo, com temperaturas que podem atingir até 300°C (CALIANI, 2005). A Figura 1 representa o fluxograma simplificado do reator tubular de altas pressões no processo de produção de PEBD e EVA.

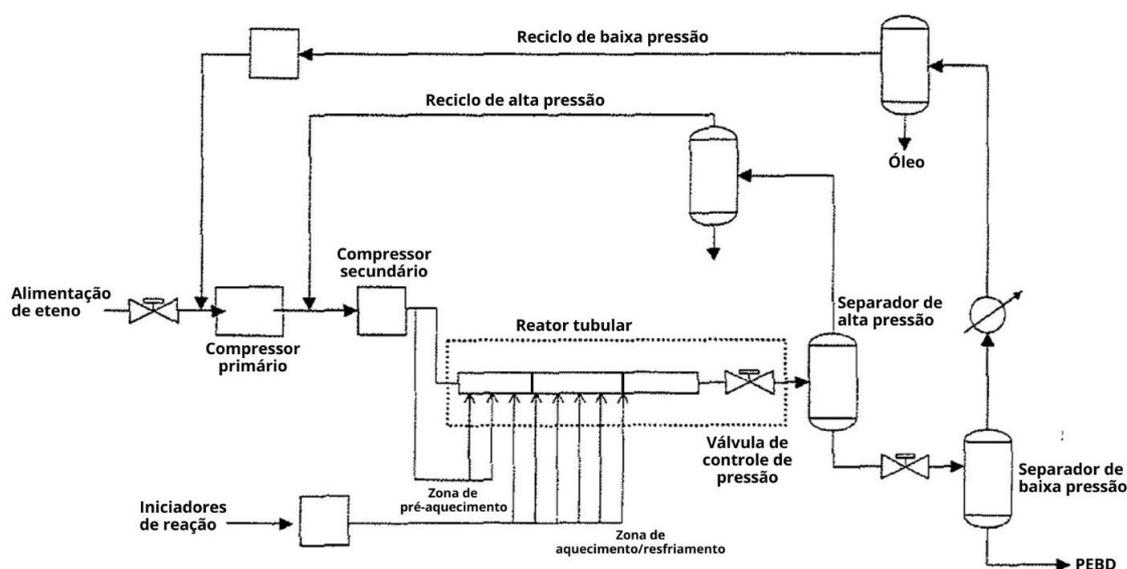


Figura 1 - Fluxograma simplificado de planta de PEBD/EVA  
(Fonte: Adaptado de Caliani, 2005)

A polimerização no reator tubular segue o mecanismo de radicais livres. A reação pode ser iniciada pela injeção de compostos iniciadores, como oxigênio ou peróxidos orgânicos, ou por meio de condições físicas, como radiação ou calor. O gás, a uma pressão de aproximadamente 2500 bar, entra no topo do reator, que é refrigerado a 280°C, descendo pelos 111 andares de tubos circulares (NEUMANN, 2001).

Como a polimerização é altamente exotérmica, o controle da temperatura é um desafio, pois o meio reacional se torna viscoso rapidamente. A agitação vigorosa é fundamental para dissipar o calor e evitar pontos de superaquecimento, que podem resultar na descoloração do produto. O calor gerado durante o processo é removido através da troca de calor com o fluido refrigerante que circula na camisa do reator, garantindo que a reação ocorra de forma controlada (CALIANI, 2005).

Para evitar o acúmulo de depósitos de polímero nas paredes internas mais frias do reator, o que reduziria a transferência de calor devido à baixa condutividade térmica do material depositado, é fundamental manter a taxa de fluxo no tubo o mais alta possível. O acúmulo de polímero pode levar a problemas como entupimento, formação de polímeros reticulados (gel) de qualidade inferior e, em casos mais graves, à degradação perigosa do etileno no reator em temperaturas acima de 300°C. Para mitigar esses riscos, a maioria dos reatores modernos utiliza pulsos de fluxo na mistura reacional, controlados por uma válvula de controle de pressão localizada no final do reator. Esses pulsos, que ocorrem com frequência entre 2 a 10 segundos, aumentam o fluxo e a velocidade da mistura, removendo o polímero acumulado. Esse aumento de velocidade pode atingir de 2 a 5 vezes o valor médio (BOKIS et al, 2002).

A válvula de controle de pressão do reator abre em alta velocidade, permitindo a redução da pressão do gás, que passa de 2500 bar para 300 bar antes de ser direcionado para uma tubulação lateral que conduz ao vaso separador, juntamente com o polímero ainda em estado viscoso. A conversão típica de eteno para polietileno em um reator tubular varia entre 20 a 30%, sendo que o polímero formado e o etileno não reagido são separados em dois estágios, utilizando um separador de alta e outro de baixa pressão. O polímero é então encaminhado para a seção de extrusão, onde é moldado em pellets. O etileno não reagido é reintroduzido no processo, retornando à etapa de compressão, passando novamente pelos compressores primário e secundário para atingir a pressão necessária e ser alimentado de volta no reator, maximizando a eficiência do uso do monômero. Após a peletização, o material passa por processos de secagem, peneiramento e transferência para silos de mistura, onde é homogeneizado e submetido a análises de qualidade. Uma vez aprovado, o material é embalado e disponibilizado para comercialização (CALIANI, 2005).

A extrusora utilizada no processo de produção possui dois eixos, nos quais a resina, ainda em estado viscoso, é comprimida. Durante esse processo, o rotor corta a resina em tiras finas, semelhantes a espaguete, que são direcionadas para a centrífuga e, posteriormente, para a peneira. Na peneira, ocorre a separação dos grãos de acordo com o tamanho: os grãos com tamanho adequado são separados dos grãos excessivamente grossos ou finos. Os grãos selecionados seguem para uma balança e, em seguida, são transportados ao topo dos silos de armazenagem. Nos silos, o produto é submetido a um processo de desgaseificação, em que é aerado para remover o gás residual oriundo do

processo de polimerização. Assim, os polímeros, seja o PEBD ou o EVA, são armazenados nos silos de ensaque, concluindo o processo de produção (AQUINO, 2023).

### 3.2.VÁLVULA DE CONTROLE DE PRESSÃO

As válvulas têm a função de direcionar, controlar e interromper o fluxo em processos industriais. Para que uma planta industrial mantenha a qualidade de seus produtos, é essencial um controle rigoroso do processo, especialmente das variáveis de vazão, pressão, temperatura e nível. As válvulas de controle são os dispositivos que, ao restringir o fluxo, ajustam essas variáveis conforme a necessidade (RIBEIRO, 1999). As quatro principais funções das válvulas de controle são:

1. Garantir estanqueidade conforme as condições do processo;
2. Responder ao padrão de controle designado;
3. Ajustar o fluxo do processo por meio da variação da área entre a sede e o obturador;
4. Controlar ou absorver a queda de pressão no sistema.

As válvulas de controle possuem duas partes principais: o corpo e o atuador, como ilustrado na Figura 2. O corpo inclui componentes que entram diretamente em contato com o fluido, enquanto o atuador fornece a força motriz que ajusta o corpo de acordo com a variável controlada (EMERSON AUTOMATION SOLUTIONS, 2019).

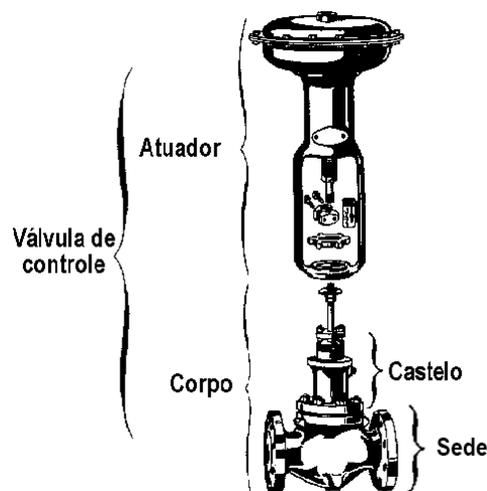


Figura 2 - Partes de uma válvula de controle (Fonte: Ribeiro, 1999)

O corpo da válvula é a parte que conecta a válvula à tubulação e possui o orifício variável por onde o fluido passa. A sede é o componente responsável pela vedação, enquanto o obturador realiza o fechamento ao se conectar com a sede. A haste, por sua vez, transmite os movimentos do atuador para o obturador. Em alguns casos, a própria haste pode atuar como obturador (RIBEIRO, 1999).

Em plantas de alta pressão para a produção de PEBD e EVA apresentam problemas significativos de fadiga, pulsação, vibração e erosão em máquinas e equipamentos. Nos compressores e reatores, o desgaste e a fadiga geralmente são os motivos das paradas, enquanto na planta existem outros componentes críticos, como as Válvulas de Controle de Pressão, que exigem atenção especial. Nessas plantas, os seguintes componentes são considerados críticos para a operação (GRASSINI, 2014):

1. Válvulas que operam apenas durante o desligamento para descarga rápida de uma mistura de gás e polímero, estando sujeitas a fenômenos de erosão;
2. Extrusoras operando sob alta pressão;
3. Válvulas de segurança e discos de ruptura;
4. Válvulas de controle de pressão, que são frequentemente acionadas

A reação de polimerização é controlada por pressão e temperatura, sendo empregadas válvulas de controle complexas no final dos reatores. Essas válvulas são acionadas por um sistema hidráulico que permite quedas de pressão rápidas e controladas dentro do reator. Equipadas com atuadores de alta velocidade e transdutores eletrônicos, elas garantem precisão e repetibilidade na operação, sendo capazes de posicionar o obturador ao longo da haste para ajustar o nível de abertura da válvula de acordo com a posição da haste (MÁRQUEZ et al, 2009).

As Válvulas de Controle de Pressão geram quedas de pressão rápidas e breves, que logo são restabelecidas para manter a pressão até o início de um novo ciclo. Essa pulsação causa variações de pressão e fluxo no reator, resultando em flutuações de temperatura na mistura reacional devido a mudanças nas taxas de reação (causadas pela variação de pressão), no tempo de residência (alterado pela taxa de fluxo), nos coeficientes de transferência de calor (influenciados pela velocidade do fluido) e no acúmulo ou remoção de fouling nas paredes do reator. Em operação normal, a válvula abre rapidamente a cada 2 a 10 segundos para permitir uma queda de pressão e fecha de

forma gradual em 5 a 15 segundos, até que a pressão retorne ao ponto de ajuste. As velocidades axiais são geralmente elevadas, em torno de 10 m/s. Caso ocorra um bloqueio na válvula, pode resultar na perda de controle de pressão do reator e do sistema de reciclagem, forçando um desligamento de emergência (ZABISKY et al, 1992).

Devido às elevadas quedas de pressão envolvidas, é essencial utilizar materiais adequados que suportem tanto o desgaste quanto os intensos fenômenos de erosão. A haste da válvula, com extremidade em formato cônico, a sede e juntas *lens ring* são construídos em aço de alta resistência para suportar as grandes diferenças de pressão durante a passagem e expansão do polímero. O material AISI SAE H13, ou equivalente, tem sido comumente utilizado como base para atender a essas condições exigentes e aplicações (GRASSINI, 2014). Sendo conhecidas também como válvula de purga ou válvula de descarga do reator, desempenham três funções principais (LACUNZA et al, 1998):

1. Controla a pressão do reator, mantendo-a entre 1400 kgf/cm<sup>2</sup> e 2700 kgf/cm<sup>2</sup>, reduzindo a pressão do gás para níveis adequados ao sistema de reciclagem;
2. Direciona o fluxo do produto (PEBD) e do eteno não reagido do reator tubular para o vaso separador de alta pressão;
3. Opera em intervalos pré-determinados, abrindo para gerar um pulso de pressão que aumenta a velocidade do fluxo e permite a remoção de polímero acumulado nas paredes internas do reator, reduzindo o fouling.

O defouling, essencial em reatores tubulares de polimerização, remove o acúmulo de polímero nas paredes internas e ocorre de duas maneiras principais. O defouling mecânico utiliza a abertura e fechamento controlado da válvula de pressão para gerar ciclos de purga, que aumentam a velocidade do fluido, arrastando o polímero das paredes, com maior eficiência próxima à válvula. O defouling termodinâmico envolve o aquecimento da parede do reator ou do fluido refrigerante, elevando a temperatura do polímero depositado e facilitando seu desprendimento pelo fluxo de etileno, reduzindo assim a camada de fouling. A resistência ao fouling diminui com os pulsos de pressão, sendo mais intensa perto da válvula de purga, e a taxa de remoção depende da resistência e da espessura do depósito, fator essencial na avaliação da transferência de calor e no desempenho térmico do reator (BARBOSA et al, 2018).

### 3.3.JUNTAS LENS RING

A junta *lens ring* ou junta lenticular é um componente de vedação, responsável por garantir a estanqueidade entre o corpo e sede da válvula, para evitar o vazamento do resina termoplástica que passa por ela, por meio da movimentação da haste e obturador. Geralmente, tendem ocorrer problemas de vazamento nesse contexto, podendo ser por falha nas gaxetas, haste, obturador, sede ou junta *lens ring*. Normalmente, a motivação que leva ao trincamento dessas peças podem ser: erosão, cavitação, vibração, falha na usinagem e montagem, etc. Com essas trincas a vedação fica prejudicada (GONG, 2015).

A junta *lens ring* é geralmente fabricada em aços especiais, como o 30CrNiMo8 ou similares, devido à sua capacidade de suportar altas pressões (GONG, 2015) (BERKOVITS, 1987). Esses aços contêm quantidades significativas de cromo e molibdênio, sendo normalmente temperados e revenidos, podendo ainda passar por nitretação, conforme especificado pela norma DIN EN 10083. Esse tipo de material é ideal para componentes que enfrentam solicitações extremas, pois combina alta resistência e tenacidade, além de ser resistente a cargas e impactos variáveis. O aço 30CrNiMo8, além de ter boa forjabilidade, exige resfriamento cuidadoso após o forjamento, pois o resfriamento inadequado pode levar ao surgimento de trincas. Devido a essas características, é amplamente utilizado em peças de serviço pesado nas indústrias de aviação, automotiva e militar (DEUTSCHE NORM, 2007).

O aço 30CrNiMo8, devido ao seu teor relativamente alto de elementos de liga como Cromo e Molibdênio no aço melhora sua resposta ao tratamento térmico, como a têmpera e o revenimento, proporcionando maior resistência mecânica, além de aumentar a resistência à fadiga, ao impacto e à abrasão. O Níquel, por sua vez, contribui para elevar a dureza, a resistência ao impacto e a ductilidade do aço (HARDESTY, 1978).

Após os processos de têmpera e revenimento, o material desenvolve uma microestrutura acicular fina, característica dessa liga. De maneira geral, a microestrutura do aço 30CrNiMo8 se torna mais homogênea após o tratamento térmico, sem orientação predominante. Essa uniformidade indica que as partículas e fases do material estão distribuídas de maneira equilibrada e consistente, sem alinhamento preferencial dos grãos. Essa característica é vantajosa, pois reduz a suscetibilidade a falhas direcionais e aprimora as propriedades mecânicas, como resistência e durabilidade, tornando o material

mais isotrópico, ou seja, com propriedades semelhantes em todas as direções. Possui alta temperabilidade e tenacidade, oferecendo boa usinabilidade em processos a frio e a quente. Esse material é capaz de alcançar elevados níveis de resistência e tenacidade em grandes seções, onde é essencial uma uniformidade significativa de dureza. Além disso, ele pode ser nitretado para aumentar sua resistência e durabilidade contra fadiga (HEUVEL et al, 2008).

### 3.4.MANUTENÇÃO PREDITIVA

De forma geral, o propósito da manutenção é otimizar a disponibilidade de produção, assegurando que o processo ocorra com o menor custo possível e com alta qualidade, sem comprometer as normas de segurança ou causar impactos negativos ao meio ambiente (DE SOUZA et al, 2022).

A evolução da manutenção industrial passou por três gerações principais. Na Primeira Geração, que se estendeu até meados do século 20, o foco era simplesmente "consertar quando quebrava", pois os equipamentos eram menos complexos e a produção não dependia tanto deles. A Segunda Geração, que começou após a Segunda Guerra Mundial, trouxe maior mecanização e a ideia de que a disponibilidade das plantas e a longevidade dos equipamentos eram fundamentais, levando ao surgimento da manutenção preventiva. Já na Terceira Geração, desde a década de 1970, as expectativas em relação à manutenção aumentaram significativamente, incluindo maior confiabilidade, segurança, qualidade dos produtos, e preocupação com o impacto ambiental, além de maior custo-efetividade e vida útil dos equipamentos (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004).

A manutenção é tradicionalmente classificada em três tipos principais: manutenção corretiva, que é executada após a ocorrência de falhas; manutenção preventiva, que é programada para evitar falhas futuras; e manutenção preditiva, que utiliza monitoramento contínuo para prever e prevenir falhas. A implantação estratégica e eficiente dessas práticas é essencial para reduzir riscos operacionais e otimizar os custos (FERNANDES, 2013).

A manutenção tem assumido um papel cada vez mais estratégico nas organizações, devido ao impacto direto que exerce sobre a competitividade e os resultados financeiros das empresas. Dentre os diferentes tipos de organização da manutenção, a manutenção preditiva tem ganhado destaque nas decisões empresariais, principalmente pelo alto retorno sobre o investimento que oferece em longo prazo. De acordo com Mirshawka (1991), a manutenção preditiva é classificada como uma abordagem inteligente, uma vez que interfere somente quando necessário, o que evita intervenções desnecessárias e maximiza a eficiência dos processos (MIRSHAWKA, 1991). Os sistemas de manutenção preditiva permitem a identificação precoce de falhas potenciais, possibilitando intervenções oportunas, com o auxílio de ferramentas de previsão baseadas em dados históricos, fatores de integridade do equipamento, métodos estatísticos de inferência e abordagens de engenharia. Além disso, auxilia na definição de estratégias de manutenção em paradas de processo, priorizando as intervenções de acordo com o estado real dos equipamentos (DE SOUZA et al, 2022).

Grande parte dos problemas que afetam a qualidade dos produtos pode ser atribuída a falhas em quatro áreas principais: (1) sistemas de produção com problemas estruturais, (2) procedimentos operacionais ineficazes, (3) manutenção inadequada e (4) uso de matérias-primas de baixa qualidade. A manutenção preditiva tem o potencial de abordar esses problemas ao fornecer dados críticos para a correção dos fatores que afetam negativamente a qualidade dos produtos (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004).

Para garantir a eficácia do programa de manutenção preditiva, é essencial empregar uma combinação de tecnologias complementares. Embora o monitoramento de vibração seja uma ferramenta central, especialmente em sistemas mecânicos, ele por si só não é suficiente para abranger todos os parâmetros críticos. Técnicas adicionais, como termografia, tribologia, monitoramento de parâmetros de processo, inspeção visual e métodos de ensaios não destrutivos, são necessárias para fornecer uma visão completa das condições operacionais e antecipar falhas que possam comprometer a qualidade do produto, a capacidade de produção e os custos operacionais. Além disso, a manutenção preditiva pode ser empregada na inspeção de novos equipamentos ou na aceitação de máquinas após reparos, assegurando que eventuais anomalias sejam identificadas e corrigidas (MOABLEY, 2008).

A manutenção preditiva oferece, além de seus benefícios diretos, a capacidade de estimar automaticamente o Tempo Médio Entre Falhas (Mean Time Between Failures - MTBF), um indicador crucial para determinar o momento mais econômico de substituir um equipamento. Quando o MTBF aponta que os custos de manutenção e operação começam a superar os custos de substituição, torna-se mais vantajoso realizar a troca do maquinário, evitando despesas excessivas. Em termos práticos, o representa o intervalo médio que um equipamento, seja ele uma máquina, linha de produção ou planta, opera sem interrupções por falhas funcionais. O cálculo é feito dividindo-se o tempo total de operação em um determinado período pelo número de paradas ocorridas no mesmo intervalo. Dessa forma, o MTBF se torna uma métrica essencial para otimizar a manutenção preditiva, auxiliando na definição do momento ideal para realizar intervenções corretivas ou substituir equipamentos, garantindo maior eficiência e economia (MOABLEY, 2008).

A curva da banheira é um gráfico de porcentagem de falhas versus horas de funcionamento, que descreve o comportamento de falhas ao longo da vida útil de um equipamento. Ela é dividida em três fases: falha precoce, vida útil estável e falha por desgaste. No início do ciclo de vida, as falhas são frequentes devido a possíveis problemas de fabricação ou instalação, caracterizando o período de falha precoce. Após esse estágio, o equipamento entra em uma fase de vida útil estável, onde as falhas ocorrem com menor frequência. No final do ciclo de vida, ocorre uma elevação significativa nas falhas, indicando o período de desgaste, quando o equipamento já não oferece o mesmo desempenho e começa a falhar com mais frequência. Essa curva é essencial para definir os intervalos de monitoramento em um programa de manutenção preditiva, onde o monitoramento deve ser mais atento quando tem-se à alta probabilidade de incidência de falhas, com isso é possível identificar o momento ideal para intervenções preventivas, a fim de evitar falhas inesperadas (DE ABREU et al, 2012).

Portanto, uma compreensão profunda das causas das falhas é fundamental para o sucesso de qualquer estratégia de manutenção, e a análise de falhas é um componente essencial desse processo. Para que essa análise seja precisa e eficiente, é crucial uma integração eficaz entre as diversas áreas da empresa e a troca de informações associada à utilização de dados operacionais, relatórios de manutenção e análises metalúrgicas realizadas em laboratório, é indispensável para garantir uma avaliação abrangente das falhas. Esse processo integrado possibilita não apenas a identificação das causas dos

problemas já ocorridos, mas também a prevenção de novas falhas, assegurando a continuidade operacional e a confiabilidade dos sistemas produtivos.

### 3.5. ANÁLISE DE CAUSA RAÍZ

A Análise de Causa Raiz (RCA) é uma metodologia amplamente utilizada para investigar e evitar futuras falhas ao identificar as causas fundamentais de eventos críticos, sendo crucial para a definição de medidas preventivas e corretivas duradouras. Muito usado em indústrias petroquímicas, onde a ferramenta possibilita a reconstrução de falhas ao identificar fatores físicos principais, fundamentados em dados de eventos e históricos de manutenção. O RCA segue uma sequência sistemática de passos que orientam o investigador no isolamento dos fatos de um evento ou falha (SCHMITT; LIMA, 2016).

A metodologia RCA consiste em uma sequência de etapas, como:

1. Definição do problema;
2. Análise da falha;
3. Identificação da causa raiz;
4. Proposição de solução para o problema;
5. Implantação da solução e acompanhamento dos resultados.

A análise de causa raiz (RCA) inicia-se com uma definição clara do problema, onde se detalha o ocorrido, o impacto gerado, além de informações de tempo e local, estabelecendo uma base sólida para a investigação. Na sequência, é realizada a análise da falha, que busca entender todos os fatores que contribuíram para o evento, utilizando ferramentas como gráficos de causa e efeito e árvores de falhas. Essa fase envolve métodos destrutivos e não destrutivos para examinar os componentes afetados e obter informações críticas sobre os mecanismos de falha (HEUVEL, 2008).

Na fase de identificação da causa raiz, o RCA procura descobrir as falhas subjacentes usando ferramentas como a Análise da Árvore de Falhas e o método dos 5 Porquês. As causas identificadas são classificadas em três categorias principais: físicas, humanas e organizacionais. As causas físicas referem-se aos mecanismos diretos de falha, como desgaste ou corrosão; as causas humanas relacionam-se a ações ou omissões dos

indivíduos, como erros de montagem; e as causas organizacionais envolvem deficiências na gestão, como comunicação insuficiente e falta de procedimentos. Essas causas se inter-relacionam, com falhas organizacionais favorecendo erros humanos que, por sua vez, desencadeiam causas físicas (BAPTISTA, 2011).

Após a identificação da causa raiz, a equipe define e implementa ações corretivas adequadas, levando em conta os recursos e o contexto operacional, o que pode incluir melhorias de processo, treinamentos e ajustes em políticas. A última etapa consiste em monitorar continuamente as soluções aplicadas para garantir sua eficácia e realizar ajustes, quando necessário, a fim de evitar recorrência de falhas semelhantes e promover a melhoria contínua dos processos (HEUVEL, 2008).

A Análise da Árvore de Falhas (Failure Tree Analysis - FTA) é um método qualitativo e quantitativo que permite realizar análises de causa raiz de eventos ou falhas potenciais, estruturando graficamente, de forma lógica, as possíveis causas de um evento principal (HEUVEL, 2008). O ponto de partida do método é o evento principal, seguido por eventos intermediários que representam causas básicas ou raízes, conectados por operadores lógicos para refletir suas relações. A construção da FTA requer a definição clara do evento principal e informações detalhadas sobre o sistema ou processo onde ocorreu, bem como o uso de componentes gráficos que permitam uma leitura lógica e de fácil interpretação dos resultados, os quais dependem da profundidade da análise (TEIXEIRA; TEXEIRA, 2013).

Em 2021, Kuhn analisou uma falha na vedação entre a sede e o corpo de uma válvula de controle de alta pressão em indústria petroquímica. Para identificar a origem do problema, foi desenvolvida uma árvore de falha e o modelo utilizado encontra-se indicado na Figura 3 (KUHN, 2021).

Segundo Kuhn, a análise da falha na sede da válvula de controle de pressão revelou duas causas principais: uma física, devido à fadiga causada por defeitos na matéria-prima, e outra organizacional, decorrente da ausência de detecção desses defeitos nos procedimentos de manutenção. Concluiu-se que é imprescindível um controle rigoroso da integridade, permitindo a identificação de possíveis defeitos e a definição de ensaios não destrutivos adequados para detectá-los (KUHN, 2021).

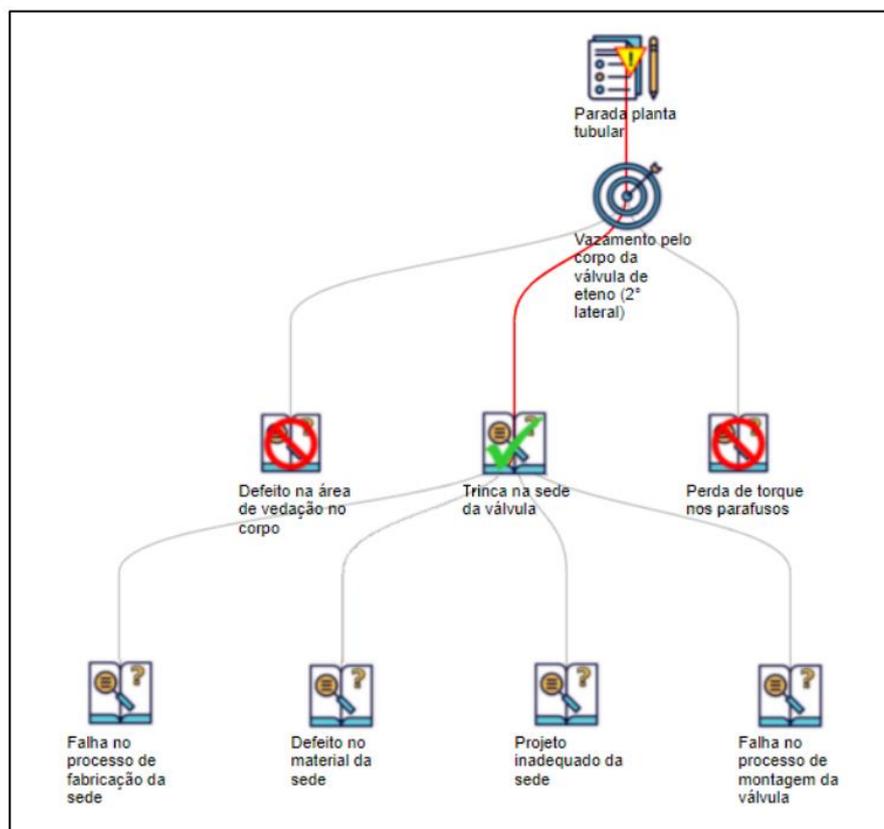


Figura 3 - Árvore de falha para falha em válvula de controle de alta pressão  
(Fonte: Kuhn, 2021)

### 3.5.1. ESTUDOS DE CASO SOBRE MECANISMOS DE FALHA

De maneira análoga ao foco deste estudo, Grassini (2014) conduziu uma análise de fadiga na haste e sede de uma válvula de controle de pressão utilizada na produção de PEBD e EVA em uma planta petroquímica. Entretanto, tais componentes foram fabricados em aço AISI/SAE H13, que devido ao ambiente de operação, enfrentam variações intensas de pressão, gerando potencial para falhas por fadiga. A pesquisa objetivou caracterizar o comportamento dos materiais e das superfícies da haste e da sede, com ênfase nos efeitos de desgaste, erosão e na fragilidade provocada pelas condições operacionais e pelo processo de nitratação, que resultou na formação de nitretos de ferro suscetíveis a microtrincas. Para isso, foram utilizadas técnicas como micrografia, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e medições de dureza, possibilitando a avaliação detalhada do desempenho do tratamento superficial. Os resultados apontaram para a ocorrência de falhas devido à interação entre erosão e desgaste por adesão e evidenciaram que a camada nitretada apresentava fragilidade e falta de adesão em regiões críticas. Como solução, foi recomendada a substituição do aço H13 por um aço de

envelhecimento martensítico, com vistas a elevar a resistência à fadiga e, conseqüentemente, aprimorar a confiabilidade operacional da válvula no reator de polimerização (GRASSINI, 2014).

No estudo de caso realizado por Zheng et al (2016), explora-se o processo de falha e propõe uma otimização estrutural para uma válvula de controle de pressão utilizada em um sistema de liquefação direta de carvão. A haste da válvula, responsável pelo controle do fluxo de uma mistura de carvão e óleo, enfrenta desgaste severo devido à erosão e cavitação. A metodologia aplicada inclui dinâmica de fluidos computacional, que modela o comportamento do fluxo, o fenômeno de cavitação e as taxas de erosão. As análises revelam que, à medida que o dano se intensifica, áreas de cavitação e velocidades de recirculação aumentam, agravando o desgaste na haste. O estudo destaca que o revestimento de WC-Co utilizado no componente oferece alta resistência, mas ainda assim sofre falhas devido à combinação de erosão por partículas e cavitação. Observou-se que uma menor abertura da válvula intensifica a cavitação e a velocidade do refluxo, resultando em erosão severa na superfície do obturador. Análises micrográficas revelaram deformações plásticas e danos decorrentes do desgaste erosivo e cavitacional. Para reduzir esses efeitos, o trabalho propõe a otimização do obturador, com a diminuição do raio de curvatura, o que demonstrou aumentar a durabilidade do componente. Ensaaios práticos com válvulas otimizadas confirmaram a eficácia da modificação, estendendo a vida útil do obturador de 1500 horas para 2146 horas, evidenciando a eficácia da nova geometria em mitigar o desgaste (ZHENG et al, 2016).

Em 2010, Ma e Xu realizaram um estudo que investigava a falha por corrosão de hidrogênio em juntas *lens ring*, fabricadas em aço 10MoWVNb e utilizadas em sistemas de alta pressão em plantas petroquímicas. Essas juntas, expostas a um ambiente de H<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-NH<sub>3</sub> a 300°C e 32 MPa, apresentaram problemas de acúmulo de bolhas de hidrogênio e corrosão intergranular. A análise microestrutural revelou que a corrosão foi intensificada pela presença de impurezas, resultando em bolhas nas interfaces internas do material e microfissuras próximas à superfície. A corrosão alcançou uma profundidade de 0,65 mm. Observou-se que o hidrogênio molecular absorvido dissocia-se em átomos e reage com os carbonetos do aço, formando metano nas microfissuras internas. O metano aprisionado gera alta pressão interna, deformando o material e criando bolhas que, ao atingirem um nível crítico, causam trincas. A análise da superfície também indicou descarbonetação, destacada como um importante sinal de corrosão por hidrogênio sob

condições de alta pressão e temperatura. Análise metalográfica e medições de profundidade detalharam o processo de falha, evidenciando a suscetibilidade do aço 10MoWVNb à corrosão por hidrogênio nessas condições (MA; XU, 2010).

Ainda no contexto de juntas, Bortz e Wink (2014) analisaram o comportamento de conexões flangeadas de alta pressão com junta *lens ring* submetidas a cargas de flexão, focando no impacto desses momentos sobre a distribuição da pressão de contato na superfície da junta e nas tensões aplicadas aos parafusos de fixação. No estudo, o tubo e a junta foram fabricados em aço SA-723, enquanto os parafusos de fixação foram feitos de SA-193. Através de modelos tridimensionais de elementos finitos (FEA), foram avaliados os comportamentos linear-elástico e elástico-plástico dos materiais, identificando como diferentes cargas externas influenciam as forças axiais nos parafusos e a pressão de contato da junta. Ensaios experimentais foram realizados para determinar a pressão mínima de contato necessária para manter a vedação em diversas condições, incluindo variáveis como pressão interna e torque aplicado nos parafusos. Os resultados revelaram uma correlação direta entre o momento de flexão aplicado e as forças nas ligações parafusadas, permitindo a formulação de uma equação de ajuste que reflete com maior precisão os dados observados (BORTZ; WINK, 2014).

Em 2019, Suqueli investigou uma falha ocorrida no “bloco em T”, um componente estrutural da válvula de controle de pressão, que desempenha uma função similar ao corpo da válvula. Esse bloco é submetido a pressões extremas, sendo conectado ao hipercompressor e ao reator tubular. A falha identificada causou uma interrupção na planta devido a uma fuga de etileno na área de conexão, localizada com o auxílio de cera e atribuída a uma fissura que se propagou entre as roscas de fixação. A análise da peça danificada incluiu inspeções visuais e ensaios não destrutivos, como a inspeção por partículas magnéticas e por ultrassom, que revelaram fissuras no orifício de segurança em padrões longitudinais e circunferenciais, associados ao fenômeno de fadiga. Além disso, o estudo também examinou gradientes na composição química e microestrutura através de técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), revelando uma estrutura de martensita e bainita revenidas no material. Ensaios de dureza e resistência mecânica foram conduzidos para caracterizar as propriedades do material, revelando variações de dureza próximas aos orifícios que indicam o impacto da alta pressão e da presença de tensões residuais geradas pelo processo de autofretagem. A análise final sugere que a combinação de cargas cíclicas, ambiente corrosivo e o ciclo de vida prolongado do

componente contribuíram para a propagação da fissura e falha do “bloco em T” (SUQUELI, 2019).

No contexto de reatores tubular, Kuhn (2021) apresenta uma análise de falha na vedação entre a sede e o corpo de uma válvula de controle de pressão em um reator tubular de PEBD, destacando as trincas observadas na sede da válvula. Para identificar a origem do problema, foi realizada uma análise de causa raiz (RCA), que incluiu a construção de uma Árvore de Falha (FTA) e ensaios destrutivos e não destrutivos, como metalografia, testes de dureza e análise de composição química. Os resultados mostraram que as trincas na sede foram originadas por defeitos de fabricação, especificamente porosidades do processo de forjamento que serviram como pontos iniciais para a propagação de trincas por fadiga. A sede da válvula, feita de aço AISI H-13 e tratada termicamente para atingir uma dureza entre 46 e 50 HRC, apresentou níveis adequados de cromo, níquel e molibdênio, mas com porosidades e falhas concentradas próximas ao raio de concordância do furo, exacerbando o processo de falha por fadiga. Como recomendação, sugere-se a adoção de inspeção com ultrassom phased array para assegurar a qualidade da matéria-prima e ajustes no projeto da válvula, visando maior controle na fabricação e inspeção dos componentes críticos (KUHNS, 2021).

Recentemente, Aquino (2023) realizou uma análise detalhada de falha no prato 3 do quinto estágio de compressão de um compressor primário em uma planta petroquímica, identificando problemas críticos no componente. O prato, fabricado em aço inoxidável AISI 410, foi examinado por meio de caracterização microestrutural e avaliação do processo de fabricação, incluindo preparação metalográfica de seções estratégicas. A análise revelou uma obstrução de 74,59% no canal de refrigeração devido a incrustações, comprometendo a dissipação de calor e resultando em sobreaquecimento que acelerou o desgaste do material. A trinca principal, localizada na seção A, foi analisada com Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que evidenciou marcas de praia típicas de fadiga e indicou o ponto de início da falha. Testes de microdureza Vickers apresentaram valores superiores aos esperados, sugerindo fragilidade aumentada do material e maior suscetibilidade à fadiga. A análise das incrustações mostrou elementos associados à corrosão, enquanto a inspeção não destrutiva com líquido penetrante na seção C identificou potenciais descontinuidades no canal de refrigeração. Concluiu-se que o acúmulo de incrustações, aliado ao aquecimento excessivo e ao desgaste resultante, foram determinantes na falha do prato. Como recomendação, sugere-se o controle da rugosidade

do canal e o uso de aditivos no sistema de refrigeração, além de melhorias no processo de soldagem para aumentar a durabilidade e confiabilidade do componente (AQUINO, 2023).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, será detalhada a metodologia adotada para a realização dos experimentos e análises conduzidos nas instalações do Grupo de Análise de Falhas do LAMEF/UFRGS. O objetivo principal foi obter informações técnicas e precisas sobre a junta *lens ring* da válvula de controle de pressão, utilizada no processo de polimerização de etileno no reator tubular para produção de PEBD e EVA.

Neste trabalho, foi realizada uma Análise de Causa Raiz (RCA) complementada pelo desenvolvimento de uma Árvore de Falha para mapear as possíveis causas que levaram à ocorrência da falha no equipamento, conforme a Figura 4. O seccionamento estratégico das partes do componente foi conduzido para viabilizar a execução de ensaios destrutivos e não destrutivos em regiões específicas, com o objetivo de identificar com maior precisão o ramo da árvore de falha que melhor corresponde ao mecanismo responsável pelo problema observado. Esse processo permitiu a eliminação de hipóteses menos prováveis, refinando a análise e direcionando os resultados para uma conclusão fundamentada e assertiva.

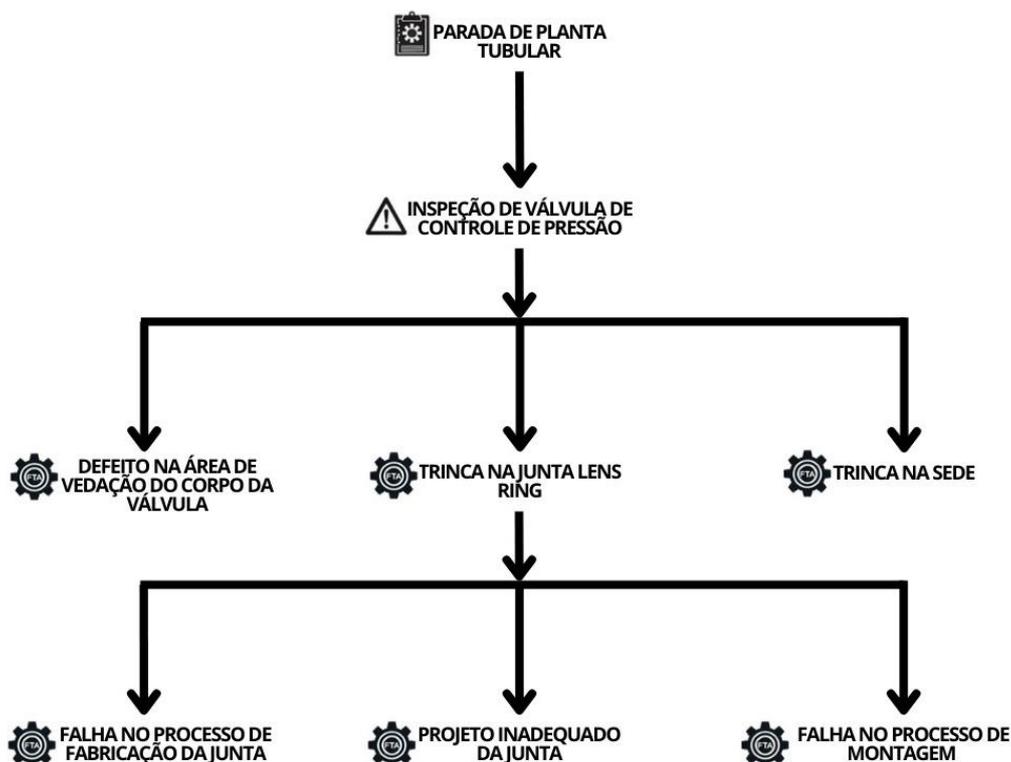


Figura 4 - Árvore de falha para válvula de controle de pressão (Fonte: o Autor, 2024)

A metodologia adotada neste estudo foi organizada em etapas conforme ilustrado no fluxograma da Figura 5. A amostra principal da junta *lens ring* conforme recebida, foi seccionada estrategicamente em 3 partes principais (A, B e C) que foram submetidas a análises detalhadas, conforme Figura 6. As seções B, C e a amostra secundária foram examinadas com o objetivo de compreender o processo de fabricação e geometria da peça, enquanto a seção A, localizada na região da falha, foi avaliada de forma a caracterizar a superfície de fratura e identificar os possíveis mecanismos responsáveis pela ocorrência da falha.

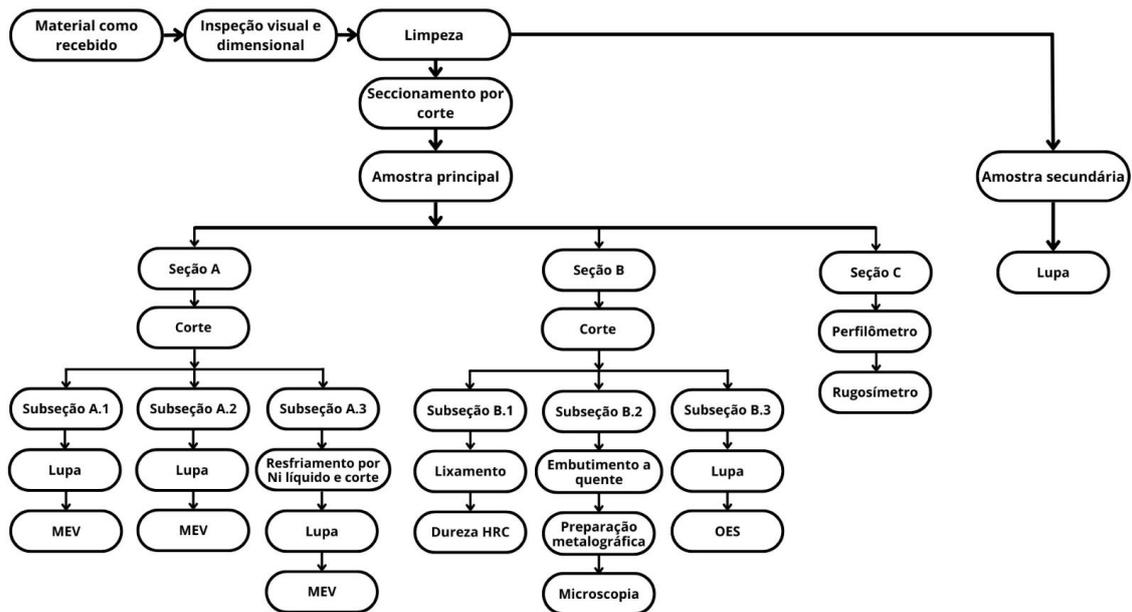


Figura 5 - Fluxograma das etapas realizadas neste trabalho (Fonte: o Autor, 2024)

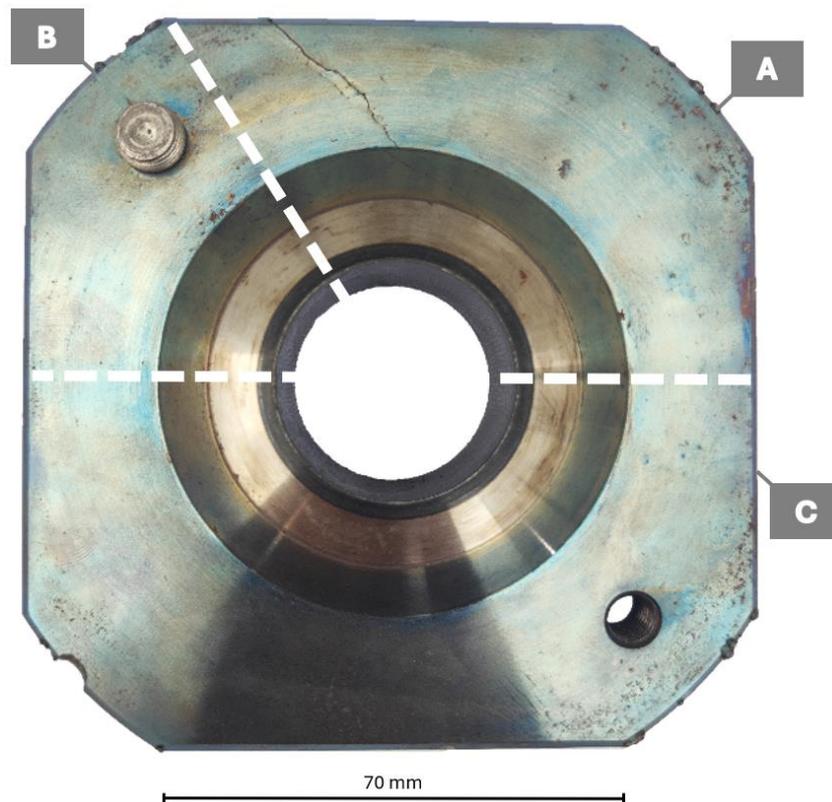


Figura 6 - Amostra principal da junta *lens ring* marcada nas seções A, B e C com linhas representando o seccionamento (Fonte: o Autor, 2024)

A análise da seção A, onde a trinca foi identificada, teve como objetivo determinar a causa da fratura. A abertura da trinca foi realizada por métodos de corte e imersão em nitrogênio líquido, resultando em três subseções denominadas A1, A2 e A3, as quais foram devidamente fotografadas. Todas subseções foram analisadas utilizando lupa e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), buscando identificar os possíveis pontos de início da trinca. Além disso, foi avaliado o desgaste sofrido durante o esmagamento para vedação, investigando alterações na resistência mecânica e a formação de entalhes que poderiam reduzir a resistência à fadiga e gerar concentradores de tensão.

A seção B foi analisada com foco na avaliação de possíveis divergências de projeto, sendo submetida a ensaios de caracterização do corpo de prova pelo devido seccionamento do corpo de prova. Esses ensaios incluíram a medição de dureza na escala Rockwell C, avaliando tanto a superfície quanto o núcleo interno por meio de cortes transversais e longitudinais. Ensaios de metalografia foram realizados para verificar a qualidade do tratamento térmico de têmpera e revenimento aplicado ao material. Adicionalmente, a composição química da amostra foi determinada utilizando Espectrometria de Emissão Óptica (OES), com o intuito de complementar a análise do

processo de fabricação da junta *lens ring*.

Na seção C, o foco foi medir os raios de curvatura da junta *lens ring*, utilizando um perfilômetro e rugosímetro, para avaliar a região em contato direto com a sede da válvula e o flange de entrada. Essa região é responsável por garantir a estanqueidade e vedação entre os componentes. Observou-se que deformações nessa área geram desníveis agudos na curvatura, criando fortes concentradores de tensão e aumentando os riscos de falha, especialmente devido aos impactos (bumps) gerados pelo reator tubular.

A análise da amostra secundária foi conduzida para comparação com a amostra principal, visando reforçar as conclusões obtidas e evidenciar a recorrência do erro. Nesse estudo, o principal objetivo foi avaliar a geometria da junta como um todo, com foco na preferência de propagação de trinca pelos raios da peça.

#### 4.1.MATERIAIS COMO RECEBIDOS

Antes da preparação da peça, foi realizada fotografia e medição dos materiais como recebido, nas Figura 7 e 8, temos a amostra principal, onde foi realizado os principais ensaios e na Figura 9 temos a amostra secundária que serviu apenas para comparação e afirmação das conclusões obtidas, em ambas pode-se observar a trinca no componente.



Figura 7 - Vista frontal e adjacentes da amostra principal da junta *lens ring* (Fonte: o Autor, 2024)

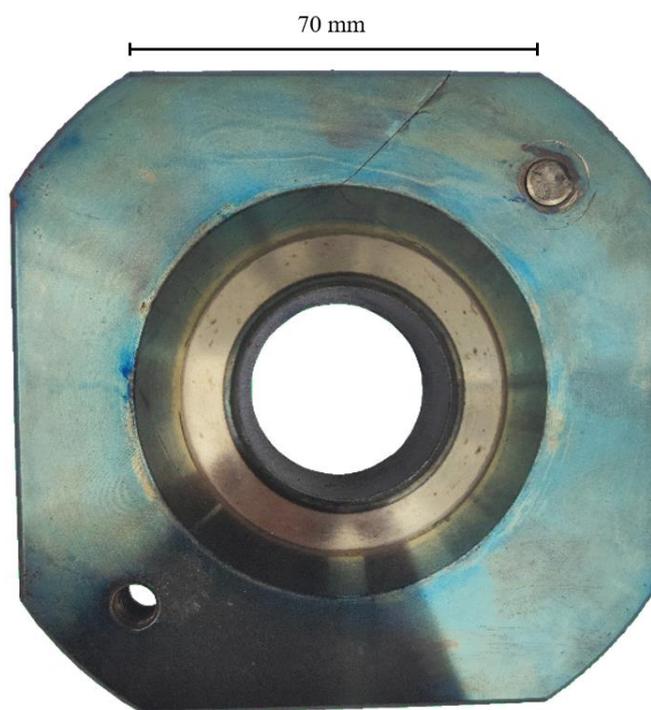


Figura 8 - Vista posterior da amostra principal da junta *lens ring* (Fonte: o Autor, 2024)



Figura 9 - Vista frontal e superior da amostra secundária da junta *lens ring* (Fonte: o Autor, 2024)

Para viabilizar as análises das amostras, foi realizada uma preparação inicial que incluiu etapas de inspeção visual e dimensional, com o objetivo de identificar características macroscópicas, como deformações, descontinuidades superficiais ou alterações geométricas. Visualmente, observa-se uma diferença na coloração entre as duas amostras, indicando que, durante a operação, elas foram submetidas a temperaturas de revenido distintas, variando entre 300 e 400°C. Em seguida, as peças foram limpas utilizando detergente neutro e solução removedora de ferrugem para assegurar uma superfície adequada para as análises subsequentes. Após, apenas a amostra principal foi marcada nas regiões críticas de maior interesse, selecionadas com base na ramificação da trinca identificada previamente. Essas marcações direcionaram o seccionamento da peça, realizado na máquina de corte Struers Discotom-100, garantindo precisão na separação das seções estratégicas.

## 4.2. ESTUDO DA SEÇÃO A: FALHA

A trinca identificada na seção A, teve abertura de fratura natural logo após o seccionamento via corte rente a fratura, resultando na divisão da seção A em três subseções: A1, A2 e A3, permitindo uma análise detalhada da trinca. Em seguida, foram capturadas fotografias das superfícies de fratura com o uso de uma câmera e imagens ampliadas na lupa Olympus Japan SZ40.

Para uma análise mais precisa de dois possíveis pontos de início da trinca, a subseção A2, representada na Figura 10, foi submetida ao exame por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) no Superscan de modelo Shimadzu SSX-550. Antes da análise, a superfície de fratura foi cuidadosamente limpa utilizando detergente neutro e solução removedora de ferrugem, garantindo a remoção de resíduos e a preservação das características da fratura para uma investigação precisa.

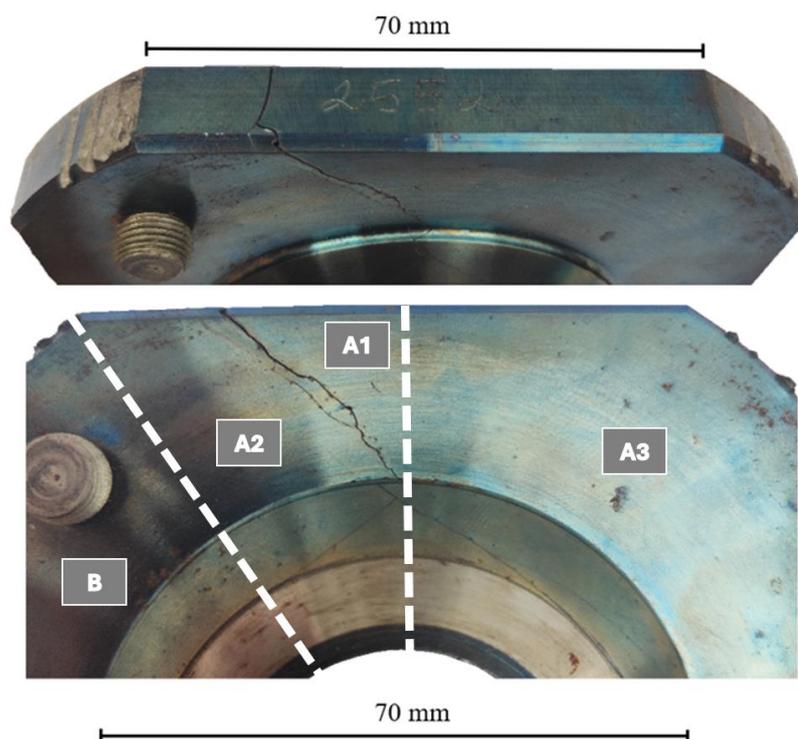


Figura 10 - Vista frontal e superior da seção A em detalhe (Fonte: o Autor, 2024)

Outro possível ponto de início da trinca foi identificado no raio de curvatura de vedação da região A3. Para a abertura da fratura, conforme Aquino (2023), empregaram-se dois métodos: o corte com a máquina Struers Discotom-100 e o resfriamento controlado do corpo de prova com nitrogênio líquido, pois a trinca nessa região tinha uma seção resistente considerável.

### 4.3. ESTUDO DAS SEÇÃO B: PROCESSO DE FABRICAÇÃO

A seção B foi estudada com o intuito de verificar se o processo de fabricação estava como descrito em projeto e já relacionando com a Árvore de Falha proposta. A seção foi seccionada em algumas subseções para realizar em cada um os diferentes ensaios propostos

Após o corte, conforme Aquino (2023), as superfícies das seções foram limpas utilizando detergente neutro e solução removedora de ferrugem. Na subseção B1, a amostra teve sua seção transversal embutida a quente e realizada a preparação metalográfica, incluindo lixamento em água corrente com lixas d'água Norton de carbureto de silício de granulometrias progressivas (80 a 1200  $\mu\text{m}$ ), seguido de polimento na politriz Panambra P-10, utilizando pastas de diamante de 4  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ , até obter superfície especular. O ataque eletrolítico foi realizado com Nital 2% durante 5 segundos para revelar a microestrutura. A microscopia foi realizada em aumentos de 200x e 500x no Microscópio Óptico Leica DM2700 M, utilizando o software Las Core.

A dureza foi medida no durômetro Duravision, com carga utilizada de 150 kg, na escala HRC. Essas análises permitiram identificar variações estruturais e mecânicas associadas aos pontos críticos da amostra. A análise de composição química foi realizada por meio do Espectrômetro SPECTROLAB com uso de argônio, para verificar o percentual dos elementos presentes no aço DIN 1.6580, de símbolo 30CrNiMo8.

### 4.4. ESTUDO DA SEÇÃO C: GEOMETRIA DA AMOSTRA

Para aprofundar a análise em relação ao projeto da junta *lens ring* e seu processo de montagem, a seção C foi submetida ao ensaio de perfilometria e rugosidade para analisar o raio de curvatura de vedação da junta e relacionar com os dois componentes, sede e flange de entrada, que realizam esse esmagamento para garantir estanqueidade da válvula de controle de pressão. Foram utilizados o Perfilômetro da Bruker ContourGT junto do software Vision64 e o Rugosímetro Mitutoyo SurfTest SJ-500.

#### 4.5. ESTUDO DA AMOSTRA SECUNDÁRIA: PROPAGAÇÃO DA TRINCA

Foram capturadas fotografias das superfícies trincadas com o uso de uma câmera e imagens ampliadas na lupa Olympus Japan SZ40, destacando os possíveis pontos de início da trinca e sua propagação preferencial em decorrência dos diversos pontos concentradores de tensão que o material possui. Também foi analisada a influência de erosão por cavitação em ambas as amostras, para comprovar que os efeitos tendem a se repetir.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir das investigações realizadas sobre o processo de fabricação, a geometria e a falha ocorrida na junta *lens ring*. As análises incluem a correlação dos dados experimentais com a Árvore de Falha desenvolvida, permitindo uma avaliação detalhada das possíveis causas.

### 5.1. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA PEÇA

Para estudar o ramo da árvore de falha que indica defeito no processo de fabricação da peça, foram realizados ensaios específicos com o objetivo de verificar se a amostra atendia aos requisitos estabelecidos pelo projeto. Inicialmente, identificou-se que o material em questão correspondia a um aço DIN 1.6580 de baixa liga, classificado como 30CrNiMo8, amplamente utilizado em aplicações submetidas a altas pressões e em peças do setor aeroespacial.

Entre os ensaios realizados, destacou-se o de Espectrometria de Emissão Óptica (OES), destinado à análise da composição química e à determinação do percentual dos elementos de liga presentes no aço da junta *lens ring*. Esse procedimento foi conduzido utilizando o espectrômetro SPECTROLAB, que opera com argônio como gás inerte para garantir a precisão das medições. Os resultados obtidos, apresentados nas Tabelas 5.1.1 e 5.1.2, baseiam-se em cinco medições realizadas, a partir das quais foi calculada a média dos valores obtidos.

Tabela 5.1.1 Ensaios de caracterização química da junta *lens ring*.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO DIN 1.6580 (%)								
	C	Si	Mn	P (máx)	S (máx)	Cr	Mo	Ni
Ensaio 1	0,3837	0,2575	0,536	0,0081	0,0012	1,967	0,3295	2,129
Ensaio 2	0,3831	0,2442	0,533	0,0139	0,0011	1,894	0,3226	2,137
Ensaio 3	0,3418	0,2504	0,527	0,0033	0,0010	1,900	0,3307	2,151
Ensaio 4	0,3428	0,2458	0,524	0,0032	0,0011	1,917	0,3320	2,132
Ensaio 5	0,3179	0,2420	0,526	0,0030	0,0010	1,922	0,3225	2,100
Média	0,3545	0,2480	0,529	0,0063	0,0011	1,920	0,3254	2,130

Fonte: o Autor, 2024.

Tabela 5.1.2 Composições químicas de 30CrNiMo8 em porcentagem por massa de acordo com a norma DIN EN 10083.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA PADRÃO (%)								
Símbolo	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
30CrNiMo8	0,26/0,34	≤0,40	0,30/0,60	0,035	0,035	1,80/2,20	0,30/0,50	1,80/2,20

Fonte: Zumofen, 2020.

Conforme apresentado nas tabelas, os resultados médios obtidos confirmam que a composição química da amostra está em conformidade com o especificado para o aço DIN 1.6580. Destacam-se as elevadas concentrações de cromo e níquel, elementos que contribuem diretamente para a alta resistência mecânica e tenacidade do material.

Além disso, foi realizado o ensaio de dureza em cinco pontos distintos, tanto na seção transversal quanto na longitudinal da peça. A análise longitudinal teve como foco o núcleo interno, com o objetivo de verificar se os valores obtidos estavam dentro da faixa especificada no projeto. Os resultados, apresentados na Tabela 5.1.3, foram obtidos utilizando uma carga de 150 kg na escala HRC (Rockwell C).

Tabela 5.1.3 Durezas do aço DIN 1.6580 em HRC, carga 150 kg.

DUREZA ROCKWELL DO AÇO DIN 1.6580 (HRC)						
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Média
Superficial	33,98	34,68	35,98	34,87	36,00	35,10
Núcleo interno	32,07	33,32	33,65	32,45	33,03	32,90

Fonte: o Autor, 2024.

A faixa de dureza especificada no projeto está entre aproximadamente 32 e 35 HRC. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, indicando que a peça apresenta uma dureza típica de aços ligados submetidos a tratamentos térmicos, como têmpera e revenimento, podendo incluir nitretação em alguns casos. No caso do aço DIN 1.6580, essa dureza intermediária assegura boa resistência ao desgaste, aliada à manutenção de uma boa tenacidade. Comparativamente, aços mais duros, com dureza superior a 50 HRC, apresentam maior dificuldade de usinagem.

Para complementar a análise, foi realizada a caracterização microestrutural da peça base, com o objetivo de verificar se o tratamento térmico foi executado adequadamente. A norma DIN EN 10083-3 descreve os procedimentos para os tratamentos de têmpera e revenimento, além da nitretação como um processo opcional, o qual não foi considerado neste estudo. As Figuras 11 e 12 ilustram as microestruturas obtidas em diferentes pontos e com variados níveis de ampliação.

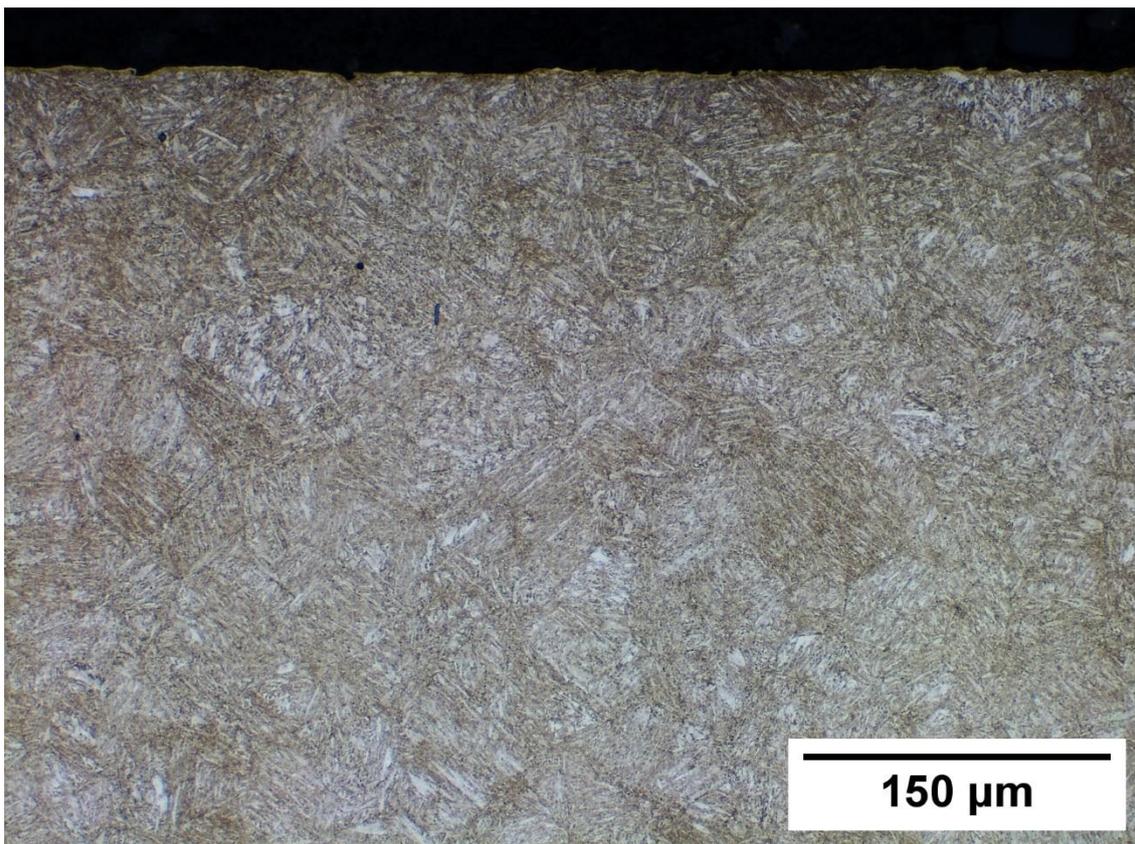


Figura 11 - Microestrutura de martensita revenida em 200x (Fonte: o Autor, 2024)

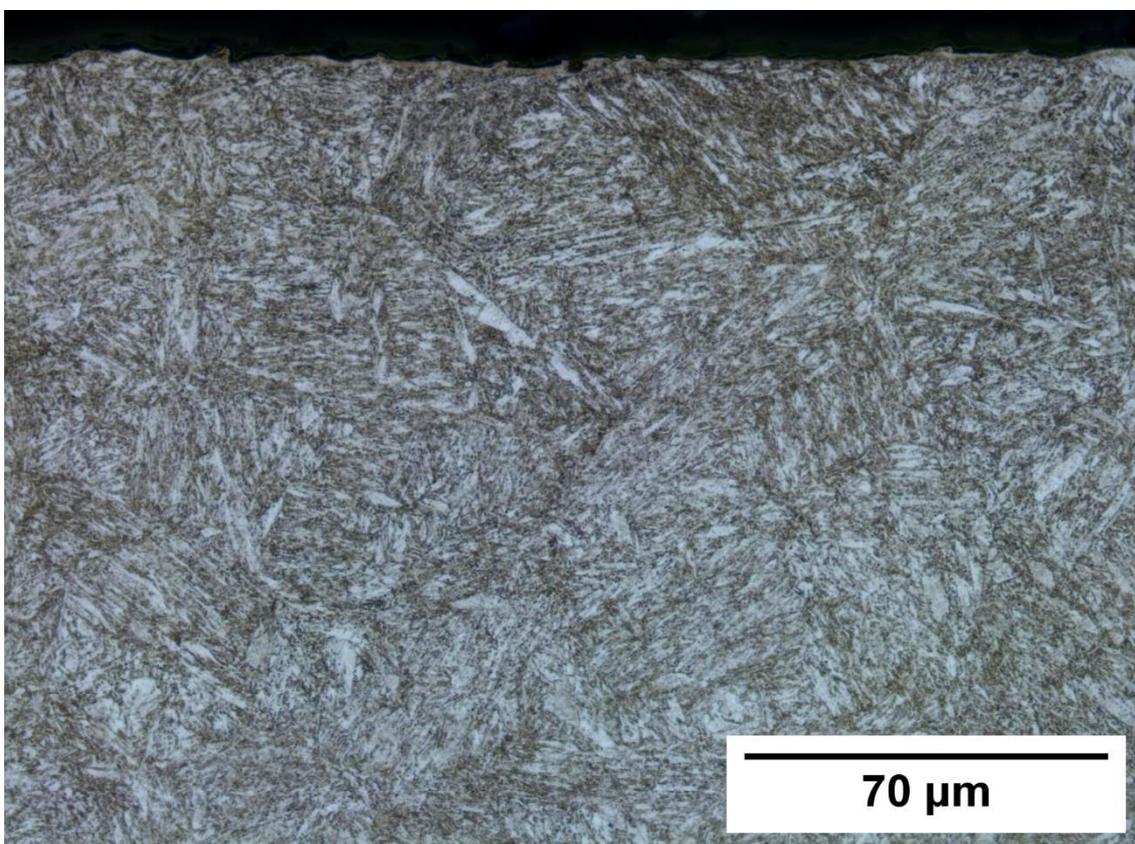


Figura 12 - Microestrutura de martensita revenida em 500x (Fonte: o Autor, 2024)

A análise microestrutural revelou que a estrutura cristalina de martensita revenida está em conformidade com os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento realizados no aço. Esse resultado reforça a hipótese de que o defeito identificado na peça não foi causado pelo processo de fabricação da amostra.

A junta *lens ring* foi fabricada por meio de usinagem, sem a utilização de soldas ou enchertos soldados. Embora o acabamento obtido seja funcional, há margem para melhorias. Durante a análise, constatou-se que o material apresenta regiões com diferentes níveis de rugosidade. Conforme observado nas Figuras 13 e 14, foram identificadas marcas grosseiras de usinagem e ferramentas, especialmente nas áreas com angulações mais agudas da peça. Essas marcas se concentram no início da circunferência do raio de vedação, configurando um ponto crítico de concentração de tensões. Essa característica favorece a propagação de trincas e o surgimento de trincas secundárias, podendo comprometer a integridade estrutural da peça.

A rugosidade nessa região de vedação é de  $0,4\ \mu\text{m}$ , enquanto na área de passagem do produto apresenta o menor valor, de  $0,2\ \mu\text{m}$ , e no restante da amostra atinge  $0,8\ \mu\text{m}$ , evidenciando variações na qualidade superficial ao longo da peça. Na área de passagem do fluido, a menor rugosidade contribui para reduzir atritos e minimizar o risco de obstruções ou depósitos indesejados, favorecendo o fluxo contínuo da resina termoplástica. Já na região de vedação, onde a rugosidade foi medida em  $0,4\ \mu\text{m}$ , o acabamento é funcional, mas poderia ser otimizado para garantir uma vedação mais uniforme e evitar potenciais microvazamentos.

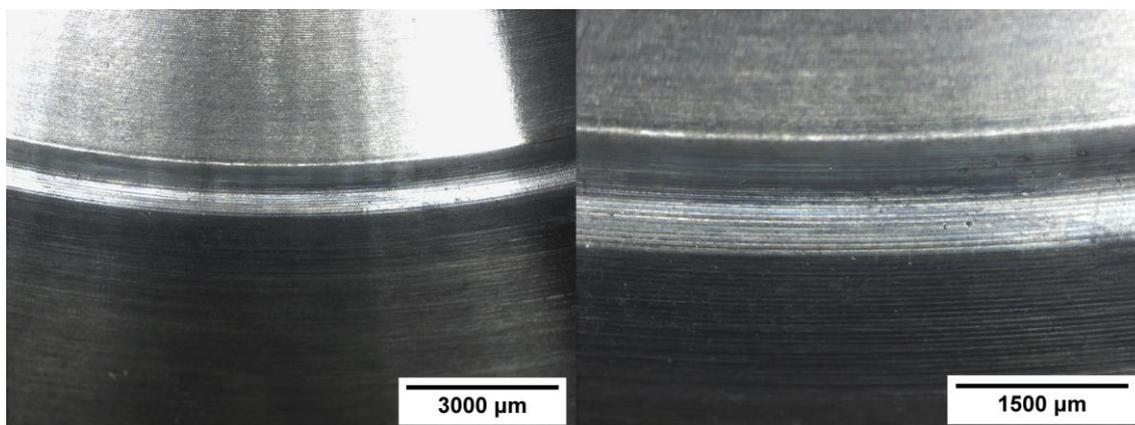


Figura 13 - Raio externo de vedação da amostra principal e sua ampliação, nota-se fortes marcas de usinagem e ferramentas no local (Fonte: o Autor, 2024)

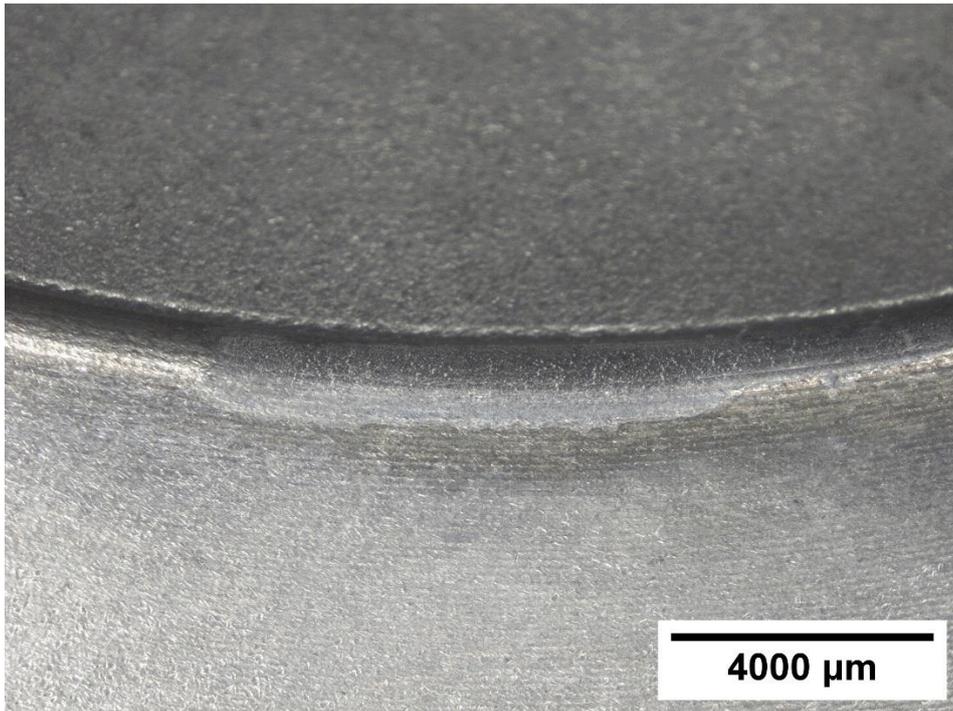


Figura 14 - Raio externo com marca grosseira de ferramenta (Fonte: o Autor, 2024)

Os resultados obtidos na caracterização estão em conformidade com as especificações do projeto.

## 5.2.GEOMETRIA DA JUNTA

Foram identificados os principais pontos concentradores de tensão presentes na amostra, sendo eles os dois furos roscados, as quatro arestas curvadas e os dois raios de vedação, o externo e o intermediário gerado pelo processo. No presente estudo, a geometria da junta *lens ring* foi projetada para acoplar-se a sede e flange de entrada, sendo que as quatro arestas curvadas totais atuam como pontos de fixação primários, a Figura 15 exemplifica o encaixe. Desalinhamentos no encaixe em qualquer lado podem gerar acúmulo localizado de tensão, tornando as extremidades mais suscetíveis a falhas devido às elevadas pressões de operação, Figura 16. Os furos roscados, por sua vez, servem apenas para facilitar a desmontagem do equipamento, permitindo a retirada da junta acoplada ao corpo da válvula por meio de parafusos que servem como pontos de apoio para não danificar os componentes. Durante a desmontagem, observou-se que o parafuso fraturou e as arestas foram danificadas, devido a grande tensão entre componentes, resultando em uma difícil desmontagem.

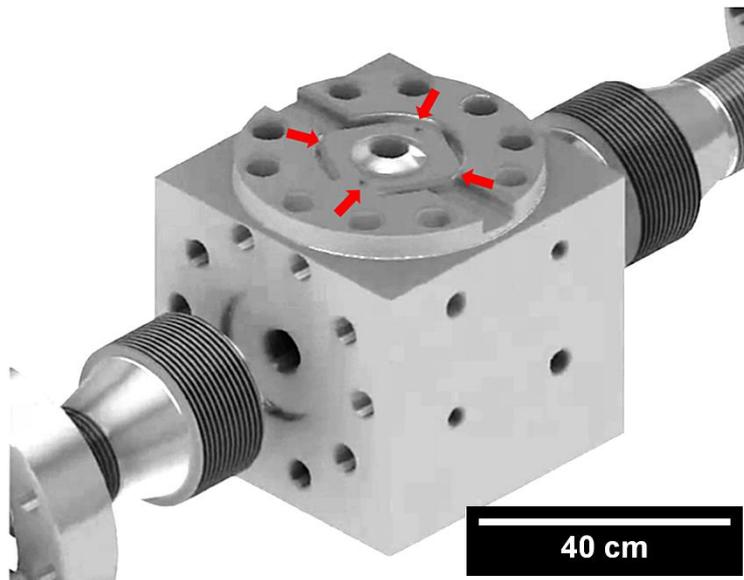


Figura 15 - Um caso de acoplamento da junta *lens ring* no corpo da válvula por quatro pontos (Fonte: o Autor, 2024)



Figura 16 - Um caso de desmontagem da válvula. Junta *lens ring* acoplada pelos quatro pontos (Fonte: o Autor, 2024)

Para analisar o ramo da *Árvore de Falha* relacionado a possíveis problemas na montagem do componente, foram realizadas verificações específicas para identificar a direção de nucleação da trinca. Caso a trinca tivesse iniciado de fora para dentro, seria plausível atribuir a falha a um desalinhamento de paralelismo, que teria concentrado tensões na região do furo roscado e em sua aresta curvada. No entanto, essa hipótese pode ser descartada, uma vez que os dois pontos de nucleação identificados não estão

localizados nessa área. Isso indica que a falha não foi causada por uma montagem inadequada.

Além disso, um dado que reforça essa conclusão é o histórico de falhas registrado pelo MTBF (Tempo Médio entre Falhas) da válvula de controle de pressão. Segundo esse histórico, casos de trincamento na junta *lens ring* são relativamente frequentes, apontando para outras causas estruturais ou operacionais.

Durante a inspeção visual, foi identificada uma elevação no raio de vedação que não constava no projeto original. Esse raio intermediário, perfeitamente formado ao longo de toda a circunferência, estava presente em ambos os lados das duas amostras analisadas. A formação dessa característica ocorreu devido deformação plástica durante a ativação da junta pelo o esmagamento tanto da sede quanto do flange de entrada, uma vez que o contato se restringe até a metade da superfície curva de vedação da junta *lens ring*. Essa alteração física torna evidente a mudança de angulação na peça, criando um ponto que favorece a nucleação e a propagação de trincas.

Para compreender melhor as características desse raio de vedação e suas implicações, foi utilizado um perfilômetro e rugosímetro para análise detalhada. Esse ensaio possibilitou a mensuração precisa das alterações geométricas e rugosidades na superfície, validando a observação inicial da elevação e sua influência na integridade estrutural da peça. As Figuras 17 e 18 ilustram claramente o fenômeno, evidenciando que o raio na amostra principal é mais proeminente, indicando que essa peça resistiu a um maior número de ciclos antes de ser desmontada.

A falha está, principalmente, relacionada aos esforços axiais gerados pela força de compressão provocada pelo diferencial de pressão ao longo do *lens ring*, intensificados pelas condições cíclicas de operação. Esses esforços criam tensões normais concentradas nas bordas e regiões de contato da peça, onde descontinuidades geométricas ou superfícies irregulares servem como pontos de iniciação de trincas. Durante os ciclos de carga e descarga, essas tensões localizadas, combinadas com tensões residuais provenientes do processo de fabricação ou montagem, favorecem a falha. Com o tempo, as forças axiais repetitivas levam à coalescência das trincas e à falha estrutural, comprometendo a integridade da peça.

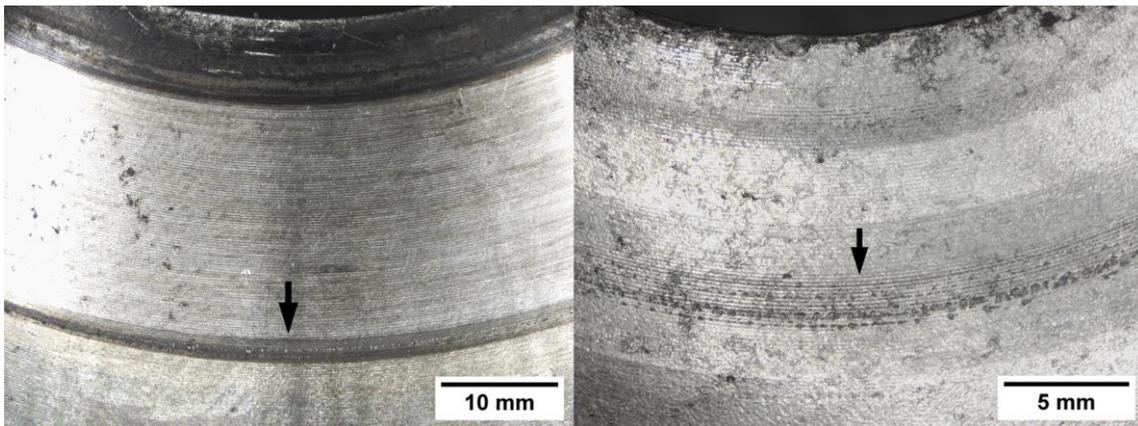


Figura 17 - Registro na lupa dos raios intermediários formados da amostra principal e secundária, respectivamente (Fonte: o Autor, 2024)

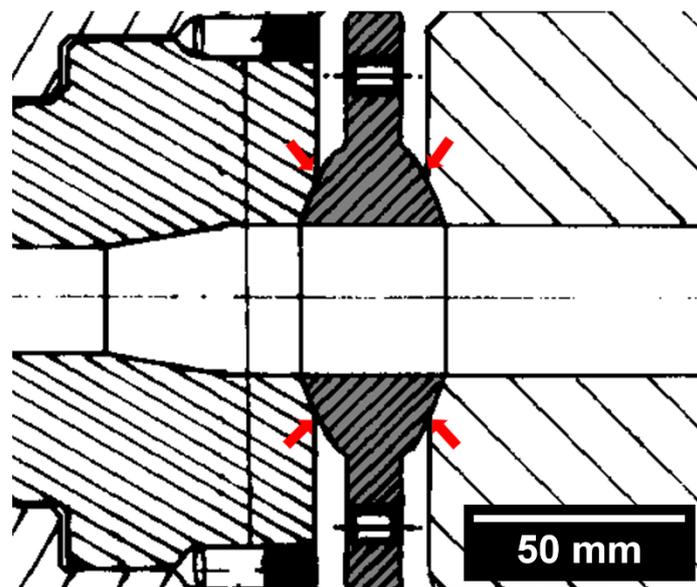


Figura 18 - Desenho representativo da vedação. Da direita para esquerda: sede, junta *lens ring* e flange de entrada. Setas indicam o esmagamento. (Fonte: o Autor, 2024)

A amostra secundária foi estudada com o objetivo de reforçar os resultados e conclusões obtidos a partir da análise da amostra principal. Ambas as amostras passaram por inspeções visuais detalhadas com o auxílio de uma lupa, apresentando comportamentos de falha similares. Esses resultados indicam uma consistência no modo de falha identificado nas peças.

A Tabela 5.2.1 apresenta o sentido predominante de propagação das trincas na geometria da *lens ring* em estudo. Durante a análise, foi possível identificar regiões onde ocorrem combinações de tensões em diferentes direções que intensificam a concentração de esforços.

Tabela 5.2.1 Imagens de lupa de propagação da amostra secundária.

Propagação da falha na amostra secundária

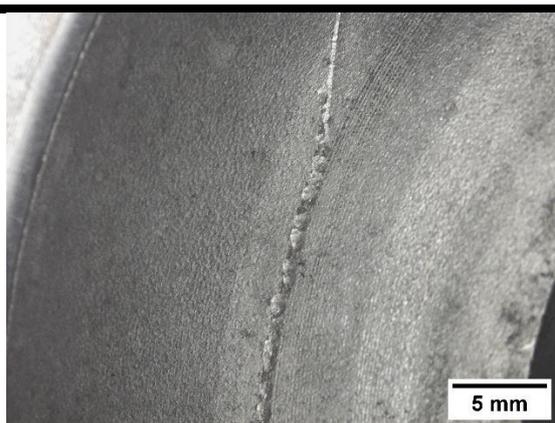


Figura 19 - Amassamento e trinca no raio intermediário (Fonte: o Autor, 2024)

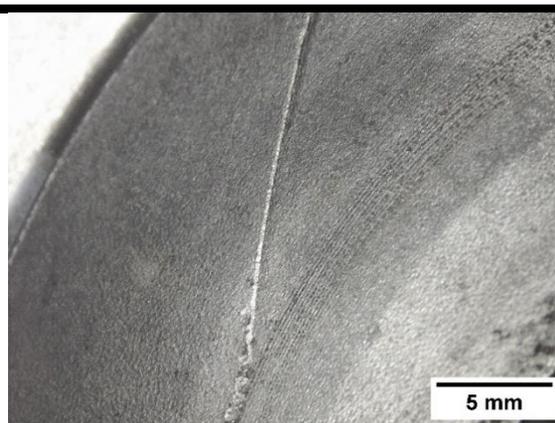


Figura 20 - Trinca propagando do raio intermediário para o externo (Fonte: o Autor, 2024)

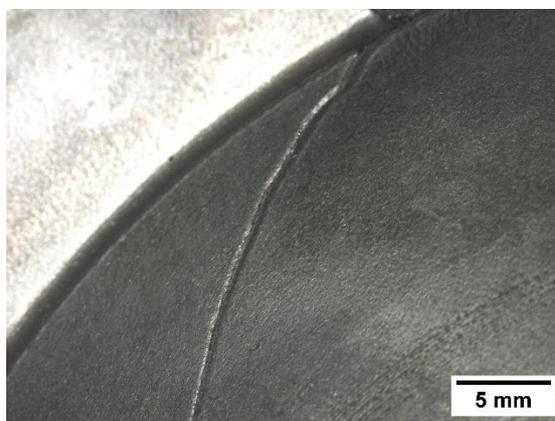


Figura 21 - Trinca no raio externo (Fonte: o Autor, 2024)

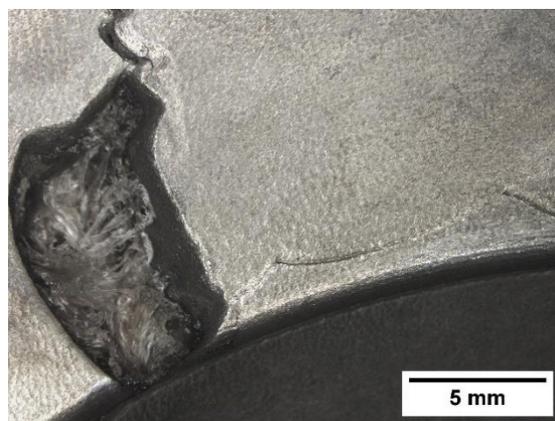


Figura 22 - Trinca com resina termoplástica dividindo-se em duas (Fonte: o Autor, 2024)

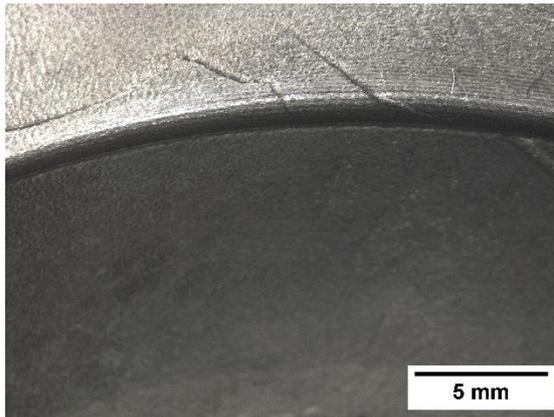


Figura 23 - Trinca volta a se propagar em direção aos raios (Fonte: o Autor, 2024)

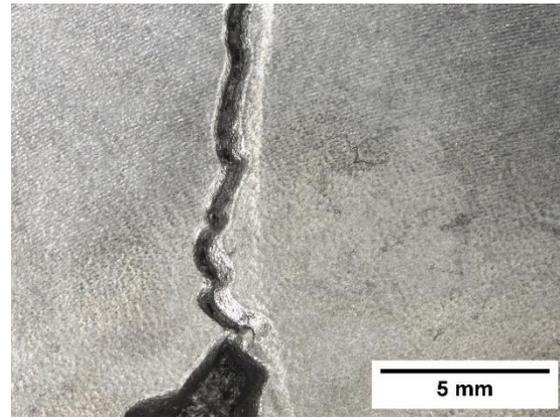


Figura 24 - Trinca secundária que se propagou às arestas (Fonte: o Autor, 2024)

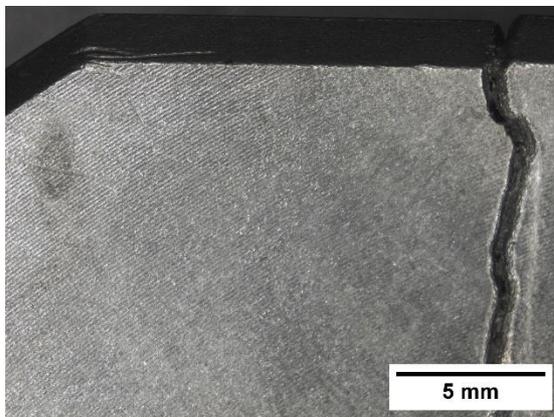


Figura 25 - Trinca percorrendo ambos lados da amostra, região com baixa seção resistente (Fonte: o Autor, 2024)

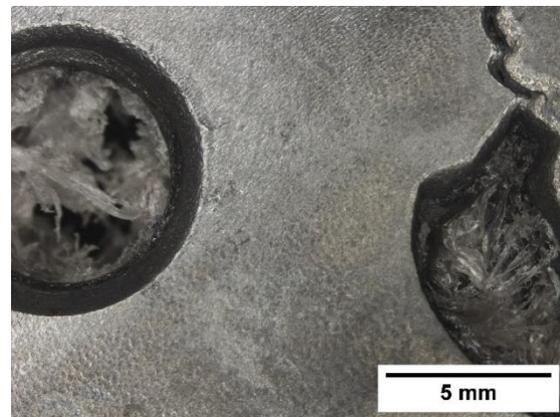


Figura 26 - Proximidade de falha com o furo roscado, ambos com resina que vazou (Fonte: o Autor, 2024)

---

Fonte: o Autor, 2024.

Os ensaios realizados com o perfilômetro e o rugosímetro foram fundamentais para identificar, de forma gráfica e detalhada, as alterações geométricas na superfície da *lens ring*, Figura 27. Na primeira região analisada, correspondente ao raio externo com angulação mais acentuada, representada na Figura 28, foi realizado apenas o ensaio de perfilometria, que apresentou resultados satisfatórios. Conforme ilustrado na Figura 18, o raio externo aparenta estar dentro das especificações do projeto. No entanto, sua geometria ainda representa um ponto crítico para a nucleação de trincas, devido à troca de nível na superfície causada pelo raio considerável que divide as transições geométricas.

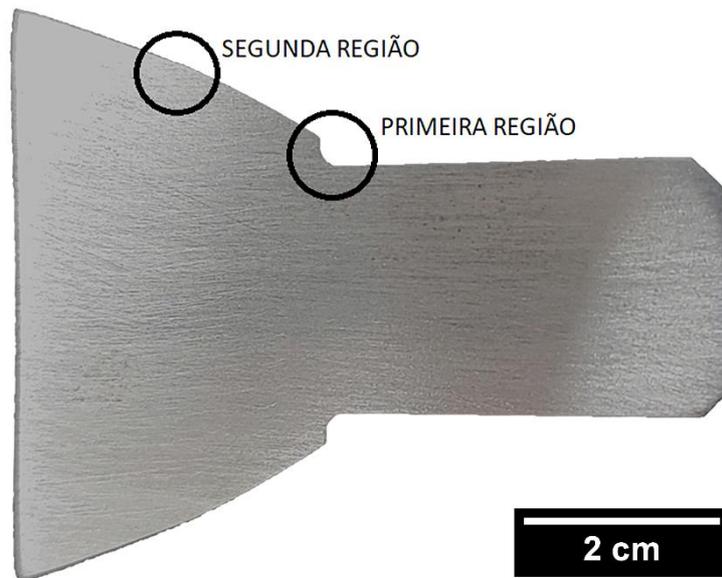


Figura 27 - Regiões de superfície estudadas, corte longitudinal (Fonte: o Autor, 2024)

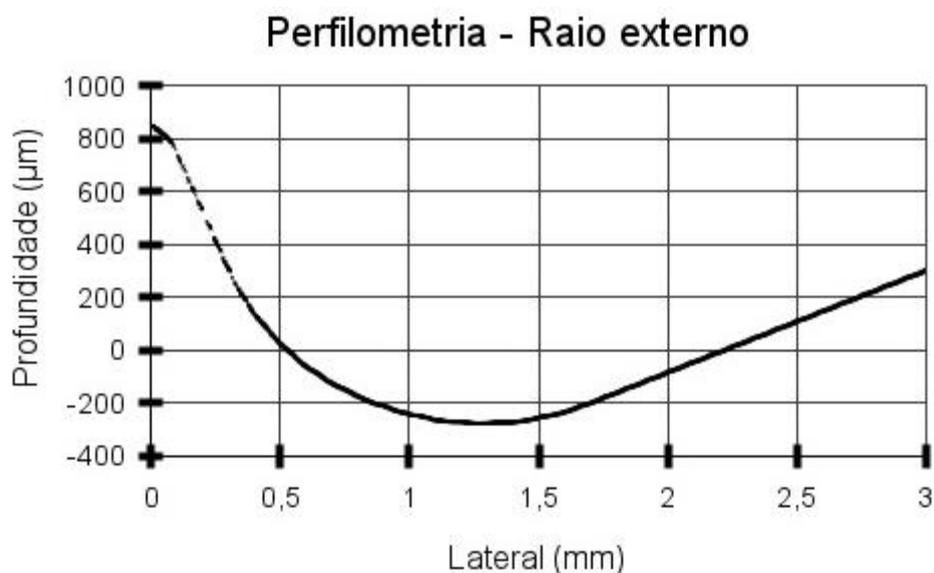


Figura 28 - Superfície do raio externo no perfilômetro (Fonte: o Autor, 2024)

Já na segunda região analisada, correspondente ao raio intermediário gerado durante o funcionamento da válvula, o ensaio de perfilometria, Figura 29, indicou que os resultados não foram muito satisfatórios, pois não conseguiu demonstrar, com clareza, o desvio significativo da superfície de vedação. Por outro lado, o ensaio realizado com o rugosímetro, Figura 30, identificou diferenças importantes na rugosidade e evidenciou a troca de angulação dos raios, demonstrando que, em vez de um único raio de curvatura, foi gerado um raio intermediário durante o processo de polimerização do eteno, o que fortalece as hipóteses levantadas anteriormente sobre as alterações geométricas da peça durante a operação.

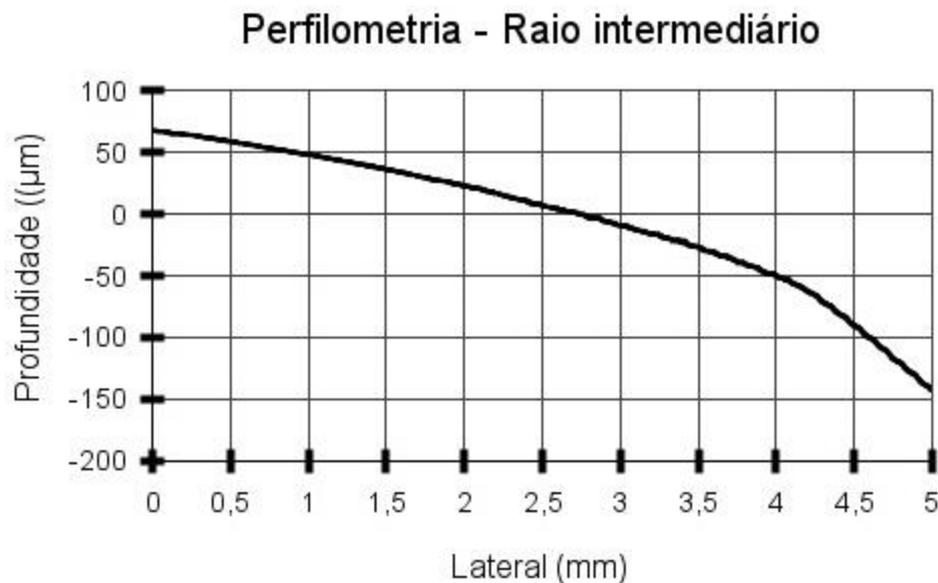


Figura 29 - Superfície do raio intermediário no perfilômetro (Fonte: o Autor, 2024)

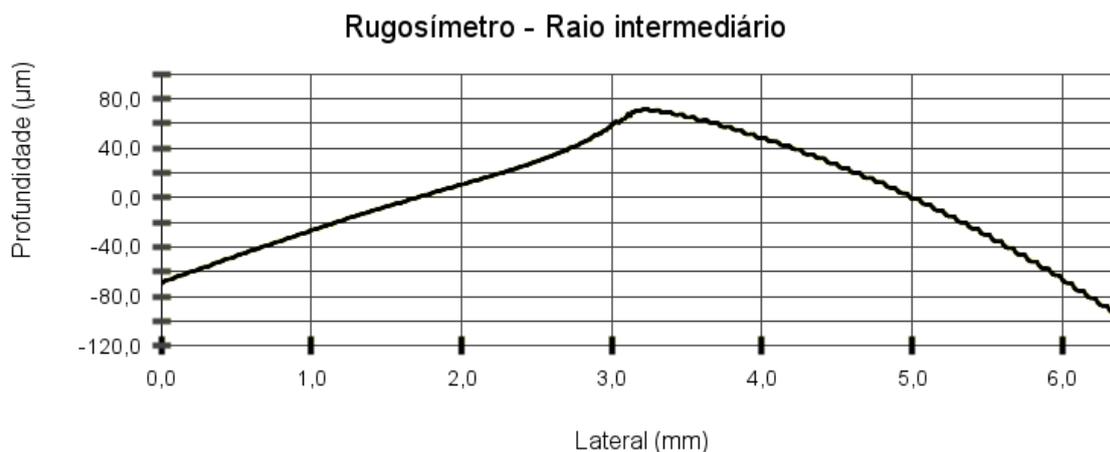


Figura 30 - Superfície do raio intermediário no rugosímetro (Fonte: o Autor, 2024)

A junta *lens ring* é fabricada em aço de baixa liga temperado e revenido, enquanto os componentes adjacentes geralmente utilizam aços AISI H11 e/ou AISI 4340, também submetidos a tratamentos térmicos similares. No entanto, uma diferença significativa reside no acabamento dessas peças. Enquanto a junta *lens ring* é exclusivamente usinada, os componentes ao seu redor passam por processos adicionais, como lapidação fina e polimento.

Essa diferença no acabamento pode influenciar diretamente no desempenho e na durabilidade dos componentes. O processo de lapidação fina e polimento reduz as irregularidades superficiais e a rugosidade. Em contraste, as marcas deixadas pela usinagem na junta *lens ring* tornam-se potenciais concentradores de tensões, contribuindo

para o surgimento e propagação de falhas, especialmente em regiões críticas da geometria. Portanto, a ausência de processos de acabamento mais refinados na *lens ring* pode ser considerada um fator relevante na análise das falhas observadas, especialmente em aplicações onde a peça está sujeita a esforços intensos e cíclicos.

### 5.3.FALHA

A seção A, onde foi localizada a trinca no material, foi subdividida em três partes: A1, A2 e A3. As fotografias obtidas com a câmera, após a limpeza da área de fratura, estão apresentadas na Tabela 5.3.1. As subdivisões A1 e A2 correspondem às superfícies principais de fratura de ambos os lados da peça. Essas superfícies apresentavam uma seção resistente reduzida, o que fez com que a peça se soltasse sem necessidade de esforço adicional após o seccionamento por corte. Na análise detalhada, identificou-se os prováveis pontos iniciais de nucleação da trinca na região do raio externo de vedação, localizado na área de transição mais aguda entre os planos.

Tabela 5.3.1 Seccionamentos da amostra principal na região de falha.

## Seccionamento da região da falha

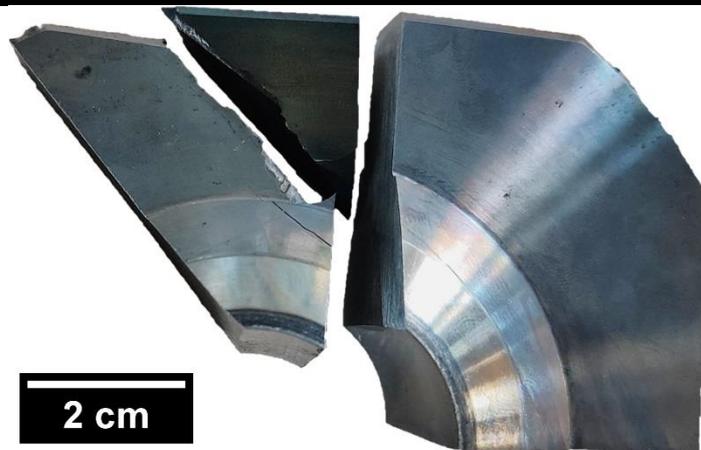


Figura 31 - Seção A, após o corte vertical. Seção A2, A1 e A3, da esquerda para direita (Fonte: o Autor, 2024)



Figura 32 – Superfície da fratura da subseção A2 (Fonte: o Autor, 2024)

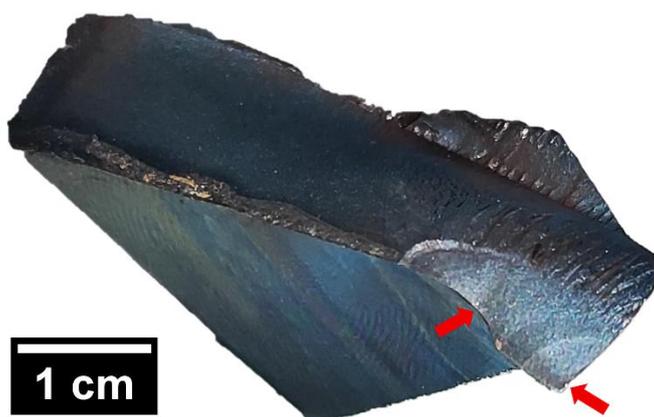


Figura 33 – Superfície de fratura da subseção A1. Setas indicam os possíveis pontos de início de trinca (Fonte: o Autor, 2024)

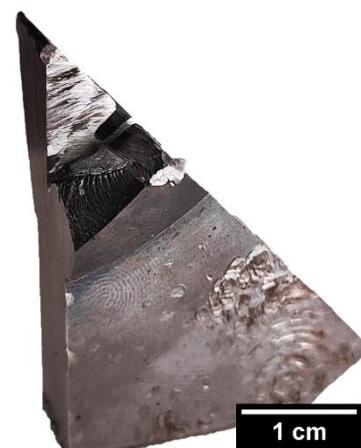


Figura 34 - Subseção A3, após abertura de fratura (Fonte: o Autor, 2024)

Fonte: o Autor, 2024.

A subseção A3, localizada na região do raio intermediário, apresentava uma seção resistente elevada em comparação às outras subdivisões. Para a abertura dessa fratura, foram empregados três métodos distintos: corte por máquina, imersão em nitrogênio líquido e corte com serra manual. Apesar de permanecer imersa em nitrogênio líquido por 30 minutos e de passar por outras tentativas de imersão, a subseção não demonstrou fragilidade significativa, indicando que esse método não foi eficaz para o aço DIN 1.6580.

Após a abertura bem-sucedida, identificou-se o terceiro e último possível ponto de nucleação de trinca.

As imagens obtidas com lupa, organizadas na Tabela 5.3.2, mostram detalhes dos dois pontos prováveis de início de trinca nas subseções A1 e A2, bem como marcas características na fratura, como marcas de praia, unhas de fadiga e regiões que apontam para uma falha por fadiga. Esses padrões são indicadores típicos de trincas em materiais submetidos a esforços cíclicos.

Na literatura, marcas de praia são frequentemente descritas como linhas concêntricas ou semicírculos formados ao longo da superfície de fratura, indicando os avanços sucessivos da trinca durante cada ciclo de carga. Unhas de fadiga, por sua vez, são áreas de transição entre os estágios inicial e avançado da propagação, representando um ponto de intensificação do processo de nucleação. Além disso, marcas de esforço, evidenciam o sentido do avanço da trinca, reforçando o diagnóstico de fadiga como principal mecanismo de falha. Esses elementos observados corroboram a teoria de que o material esteve sujeito a condições de carregamento cíclico severo (BHAUMIK et al, 2002)

Tabela 5.3.2 Falhas na região de fratura.

Falha por fadiga das Subseções A1 e A2

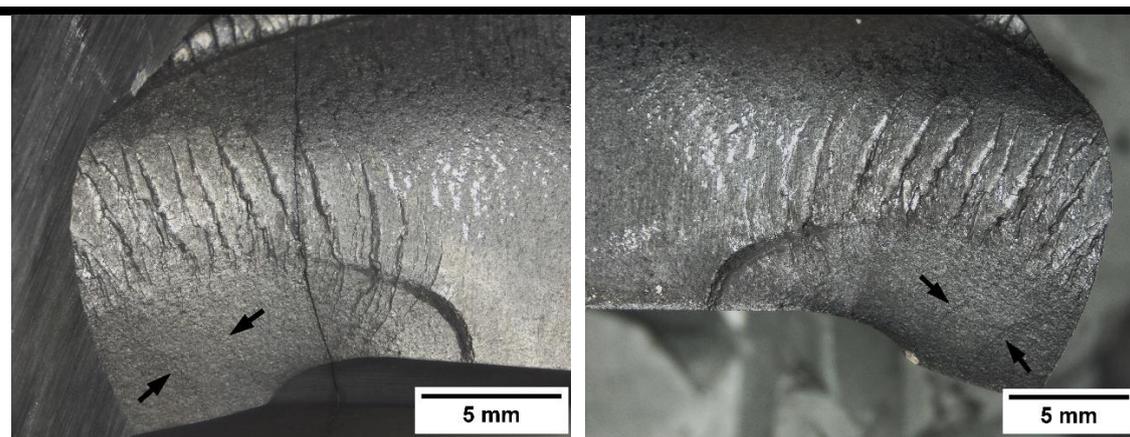


Figura 35 - Subseção A2 com marcas de praia (Fonte: o Autor, 2024)

Figura 36 - Subseção A1 com marcas de praia (Fonte: o Autor, 2024)

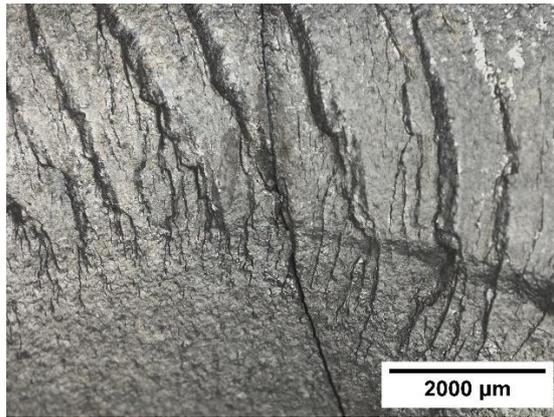


Figura 37 - Marcas de esforço e trinca secundária (Fonte: o Autor, 2024)

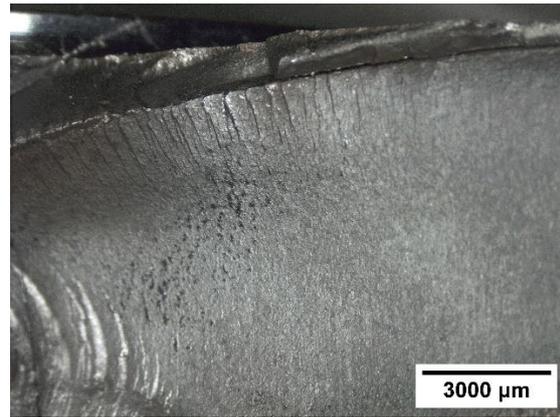


Figura 38 - Marcas de esforço (Fonte: o Autor, 2024)

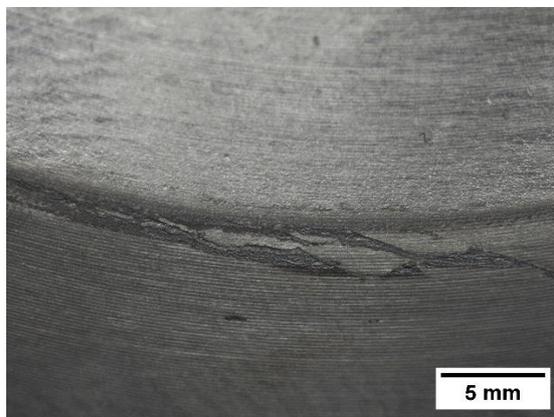


Figura 39 - Terceiro possível ponto de início de trinca (Fonte: o Autor, 2024)

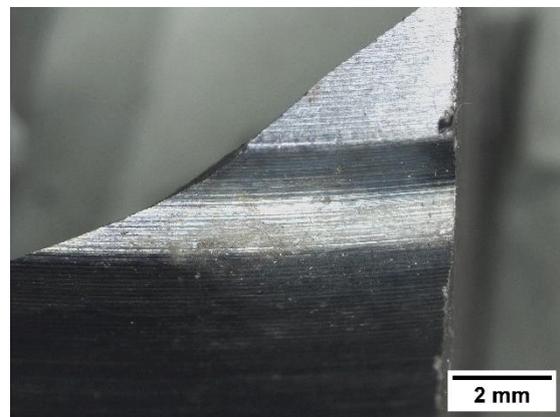


Figura 40 - Fratura evidenciando o raio externo (Fonte: o Autor, 2024)

---

Fonte: o Autor, 2024.

A partir da observação realizada com lupa, os pontos I e II foram identificados como os principais suspeitos de iniciarem a fratura. Por essa razão, a Tabela 5.3.3 apresenta as imagens detalhadas obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) desses pontos e de suas regiões circundantes, proporcionando uma análise mais precisa das características da fratura e das possíveis causas associadas. No Ponto I, foi identificada uma região de fadiga aparentemente incompleta, o que pode ser explicado pelo fato de o seccionamento realizado com o disco de corte possivelmente ter removido parte do real ponto de nucleação da trinca, que teria avançado em direção à face traseira da peça. O Ponto II, por sua vez, está localizado em uma posição próxima ao Ponto I, sugerindo uma relação direta entre os dois na propagação da falha.

Tabela 5.3.3 Análise microscópica em MEV dos pontos I e II no aço DIN 1.6580.

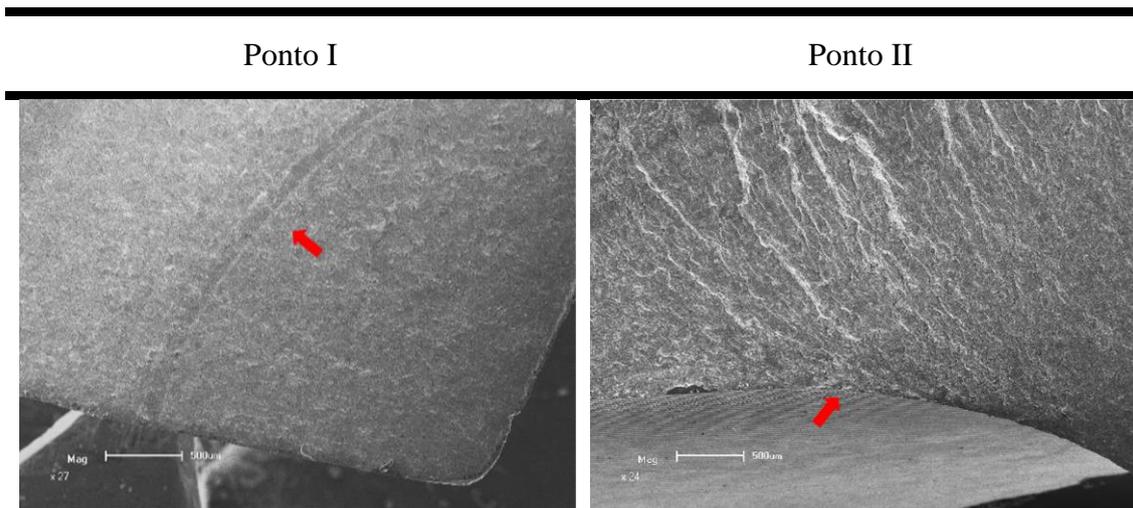


Figura 41 - Marca de praia e região de fadiga da Subseção A1 (Fonte: o Autor, 2024)

Figura 42 - Marcas que convergem para o semicírculo, possível nucleação (Fonte: o Autor, 2024)

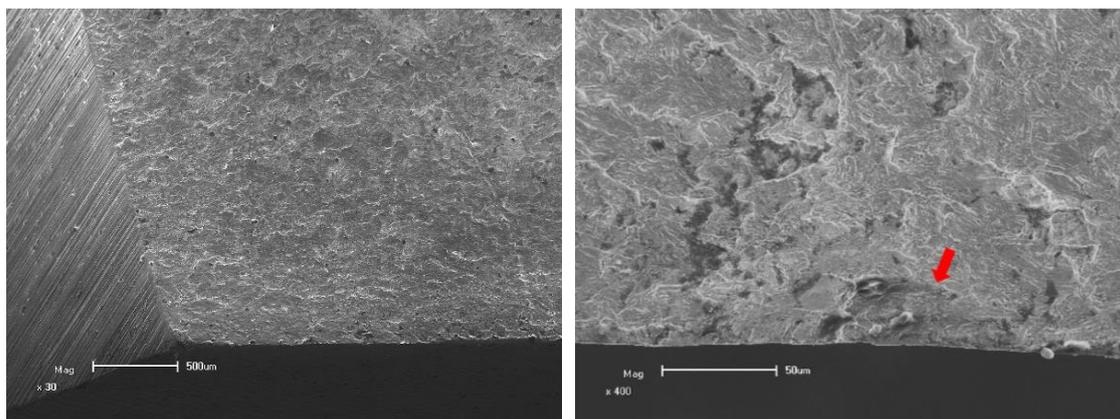


Figura 43 - Região ampliada da marca de praia (Fonte: o Autor, 2024)

Figura 44 - Ampliação de 400x na região do ponto II (Fonte: o Autor, 2024)

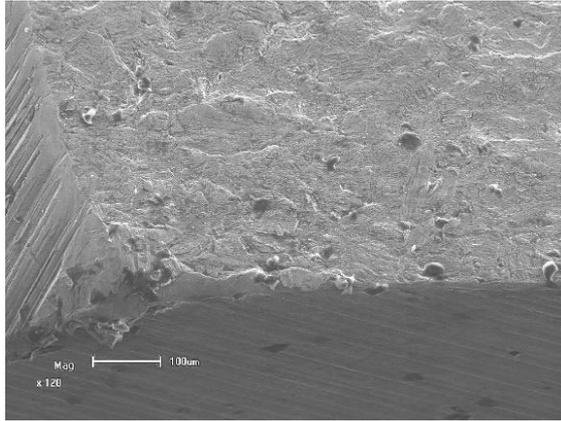


Figura 45 - Aumento em 120x do ponto I  
(Fonte: o Autor, 2024)

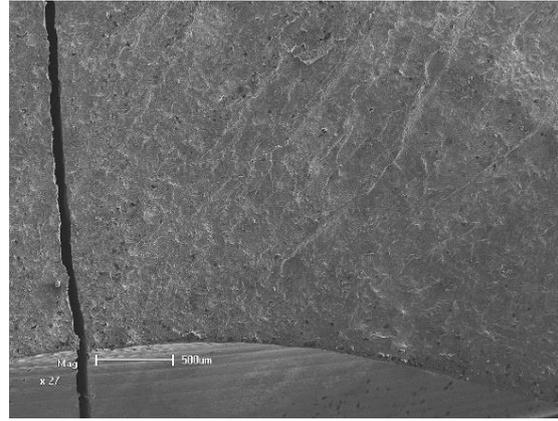


Figura 46 - Trinca secundária próxima do ponto II (Fonte: o Autor, 2024)

Fonte: o Autor, 2024.

O ponto III também foi analisado por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e foi identificado como um possível ponto de início da fratura, podendo ter atuado em concomitância com o ponto I, pois esse possível ponto de início apagado pelo seccionamento, apontava para o Ponto III. A Tabela 5.3.4 apresenta as imagens obtidas desse ponto e suas características detalhadas.

Tabela 5.3.4 Análise microscópica em MEV do ponto III no aço DIN 1.6580.

#### Ponto III

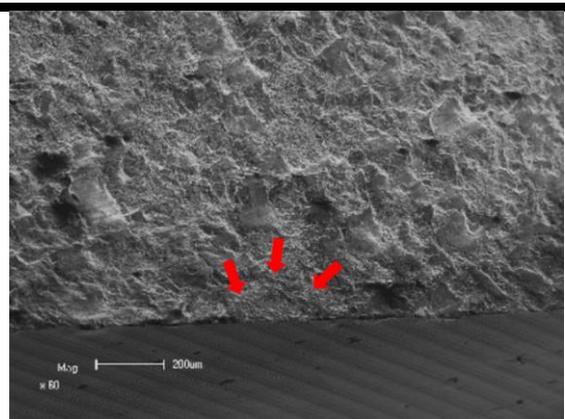


Figura 47 – Semicírculo no ponto III, possível nucleação (Fonte: o Autor, 2024)

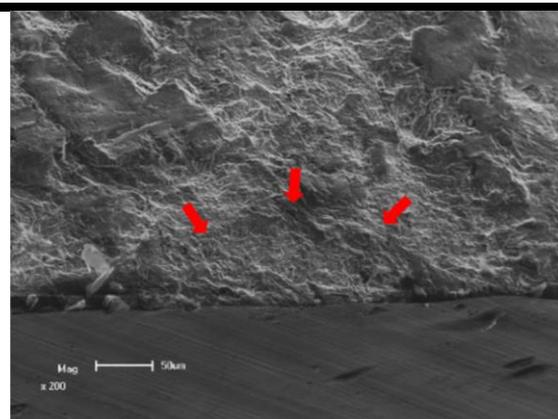


Figura 48 - Ampliação de 200x na região e amassamentos no ponto III (Fonte: o Autor, 2024)

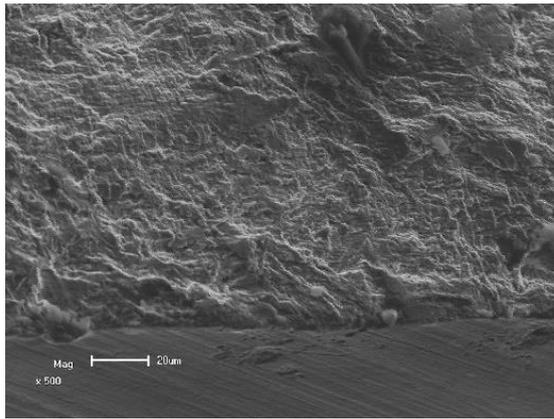


Figura 49 - Ampliação de 500x na região e degraus de fadiga (Fonte: o Autor, 2024)

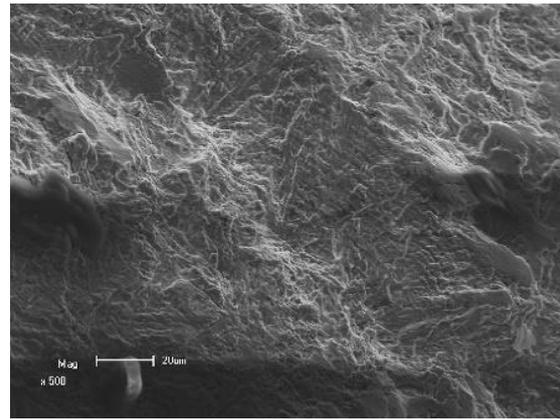


Figura 50 - Estrias de fadiga em 500x (Fonte: o Autor, 2024)

---

Fonte: o Autor, 2024.

A partir das avaliações realizadas tanto com lupa quanto com Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), concluiu-se que a fratura da junta *lens ring* teve origem na fadiga do componente. Os pontos I, II e III foram identificados como possíveis pontos de início da trinca, sendo evidenciados por marcas de praia e estrias de fadiga, que indicam a propagação cíclica da trinca a partir desses locais. Esses indícios sugerem que os pontos poderiam ter atuado conjuntamente no início da fratura.

Com base em todas as análises realizadas na junta *lens ring*, entende-se que a falha foi causada por deficiências associadas à geometria proposta no projeto, que favoreceu a concentração de tensões em regiões críticas. Além disso, verificou-se a presença de erosão no canal interno da junta, por onde circulam a resina termoplástica e o gás não reagido. Esse fenômeno de erosão é caracterizado pela degradação gradual da superfície devido ao impacto de partículas sólidas ou fluidos em alta velocidade, podendo também estar associado à cavitação. A cavitação ocorre quando bolhas de vapor formadas em regiões de baixa pressão colapsam em áreas de alta pressão, liberando energia que danifica a superfície do material. Essa forma de erosão pode ser particularmente prejudicial em sistemas dinâmicos, como válvulas e tubulações, devido à deterioração progressiva das superfícies metálicas (ZHENG et al., 2023).

No caso específico da junta *lens ring*, a erosão observada não teve influência direta no processo de falha, uma vez que a trinca não se originou nessa região. No entanto, sua presença no canal interno da junta, somada à degradação causada por cavitação, pode comprometer a integridade do obturador da haste da válvula, responsável pelo controle

de abertura e fechamento da passagem de produto. As Figuras 51 e 52 ilustram os processos envolvidos, facilitando a compreensão das características observadas durante as análises.

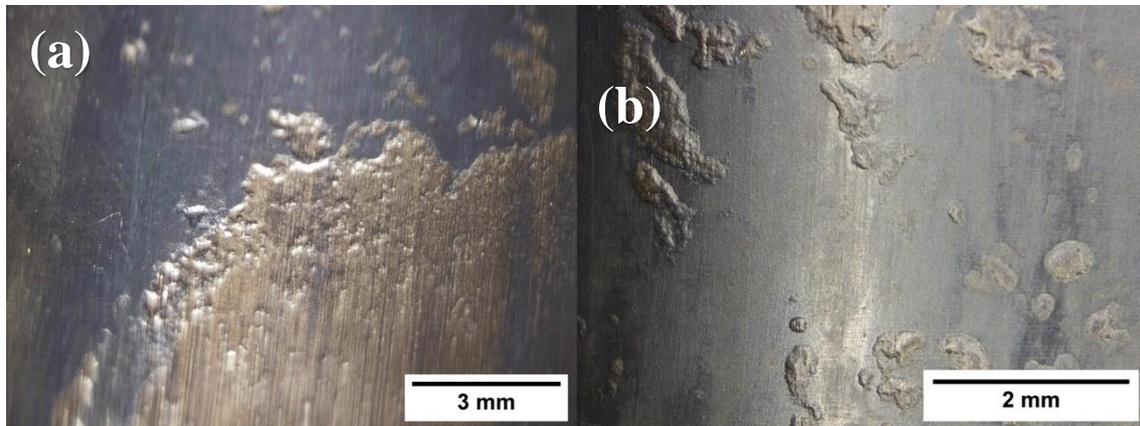


Figura 51 - Erosão por onde ocorre o fluxo de produto, (a) na amostra principal e (b) na secundária (Fonte: o Autor, 2024)



Figura 52 - Alguns componentes da válvula de controle de pressão em sequência de encaixe. Da direita para esquerda: haste/obturador, sede e junta *lens ring* (Fonte: o Autor, 2024)

Como dito anteriormente, o processo operacional da junta *lens ring* envolve a passagem de produto derivado da polimerização do eteno pelo canal interno, garantindo a estanqueidade entre dois componentes da válvula de controle de pressão. Conforme analisado, esse canal está sujeito à erosão por cavitação, enquanto a região de vedação sofre esforços concentrados significativos, o que compromete o controle de estanqueidade da válvula.

Para mitigar os problemas identificados, seria recomendável avaliar a possibilidade de suavizar todos os raios da junta *lens ring* que entram em contato direto e indireto com a sede e o flange de entrada, ou seja, em ambos os lados desse componente

simétrico. Uma solução viável seria atualizar a documentação de projeto para ajustar a parte convexa da junta, de forma que ela se encaixe perfeitamente na parte côncava dos outros componentes, eliminando desníveis e irregularidades. Essa modificação distribuiria melhor os esforços ao longo da junta, reduzindo a concentração de tensões nos pontos críticos apontados na análise de falha.

Além disso, outra abordagem seria implementar tratamentos térmicos localizados nas regiões identificadas como prováveis pontos de nucleação de trincas, aumentando a resistência à fadiga nessas áreas. Outra melhoria potencial seria alterar o acabamento superficial: em vez de ser exclusivamente usinada, a junta poderia ser polida na região de vedação, seguindo o mesmo padrão aplicado na sede e no flange. Isso reduziria as irregularidades e, conseqüentemente, a concentração de tensões, diminuindo a probabilidade de falhas.

Essas propostas podem não apenas minimizar a ocorrência de falhas na junta *lens ring*, mas também melhorar significativamente a segurança operacional. Caso a trinca se propague a ponto de ultrapassar a resistência à fadiga do material, o resultado seria o vazamento do produto, o que poderia levar a sérios acidentes industriais. Esse cenário, bem como os potenciais impactos, é ilustrado na Figura 53.



Figura 53 - Caso crítico de junta *lens ring* acoplada no flange de entrada com vazamento de produto (Fonte: o Autor, 2024)

## 6. CONCLUSÕES

Por meio da análise de falha realizada neste trabalho, foi possível alcançar o objetivo de identificar e compreender o mecanismo que levou ao trincamento da junta *lens ring*: falha por fadiga. A presença de fadiga foi evidenciada pela observação direta da abertura da trinca, onde foi possível identificar marcas de praia a olho nu, unhas de fadiga e marcas de esforço. Com o auxílio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), também foram visualizadas estrias e degraus de fadiga correspondentes aos ciclos de carga.

Para compreender completamente a falha por fadiga, foi necessário analisar o funcionamento do componente e avaliar diferentes seções da peça. Isso permitiu estudar, analisar e identificar a ramificação da árvore de falha mais representativa como causa da falha ocorrida. Constatou-se que os parâmetros de projeto contribuíram significativamente para a ocorrência da falha.

O material utilizado apresentou propriedades de fabricação que estavam dentro da faixa especificada no projeto e semelhantes aos valores reportados na literatura para o aço DIN 1.6580. A dureza média obtida foi de 34 HRC na escala Rockwell C e a metalografia confirmou a presença de martensita revenida, de acordo com os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento aplicados.

Com base nesses resultados, algumas melhorias são propostas. A principal seria a modificação dos raios que compõem a região de vedação da junta *lens ring*, suavizando-os para reduzir a concentração de tensões, já que foi observado que a propagação das trincas apresentava maior incidência nessas áreas, conforme os ensaios de superfície demonstraram. Consequentemente, os raios da sede e do flange de entrada também precisariam ser ajustados para garantir a compatibilidade geométrica. Outra recomendação seria melhorar o acabamento superficial nas regiões críticas da junta. Substituir o processo de usinagem simples por um polimento reduziria as marcas pronunciadas deixadas pelas ferramentas de usinagem, diminuindo os concentradores de tensão que contribuem para o início das trincas.

Por fim, este estudo possui grande relevância para empresas do setor de óleo e gás. A implementação das melhorias sugeridas pode reduzir significativamente o índice de falhas nas válvulas de controle de pressão localizadas no final do reator tubular na etapa

de polimerização. Isso resultaria em componentes capazes de suportar um maior número de ciclos sem falhar, diminuindo a necessidade de manutenções corretivas antes do MTBF (Tempo Médio entre Falhas) previsto. Além disso, esses aprimoramentos trariam benefícios significativos, como maior segurança operacional, dado que essas válvulas operam em condições de alta pressão e temperatura, e redução de perdas de produção devido a paradas não planejadas ocasionadas por falhas de estanqueidade.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para estudos futuros, recomenda-se a realização de uma análise por meio de modelos de elementos finitos, com o objetivo de investigar o estado de tensões no componente. Essa abordagem permitirá identificar oportunidades de melhoria no projeto, reduzindo as tensões concentradas em pontos de descontinuidades geométricas, que são críticos para o início de trincas.

Adicionalmente, sugere-se a realização de análises de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) no canal interno da junta *lens ring*. Esse estudo pode fornecer informações detalhadas sobre os efeitos da erosão presentes nessa região. Embora a erosão não tenha sido identificada como a causa inicial das falhas por fadiga na junta, ela pode contribuir para a corrosão no obturador da haste da válvula, afetando sua integridade a longo prazo. Dessa forma, seria possível evitar que o defeito na *lens ring* resulte de um acúmulo de danos secundários causados nos componentes adjacentes.

Por fim, recomenda-se uma análise mais detalhada dos tamanhos de grãos observados na microscopia óptica, correlacionando-os com as estruturas identificadas no MEV e comparando os resultados com os critérios estabelecidos pela norma ASTM E112 para determinação do tamanho de grão. Também a realização de ensaios com Ultrassom Phased Array, visando avaliar não apenas as trincas superficiais, mas também as internas e suas respectivas seções resistentes. Esse método avançado permitiria uma compreensão mais detalhada da propagação das trincas na amostra, fornecendo informações fundamentais para a melhoria do projeto e a prevenção de falhas similares no futuro.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, V. V. Análise de falha de componente de compressor primário em indústria petroquímica. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2023.

BHAUMIK S. K. et al. Fatigue fracture of crankshaft of an aircraft engine. *Engineering failure analysis*, v.9, p.255-263, 2002.

BAPTISTA, J. A. B. A importância da análise de causa raiz (Root cause analysis) na melhoria do desempenho da manutenção industrial. *Society for Maintenance & Reliability Professionals*, 2011.

BARBOSA, L. A.; CARVALHO, J. P.; ANDRADE, T. M. Influence of reaction temperature on the generation of gels during EVA production in tubular reactor. *Materia (Rio de Janeiro)*, v. 23, n. 04, p. 12231, 2018.

BERKOVITS, A. Variation of the cyclic strainhardening exponent in advanced aluminium alloys. *Int J Fatigue* 9, n.4, p. 229-232, 1987.

BOKIS, C. P.; PALMER, T. A.; KAYE, S. M. Physical properties, reactor modeling, and polymerization kinetics in the low-density polyethylene tubular reactor process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 41, n. 5, p. 1017-1030, 2002.

BORTZ, M.; WINK, R. Leakage analysis of a high pressure flange connection under bending moments: an analytic procedure. In: *Pressure Vessels and Piping Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2014. p. V005T05A012.

CALIANI, E. Modelagem e simulação de um reator autoclave para a produção de polietileno de baixa densidade (PEBD). Universidade Estadual de Campinas, tese de doutorado, 2005.

DEUTSCHE NORM. DIN EN 10083-3: Steels for quenching and tempering – Part 3: Technical delivery conditions for alloy steels. January, 2007.

EMERSON AUTOMOTION SOLUTIONS. *Control Valve Handbook*. 5. ed. 2019. 338 p.

FERNANDES, C. M. G. Aplicação de técnicas de manutenção preditiva aos

equipamentos de uma central hidroelétrica. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho (Portugal), 2013.

GONG, H. X.; XU, Z. G.; WANG, S. A model for analysing the self-tightening coefficient of a metallic lenticular ring gasket joined by a bolted flange. *Materials Research Innovations*, v. 19, 2015.

GRASSINI, U. Advanced analyses of let-down valves to improve LDPE plant performance. In: *Pressure Vessels and Piping Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2014. p. V005T05A005.

HARDESTY, F. *Metals Handbook Ninth Edition, Volume 1. Properties and Selection: Irons and Steels*: Bruce P. Bardes (Ed.), American Society for Metals, 1978.

HEUVEL, L. N. V. et al. *Root cause analysis handbook*. 3 ed. Houston: ABSG Consulting Inc., 2008. 322 p.

HEUVEL, L. N. Vanden et al. *Root cause analysis handbook: a guide to efficient and effective incident investigation*. Rothstein Publishing, 2008.

KUHN, N. B. Análise de causa raiz em falha de válvulas de controle de alta pressão aplicadas à indústria de processo – um estudo de caso. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Feevale, 2021.

LACUNZA, M. H.; CORBELLA, C.; GONZÁLEZ, E. Heat transfer coefficient in a high pressure tubular reactor for ethylene polymerization. *Polymer Engineering & Science*, v. 38, n. 6, p. 992-1013, 1998.

MA, X. C.; XU, G. F. Failure analysis of hydrogen corrosion of the lens gasket. *Applied Mechanics and Materials*, v. 37, p. 462-465, 2010.

MÁRQUEZ, A.; IBARRA, P. A.; DE BONA, J. Failure analysis of a let-down valve at a petrochemical plant. *Engineering Failure Analysis*, v. 16, n. 6, p. 1894-1902, 2009.

MOBLEY, R. K. *Maintenance engineering handbook*. 7 ed. McGraw-Hill, 2008.

MIRSHAWKA, V. *Manutenção Preditiva: Caminho para Zero Defeitos*. São Paulo: Makron Books, McGrawHill, 1991.

NEUMANN, G. A. Modelagem e simulação de um reator tubular de alta pressão para produção de PEBD. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

PEREIRA, F. A. Modelagem e simulação de um reator tubular de polimerização de etileno em alta pressão. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, tese de doutorado, 1997.

RIBEIRO, M. A. Válvulas de Controle e Segurança. 5. ed. Salvador, 1999. p. 259.

SCHMITT, J. C.; LIMA, C. R. C. Método de análise de falhas utilizando a integração das ferramentas DMAIC, RCA, FTA e FMEA. Revista Espacios, v. 37, n. 8, 2016.

SCHEFFER, C.; GIRDHAR, P. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance. Elsevier, 2004.

SUQUELI, G. Análisis de falla de componente de planta de LDPE. Tese (Doutorado) — Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería, Argentina, 2019.

TEIXEIRA, E. S. M.; TEXEIRA, M. A. Estudo da construção de uma árvore de análise de falhas aplicada em um equipamento de uma empresa de assistência técnica. In: III Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, Ponta Grossa, PR, Brasil, 2013.

ZABISKY, R. C. M. L.; CORRÊA, A. S.; PEREIRA, F. A kinetic model for olefin polymerization in high-pressure tubular reactors: a review and update. Polymer, v. 33, n. 11, p. 2243-2262, 1992.

ZHENG, Z. et al. Investigation on failure process and structural optimization of a high pressure letdown valve. Engineering Failure Analysis, v. 66, p. 223-239, 2016.

ZUMUFEN, L; KIRCHHEIM, A; DENNIG, H. Laser powder bed fusion of 30CrNiMo8 steel for quenching and tempering: examination of the processability and mechanical properties. Progress in Additive Manufacturing, v.5, p.75-81, 2020.