

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

**ANÁLISE DE FALHA DE COMPONENTE DE COMPRESSOR
PRIMÁRIO EM INDÚSTRIA PETROQUÍMICA**

Victória Veiga Aquino

Trabalho de Diplomação de Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Favaro
Coorientador: Prof. Dr. André Ronaldo Froehlich

Porto Alegre

2023

CIP - Catalogação na Publicação

Aquino, Victória Veiga

ANÁLISE DE FALHA DE COMPONENTE DE COMPRESSOR
PRIMÁRIO EM INDÚSTRIA PETROQUÍMICA / Victória Veiga
Aquino. -- 2023.

61 f.

Orientador: Marcelo Favaro.

Coorientador: André Ronaldo Froehlich.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Análise de Falha. 2. Compressores Industriais.
3. Indústria Petroquímica. I. Favaro, Marcelo, orient.
II. Froehlich, André Ronaldo, coorient. III. Título.

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

Dedico o presente trabalho aos meus avós,
Olenka e Holmes Aquino.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos mais sinceros às pessoas direta ou indiretamente envolvidas com meu desenvolvimento pessoal, acadêmico e profissional, que resultaram neste trabalho;

À minha família, em especial à minha mãe Karina, que me incentiva desde criança a ser estudiosa, esforçada e a sempre estar em busca da minha melhor versão. Obrigada por acreditar em mim e por me proporcionar os recursos para chegar até aqui;

Aos meus amigos, pelo suporte emocional durante a minha jornada universitária;

À equipe da engenharia de manutenção da Braskem, em especial aos meus colegas do grupo de inspeção de equipamentos, por todo o apoio na realização deste trabalho, no meu estágio e por agregarem muitos ensinamentos para a minha carreira profissional;

Ao Eng. Marcelo Zanon, pelo suporte técnico no desenvolvimento do presente estudo;

Aos meus líderes de estágio, Eng. Maurício Lemes e Eng. Dalton Maron, por confiarem em mim e pelo suporte durante meu período de estágio;

Ao meu orientador, Dr. Marcelo Favaro, pelo apoio e ensinamentos passados durante a realização deste trabalho;

Ao meu coorientador, Dr. André Froehlich, pelos conselhos e ensinamentos para o desenvolvimento do presente trabalho;

Aos meus colegas do Grupo de Análise de Falha do LAMEF que me ajudaram durante a realização da parte prática deste trabalho;

Aos professores Dr. Antônio Vilela e Dr. Afonso Reguly pelo suporte na cadeira de trabalho de conclusão que foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho;

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela oportunidade de poder conquistar o título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica e por ser uma instituição brasileira de referência na pesquisa acadêmica.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XX
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. MANUTENÇÃO PREDITIVA.....	4
3.2. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PEBD E EVA.....	7
3.3. COMPRESSORES INDUSTRIAIS	9
3.3.1. COMPRESSÃO PRIMÁRIA	10
3.4. PRATO 3	13
3.5. ANÁLISE DE FALHA.....	14
3.5.1. ESTUDOS DE CASO SOBRE MECANISMOS DE TRINCAMENTO	16
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
4.1. ESTUDO DO MATERIAL COMO RECEBIDO	20
4.2. ESTUDO DA SEÇÃO C: PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA PEÇA	22
4.3. ESTUDO DA SEÇÃO D: PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA PEÇA	23
4.4. ESTUDO DA SEÇÃO E: PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA PEÇA.....	24
4.5. ESTUDO DA SEÇÃO A: FALHA	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
5.1. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA PEÇA	26
5.2. MICROESTRUTURA DO MATERIAL	33
5.3. FALHA	36

6. CONCLUSÕES	44
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	45
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama P-V Ideal (Fonte: Braskem, 2015)	12
Figura 2 – Diagrama P-V (Fonte: Braskem, 2015)	12
Figura 3 – Fluxograma das etapas realizadas neste trabalho (Fonte: a Autora, 2023) ...	20
Figura 4 – Prato 3 como recebido, seta em vermelho indicando a trinca no componente (Fonte: a Autora, 2023)	21
Figura 5 – Prato 3 marcado nas seções A, B, C, D e E que foram para avaliação, as linhas brancas tracejadas representam onde o corte foi realizado (Fonte: a Autora, 2023)	21
Figura 6 – Seção transversal C (Fonte: a Autora, 2023)	22
Figura 7 – Seção D marcada nas subseções D1 e D2, linha tracejada branca representa onde o corte foi realizado (Fonte: a Autora, 2023).....	23
Figura 8 – Seção E marcada nas subseções E1 e E2, linhas tracejadas brancas indicam onde os cortes foram realizados (Fonte: a Autora, 2023).....	24
Figura 9 – Seção A, subseções A1 e A2 indicadas (Fonte: a Autora, 2023).....	25
Figura 10 – Seção C, canal de refrigeração obstruído (Fonte: a Autora, 2023)	26
Figura 11 – Seção C, imagem feita no programa ImageJ, parcela em vermelho corresponde ao espaço livre no canal de refrigeração que permite a passagem de água (Fonte: a Autora, 2023)	27
Figura 12 – Seção C, ensaio de LP para revelar o inserto do canal de refrigeração (Fonte: a Autora, 2023)	27
Figura 13 – Macrografia da seção C, inserto soldado visualizado na lupa, utilizando um aumento de 0,67x (Fonte: a Autora, 2023).....	28
Figura 14 – Macrografia da subseção D1, superfície escaneada, indicadas as regiões que compõem a peça: em verde corresponde a peça base, amarelo ao inserto vertical e vermelho ao inserto horizontal (Fonte: a Autora, 2023)	28
Figura 15 – Macrografia da subseção D1, superfície escaneada, indicadas as três soldas realizadas para compor a peça: I e III correspondem as soldas do inserto vertical, II a solda do inserto horizontal (Fonte: a Autora, 2023).....	29
Figura 16 – Desenho esquemático da subseção D1, indicadas nas setas vermelhas as solicitações mecânicas, em amarelo o canal de refrigeração e em azul as soldas (Fonte: a Autora, 2023).....	30

Figura 17 – Desenho esquemático da subseção D1, separadas por cores as divisões da peça: em verde a peça base, amarelo o inserto vertical, vermelho o inserto horizontal e em azul as soldas (Fonte: a Autora, 2023).....	30
Figura 18 – Microestrutura da solda I em 100x (Fonte: a Autora, 2023).....	31
Figura 19 – Microestrutura da solda I em 500x (Fonte: a Autora, 2023).....	31
Figura 20 – Microestrutura da solda II em 100x (Fonte: a Autora, 2023)	31
Figura 21 – Microestrutura da solda II em 500x (Fonte: a Autora, 2023)	31
Figura 22 – Microestrutura da solda III em 100x (Fonte: a Autora, 2023).....	31
Figura 23 – Microestrutura da solda III em 500x (Fonte: a Autora, 2023).....	31
Figura 24 – Subseções E1 e E2 (Fonte: a Autora, 2023).....	33
Figura 25 – Macrografia da seção C, identificação das regiões analisadas no microscópio óptico: I é a região superior, II região central A, III região central B, IV região do inserto e V região inferior (Fonte: a Autora, 2023).....	34
Figura 26 – Microestrutura do ponto I em 100x (Fonte: a Autora, 2023).....	34
Figura 27 – Microestrutura do ponto I em 500x (Fonte: a Autora, 2023).....	34
Figura 28 – Microestrutura do ponto II em 100x (Fonte: a Autora, 2023)	35
Figura 29 – Microestrutura do ponto II em 500x (Fonte: a Autora)	35
Figura 30 – Microestrutura do ponto III em 100x (Fonte: a Autora, 2023)	35
Figura 31 – Microestrutura do ponto III em 500x (Fonte: a Autora, 2023)	35
Figura 32 – Microestrutura do ponto IV em 100x (Fonte: a Autora, 2023).....	35
Figura 33 – Microestrutura do ponto IV em 500x (Fonte: a Autora, 2023).....	35
Figura 34 – Microestrutura do ponto V em 100x (Fonte: a Autora, 2023)	36
Figura 35 – Microestrutura do ponto V em 500x (Fonte: a Autora, 2023)	36
Figura 36 – Fratura da seção A, subseções A1 e A2, setas vermelhas indicando as marcas de praia e setas amarelas indicando as soldas (Fonte: a Autora, 2023)	37
Figura 37 – Subseção A2, indicadas as regiões I, II e III os possíveis pontos de início da trinca (Fonte: a Autora, 2023)	37
Figura 38 – Imagem da região I em 0,67x, seta vermelha indicando o ponto de início da trinca (Fonte: a Autora, 2023)	38

Figura 39 – Imagem da região I em 2x (Fonte: a Autora, 2023).....	38
Figura 40 – Imagem da região II em 0,67x, seta vermelha indicando o ponto de início da trinca (Fonte: a Autora, 2023)	38
Figura 41 – Imagem da região II em 2x (Fonte: a Autora, 2023).....	38
Figura 42 – Imagem da região III em 0,67x, seta vermelha indicando o ponto de início da trinca (Fonte: a Autora, 2023)	39
Figura 43 – Imagem da região III em 2x (Fonte: a Autora, 2023)	39
Figura 44 – Ponto I em 100x no MEV (Fonte: a Autora, 2023)	39
Figura 45 – Ponto I em 200x no MEV (Fonte: a Autora, 2023)	39
Figura 46 – Estrias de fadiga. Ponto I em 500x no MEV (Fonte: a Autora, 2023).....	40
Figura 47 – Estrias de fadiga. Ponto I em 1000x no MEV (Fonte: a Autora, 2023).....	40
Figura 48 – Ponto III em 100x no MEV (Fonte: a Autora, 2023).....	40
Figura 49 – Ponto III em 500x no MEV (Fonte: a Autora, 2023).....	40
Figura 50 – Estrias de fadiga. Ponto III em 500x no MEV (Fonte: a Autora, 2023)	41
Figura 51 – Estrias de fadiga. Ponto III em 1000x no MEV (Fonte: a Autora, 2023) ...	41
Figura 52 – Ponto II em 30x no MEV (Fonte: a Autora, 2023)	42
Figura 53 – Ponto II em 100x no MEV (Fonte: a Autora, 2023)	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Microestruturas das três soldas realizadas para a confecção do Prato 3, em aço AISI 304L. Subseção D1. Regiões ordenadas na Figura 15. Imagens feitas no microscópio óptico Leica, em 100 e 500x (Fonte: a Autora, 2023)	31
Tabela 5.2 – Microdurezas das três soldas realizadas para a confecção do Prato 3, em aço AISI 304L. Subseção D1. Pontos ordenados na Figura 15. Imagens feitas no durômetro Instron, em Vickers, carga 300g (HV 0.3) (Fonte: a Autora, 2023)	32
Tabela 5.3 – Microestruturas do aço AISI 304L. Seção C. Regiões ordenadas na Figura 25. Imagens feitas no microscópio óptico Leica em 100 e 500x de aumento (Fonte: a Autora, 2023).....	34
Tabela 5.4 – Microdurezas do aço AISI 304L. Pontos ordenados na Figura 25. Medições feitas no durômetro Instron – em Vickers, carga 300g (Fonte: a Autora, 2023)	36
Tabela 5.5 – Imagens dos possíveis pontos de início da trinca no aço AISI 304L. Subseção A2. Regiões ordenadas na Figura 37. Imagens feitas na lupa em 0,67 e 2x de aumento (Fonte: a Autora, 2023).....	38
Tabela 5.6 – Análise microscópica do ponto I no aço AISI 304L. Subseção A2. Imagens feitas no MEV (Fonte: a Autora, 2023).....	39
Tabela 5.7 – Análise microscópica do ponto III no aço AISI 304L. Subseção A2. Imagens feitas no MEV (Fonte: a Autora, 2023)	40
Tabela 5.8 – Análise microscópica do ponto II no aço AISI 304L. Subseção A2. Imagens feitas no MEV (Fonte: a Autora, 2023)	42

RESUMO

As indústrias petroquímicas são fundamentais na fabricação de produtos de base para diversos setores. Para que a produção se mantenha, múltiplos equipamentos são utilizados, como compressores, reatores, fornos, entre outros. O presente trabalho objetivou o estudo do mecanismo de falha ocorrido em um componente de compressor, o prato 3. Este é um elemento do compressor primário da planta de alta pressão da petroquímica Braskem. A trinca foi percebida durante a parada de manutenção, pois gerou um vazamento de gás. Falhas como essa podem ocasionar em perda de faturamento e risco a saúde dos colaboradores. Para que fosse realizada a avaliação do defeito, o componente foi levado para o laboratório e dividido em algumas seções, cada uma objetivou avaliar uma potencial motivação para o surgimento da trinca. Dessa maneira, foi possível analisar os prováveis fatores que poderiam influenciar no surgimento da trinca, como seu processo de fabricação, operação e questões microestruturais. A partir desse estudo, se constatou que a sistemática da peça e o seu funcionamento estão diretamente ligados a falha, que se deu por fadiga, iniciando em dois pontos concentradores de tensões. Por fim, foi possível propor algumas sugestões para que falhas como essa possam ser evitadas, como um método diferente de processo de fabricação e de operação do prato 3.

Palavras-chave: indústrias petroquímicas, compressor, falha, fadiga.

ABSTRACT

The petrochemical industries are fundamental in manufacturing basic products for several sectors. In order to maintain production, multiple pieces of equipment are used, such as compressors, reactors, and furnaces, among others. This work aimed to study the failure mechanism that occurred in a compressor component, plate 3. This is an element of the primary compressor of the high-pressure plant of the petrochemical company Braskem. The crack was noticed during the maintenance shutdown, as it generated a gas leak. Failures like this can lead to revenue loss and risk to employees' health. In order to carry out the evaluation of the defect, the component was taken to the laboratory and divided into some sections, each one aimed to evaluate a potential motivation for the appearance of the crack. In this way, it was possible to analyze the probable factors that could influence the appearance of the crack, such as its manufacturing process, operation, and microstructural issues. Based on this study, it was found that the systematics of the part and its operation are directly linked to failure, which occurred due to fatigue, starting at two stress concentration points. Finally, it was possible to propose some suggestions so that failures like this could be avoided, such as a different method of the manufacturing process and operation of plate 3.

Keywords: petrochemical industries, compressor, failure, fatigue.

1. INTRODUÇÃO

A indústria petroquímica se utiliza de diversos processos para produção de matérias-primas derivadas do petróleo. A Braskem S. A. é líder de produção de resinas termoquímicas nas Américas e a sexta maior indústria petroquímica do mundo, em 2021 a receita líquida atingida pela empresa foi de 19,6 bilhões de dólares. A produção é de mais de 10 milhões de toneladas de químicos e está focada em resinas polietileno (PE), polipropileno (PP) e policloreto de vinila (PVC). Por se tratar de uma indústria de base, a Braskem participa de diversas cadeias produtivas e é fundamental em questões econômicas mundiais. Os produtos garantem soluções para aprimoramento em setores como alimentação, moradia e mobilidade (BRASKEM, 2023).

Dentre os diferentes produtos confeccionados, o polietileno de baixa densidade (PEBD) e o etileno acetato de vinila (EVA) são dois dos mais comercializados. Estes são químicos produzidos na planta que trabalha a alta pressão da Braskem, a PE-6. Uma das primeiras etapas do processo é a compressão do gás eteno preto, realizada no compressor primário. Os compressores apresentam um funcionamento complexo, combinando diferentes partes como eixos, mancais, motores, turbinas, vaporização, lubrificação, vibração e diversos estágios de compressão. Dessa maneira, existem muitas oportunidades de melhoria quando relacionado a manutenção de compressores, além de vários aprendizados a se obter, estudando e se aprofundando em seu processo.

O processo de compressão primária se divide em cinco estágios, sendo que a cada um deles a pressão é aumentada. Em 2020, durante a parada de manutenção, foi verificado um vazamento de gás eteno no quinto estágio, mais especificamente no prato 3, que faz parte do sistema do cilindro de compressão da máquina. Tal sistema se dá através do engastamento dos pratos que compõem o cilindro. Por isso, o prato foi retirado de operação e inspecionado, dessa forma foi verificado uma trinca no material. O presente trabalho estuda o mecanismo de falha que levou ao surgimento desse defeito. São avaliados diferentes parâmetros para justificar o problema, como fatores mais abrangentes – processo de funcionamento do compressor – e fatores mais específicos – rota de fabricação do componente, microestrutura, entre outros.

Para garantia da continuidade e qualidade da produção, os integrantes do grupo de manutenção de engenharia da Braskem exercem a função de manter os equipamentos

operando durante o período correto, sem causar riscos à integridade dos operadores, da máquina e do processo. Assim, são realizadas manutenções periodicamente, que devem ocorrer respeitando o fluxo do mercado, minimizando a perda de produção. As horas que uma máquina passa fora de operação correspondem a redução de toneladas de produtos que deveriam ser produzidos, o que leva a perda de dinheiro. Para isso, a manutenção preditiva serve para estimar o tempo de vida dos equipamentos e suas possíveis falhas e defeitos, assim, sendo realizadas intervenções antes que eles se danifiquem.

A partir desse contexto, se torna relevante o desenvolvimento deste trabalho, é verificado que diversas causas podem explicar a falha de um componente e, normalmente, o que ocorre é uma combinação de fatores que levam ao problema. O entendimento de como esses aspectos trabalham em conjunto é o que leva a explicação da origem do defeito e é nesse momento que se faz importante o papel da análise de falha.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo identificar e entender o mecanismo de falha de um componente do compressor primário que trabalha à alta pressão em uma planta petroquímica industrial, o prato 3. A fim de propor melhorias que evitem a falha prematura da peça e a consequente perda de tempo e lucro de produção.

Para que o mecanismo de falha seja indicado, alguns precedentes devem ser apontados, como a obtenção de dados de funcionamento do prato 3 na área onde ele trabalha.

Além disso, é preciso estabelecer uma correlação entre o processo de fabricação, operação e a microestrutura do componente com o acontecimento da falha, de maneira a conhecer quais parâmetros mais influenciam no ocorrido.

E por fim, propor melhorias que contribuam para o processo, como modificações no projeto e na operação do componente.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica dos tópicos relevantes para a fundamentação teórica deste trabalho. Ele está dividido nas seções: revisão de publicações sobre manutenção preditiva, explicação do processo de produção de PEBD e EVA, revisão sobre compressores industriais, conceituação de análise de falha e na verificação de estudos já realizados sobre mecanismos de trincamento.

3.1. MANUTENÇÃO PREDITIVA

Em 1994, a NBR 5462 – ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) definiu a manutenção como:

“A combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida (NBR 5462 – ABNT, 1994).”

Com o acelerado avanço da tecnologia da informação, os equipamentos foram se tornando cada vez mais dinâmicos, rápidos, complexos, enxutos e leves. Ao passo que diversas tecnologias foram surgindo e agregando qualidades às máquinas, algumas deficiências também puderam ser apontadas, como um fator de segurança mais baixo, matérias-primas que precisam apresentar um alto padrão de qualidade, operadores melhor capacitados e uma sequência de razões que tornam os equipamentos sempre mais dependentes de uma manutenção efetiva e bem qualificada. Mesmo assim, a manutenção sozinha representa pouco, já que ela não gera o produto, apenas serviços. A prestação desses serviços é realizada nas instalações internas de uma planta industrial, apresentando custos para a empresa, que podem aumentar de valor dependendo da complexidade da máquina, sem produzir aquilo que se deseja comercializar. Para as pessoas que estão envolvidas com produção e economia empresarial, a manutenção aparece apenas como uma despesa. Por esse motivo, o custo de manutenção normalmente é contestado, sempre no intuito de reduzi-lo o máximo possível. Esta é uma ação perigosa, já que muitas vezes não são levadas em conta as consequências dessa redução. Em geral, a manutenção é cotada para consertar uma máquina quebrada, as causas da falha são atribuídas a erros do operador ou do material, e o que se visa é reparar o mais rápido possível o equipamento para que se dê seguimento a produção, afinal tempo é dinheiro (NEPOMUCENO, 2014).

No século XVI na Europa se dão os primeiros registros de manutenção em decorrência da criação dos primeiros relógios mecânicos, quando surgiram os primeiros técnicos em montagem e assistência (PEREIRA; NEVES, 2011). Mais tarde, com o advento de cada vez mais máquinas, a manutenção aparece dada a necessidade de preservar a boa performance e operação desses equipamentos, já que era observada a degradação das instalações devido ao processo e ao passar do tempo. A manutenção chega para que sejam garantidas as inspeções, consertos, ajustes e lubrificações para que não ocorram danos nas máquinas ou quebras de produção (COSTA, 2016).

A manutenção está presente nos mais variados setores industriais, ela apresenta um papel crucial para o bom funcionamento do processo. Segundo o autor Nepumuceno (2014) todas as fábricas e instalações industriais necessitam de uma aparelhagem que possibilite a produção, desde os insumos mais básicos, como tesouras e mesas, até os conjuntos mais complexos, como as grandes máquinas – bombas, fornos, reatores, compressores, etc. Entretanto, todo esse arsenal de instrumentos está sujeito a desgastes, falhas, fraturas, entre vários outros incidentes que podem ocorrer durante a produção. Assim como uma tesoura precisa que seu fio seja afiado, já que à medida que vai sendo usada, ela se desgasta e o corte é perdido, equipamentos mais complexos também apresentam desgaste, necessitando de calibrações e reparos de período em período de acordo com a exigência da máquina e do processo. Por esse motivo, em toda produção a manutenção se faz necessária, para que catástrofes e interrupções de produção sejam evitadas (NEPOMUCENO, 2014).

Com a evolução e os diferentes tipos de produção que, assim como as máquinas, se tornaram mais dinâmicos e rápidos, a busca por produtividade e linhas de produção mais efetivas se tornou cada vez maior. A partir do ano de 1930, as manutenções preventiva e corretiva se fizeram cruciais no meio industrial (COSTA, 2013). Atualmente, as técnicas mais importantes de manutenção adotados são: Manutenção Preventiva, Manutenção Corretiva e Manutenção Preditiva (PINTO; XAVIER, 2009).

A manutenção preventiva corresponde ao serviço feito em intervalos de tempo já determinados, ou em conformidade com critérios já estabelecidos, visando diminuir a possibilidade de falha ou degradação da operação do processo. Já a manutenção corretiva é executada depois de um incidente ou evento – programado ou não – durante o funcionamento da máquina, sendo necessária a correção da falha ou a realocação de um

item, que será substituído por um elemento em condições de realizar a função a ele atribuída (EMATNÉ; GUEDES, 2019). A manutenção preditiva é definida, de acordo com a NBR 5462 – ABNT, como:

“Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva (NBR 5462 – ABNT, 1994).”

Baseado no fato de que, financeira e operacionalmente, a manutenção preditiva é a técnica mais vantajosa para o ramo industrial, o presente trabalho irá se concentrar nela.

A manutenção preditiva garante qualidade através de métodos de análises, que a partir de amostras e sensores, buscam diminuir a necessidade de manutenção preventiva e corretiva (OTANI; MACHADO, 2008). A resultante dessa técnica de manutenção leva as empresas a apresentarem melhorias de produtividade, qualidade de produto e receita final (SEVERO; TROJAN; KOVALESKI, 2013). Diferentemente da manutenção preventiva, a manutenção preditiva está relacionada as condições sob às quais a máquina está sendo submetida, podendo se eliminar a generalização na definição de intervalos de consertos e calibrações (KARDEC et al, 2002). Assim, é possível se dizer que a manutenção preditiva é capaz de prevenir falhas, já que essa técnica permite que sejam avaliados uma sequência de critérios e informações das máquinas, relacionados a problemas que ocorreram anteriormente. Todos esses fatores tornam os equipamentos mais confiáveis, por esse motivo várias indústrias aderiram essa técnica (GAMA, 2017).

Existem três formas de monitoramento para avaliar uma sequência de parâmetros e dados dos equipamentos industriais, são eles: acompanhamento subjetivo, acompanhamento objetivo e monitoração contínua. O acompanhamento subjetivo se dá quando é percebido que algum parâmetro está fora do esperado, essa verificação é realizada geralmente pelo próprio operador de máquina e é baseada nos seus sentidos – visão, audição, tato e/ou olfato. Esse comportamento ocorre, muitas vezes, automaticamente, sem a necessidade de uma supervisão, mas deve ser sempre incentivado no meio industrial. Essa avaliação é fundamentada na experiência do operador ou do indivíduo que percebeu a irregularidade, ou seja, seu nível de confiabilidade está atrelado a percepção humana. Por isso, o acompanhamento subjetivo não pode ser a única forma de monitoramento, ele deve ser acompanhado por outros tipos de verificação. O

acompanhamento objetivo é realizado utilizando instrumentos de medição de parâmetros que comparam os dados com valores padronizados e históricos, desse modo independe da percepção do operador. Mas para garantir a integridade dos dados coletados, esses instrumentos devem estar aferidos e calibrados. Por fim, a monitoração contínua é feita através de instrumentos que acompanham os parâmetros da instalação – como vibração, pressão, temperatura, etc. – sendo essas ferramentas avaliadas pelos operadores. Entretanto, devido a automatização de recursos não é necessário de uma assistência constate do operador, pois podem ser aferidos patamares limites que quando atingidos geram uma ação de alerta ou na própria máquina (MORO; AURAS, 2007) (BALDISSARELLI; FABRO, 2019).

A verificação de comportamentos anômalos em equipamentos é a principal função da manutenção preditiva. Ela é capaz de determinar previamente problemas de operação, propiciando o reconhecimento e a tomada de decisão assertiva, para que dessa forma apenas as partes envolvidas na falha sejam reparadas (PERES et al., 2011). O controle preditivo da manutenção significa a definição do momento mais propício para que seja realizada a prevenção da falha de uma máquina, isto é, o momento a partir do qual a chance do equipamento colapsar excede os limites para ele estipulados (TAVARES, 1996).

Entender o motivo por trás da falha é uma das bases da manutenção e o estudo da análise de falha busca solucionar essa demanda. Para isso, em uma empresa é essencial a boa troca de informações e a cumplicidade entre diferentes áreas. Dados operacionais, relatórios de manutenção e relatórios metalúrgicos desenvolvidos em laboratório são trabalhados em conjunto para que sejam realizadas as análises de falha necessárias para compreender problemas já ocorridos e evitar novos contratemplos (XAVIER, 2000).

3.2. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PEBD E EVA

A área 12 está situada na planta PE-6 da Unidade RS07 da Braskem, em Triunfo – RS, ela é responsável pela produção de polietileno de baixa densidade (PEBD) e etileno acetato de vinila (EVA). O PEBD é um material utilizado comumente para confecção de embalagens (BECKER, 2002), enquanto o EVA é explorado pela indústria calçadista (ZATTERA; BIANCHI; ZENI; FERREIRA, 2005). Ambos materiais de baixa densidade,

por isso, para sua confecção, são necessárias operações a altíssimas pressões, de 1000 a 3000 bar. A produção se dá em, basicamente, três etapas: compressão, reação e separação de produto (BARBOSA; DREGER; SCHNEIDER; MORISSO; SANTANA, 2016).

O processo se inicia com a chegada do eteno preto, advindo da planta Q2 da unidade RS04 – Braskem, a 40 bar, ao quarto estágio do compressor primário da área 12, e saindo a 90 bar para o primeiro trocador de calor. Este tem por objetivo a redução de temperatura do gás por meio da troca de calor com tubos de água para resfriamento. Entrando no quinto estágio, a temperatura de sucção é de 32 a 37 °C e de descarga de 90 a 100 °C, a pressão de eteno atinge 300 bar. O produto passa para o segundo trocador de calor e chega ao compressor secundário.

No primeiro estágio do compressor secundário o produto chega 300 bar e sai para o trocador a 880 bar, pressão em que chega no segundo estágio, onde atinge 2500 bar e vai para o próximo trocador de calor. Assim, o produto chega ao reator. Caso esteja sendo produzido EVA, acetato de vinila é adicionado antes de ir para o reator.

O gás a 2500 bar vai para o topo do reator, que é refrigerado a 280 °C, ele vai sendo circulado descendo os 111 andares de tubos circulares. Para que o polímero se forme, a bomba automática deve vencer a pressão no reator e injetar aditivo. Ao final desse processo, 23% do gás que chega ao reator segue as etapas para virar polímero e o restante do gás retorna ao primeiro estágio do compressor primário. Para que isso ocorra, há uma válvula no reator que abre há altíssima velocidade passando todo o gás pressurizado a 2500 bar para uma tubulação lateral chegando ao vaso separador já a 300 bar juntamente com o produto – polímero ainda viscoso. A pressão do gás é reduzida e ele retorna ao primeiro estágio do compressor primário, enquanto o produto é “limpo” e segue para a extrusora.

Esse gás chega com 0,6 bar, uma pressão extremamente baixa, e com um alto volume ao primeiro estágio, responsável por reprocessar o gás que não foi transformado em polímero. O gás passa pelo segundo e terceiro estágio e atinge 40 bar. Chegando ao quarto estágio, se juntando ao eteno vindo da Q2 e assim, o processo segue da mesma forma.

A extrusora tem dois eixos, a resina (polímero ainda viscoso) vai sendo comprimida nesse equipamento. Nessa etapa, existe uma extrusora lateral onde um aditivo extra pode ser agregado já no final do processo. O rotor corta a resina que sai em

tiras, como se fossem tiras de espaguete, e o produto segue para a centrífuga e depois para a peneira. Na peneira são separados os grãos de tamanho bom, dos grãos grossos e finos demais. Os grãos de tamanho adequado vão para balança e são transportados ao topo dos silos.

O produto nos silos recebe ar para que seja feita a desgaseificação, ou seja, os grãos são aerados para que seja removido parte do gás residual oriundo do processo. Assim são obtidos os polímeros, PEBD ou EVA, que vão para os silos de ensaque, finalizando o processo.

3.3. COMPRESSORES INDUSTRIAIS

Os compressores podem ser utilizados em diversos setores da indústria quando é preciso que seja feita a pressurização de um gás, por este motivo são equipamentos comumente aplicados em operação de plantas de processamento de gás, gasodutos, plataformas de petróleo, indústrias químicas e petroquímicas (RASMUSSEN; KURZ, 2009). E ainda, podem ser utilizados, como centrais de ar comprimido, na indústria têxtil, usinas de aço, termelétricas e automobilística (ROLLINS, 2004).

A situação na qual estão inseridos os sistemas de compressão está suscetível a alterações, o que leva a modificações na operação do compressor, principalmente em relação à vazão e razão de pressão do equipamento. A vazão se refere à quantidade de gás sendo comprimida e direcionada pelo compressor até a seção de processo para onde ele fornece gás comprimido um em um dado período. Enquanto a razão de pressão corresponde a associação entre a pressão de saída e a pressão de entrada do compressor, mostrando o quanto o gás está sendo realmente comprimindo (LEISTER, 2014).

Nos sistemas de compressão, independente do princípio de funcionamento ou da maneira como o compressor foi construído, o objetivo é comprimir um tipo de gás para suprir com pressão suficiente outras etapas do processo (LEISTER, 2014). Muitas vezes são usados compressores do tipo axial ou centrífugo (ROLLINS, 2004). O que diferencia nitidamente compressores centrífugos e axiais é a inclinação característica das curvas de velocidade constante. Compressores axiais, que apresentam essa inclinação mais acentuada, geralmente conseguem alterar a pressão de descarga garantindo a vazão aproximadamente constante. Enquanto compressores centrífugos podem apresentar a

vazão substancialmente variada para uma pressão de descarga aproximadamente constante (ROLLINS, 2004). Assim, o tipo de compressor utilizado irá depender das necessidades do processo (LEISTER, 2014).

Além disso, em compressores axiais, o sentido de fluxo é paralelo ao sentido do eixo de rotação, assim o fluido passa por muitas pás rotativas até que ele seja lançado no difusor, que irá transformar a energia cinética em potencial, logo, em pressão. Nos compressores centrífugos, a sucção do fluido é perpendicular ao sentido do eixo de rotação (LEITE, 2013).

Quando se trabalha sob alta pressão, como na PE-6, é necessário um acentuado diferencial entre a pressão de entrada e pressão de saída de um compressor. Dessa maneira, é necessária a associação de várias seções de compressão. Preferivelmente é utilizado um equipamento com múltiplos estágios, no lugar de se utilizar diversos compressores em sequência, que acarretaria na exigência de uma grande área e de um elevado investimento (RODRIGUES, 2013).

O modelo de operação dos compressores na planta, diversas vezes se distancia das condições de projeto, por isso é preciso observar cuidadosamente as curvas de desempenho e as variáveis de processo. Capacidade, razão volumétrica, razão de compressão, head, potência, eficiência e rotação são os parâmetros mais importantes a serem avaliados. Eles podem se relacionar de modo direto ou indireto. Alguns exemplos disso são a rotação diretamente ligada a potência do compressor, a temperatura de sucção sendo inversamente proporcional a variação de vazão mássica, a vazão de compressão diretamente proporcional a temperatura absoluta de carga e a pressão inversamente proporcional a temperatura absoluta de carga (BRASKEM, 2014).

3.3.1. COMPRESSÃO PRIMÁRIA

Na indústria petroquímica, os compressores são um dos mais importantes equipamentos para o funcionamento do processo. Segundo o Manual de Compressão Primária (BRASKEM, 2015), os compressores são máquinas destinadas a utilizar a energia dos fluidos elásticos, pelo aumento de sua pressão. Eles podem ser divididos entre alternativos – de êmbolo, membrana; ou rotativos – de engrenagens, palhetas, centrífugos, conforme sua construção. E entre volumétricos – vazão volumétrica constante, pressão

variável; ou turbo – vazão variável, pressão constante, de acordo com o tipo de ação sobre o fluido.

Na PE-6 são utilizados compressores volumétricos alternativos devido a necessidade da aplicação de altíssimas pressões e médias vazões. Estes apresentam uma construção mais cara e complexa. Entretanto, devido a sua divisão em vários estágios, além de proporcionarem uma altíssima taxa de compressão, ainda possibilitam comprimir o gás a elevadas pressões, evitando a perda de energia e controlando severamente o comportamento desse gás. Isto possibilita um duplo efeito de compressão, tornando sua capacidade horária mais alta, torque e vazão mais regulares e esforços internos dos pistões amenizados.

Um compressor alternativo é uma estrutura mecânica de deslocamento positivo. Isto significa que os volumes sucessivos de gás são confinados no interior de um espaço fechado e elevado a uma pressão mais alta. Ou seja, a pressão estática é dada pela redução do volume de fluido. As válvulas são responsáveis pela sucção de gás para dentro da câmara e pelo seu descarregamento, quando a pressão interna estiver um pouco mais elevada do que a pressão correspondente na tubulação de descarga.

Para que ocorra a compressão, o elemento que se desloca e comprime a massa de gás é um êmbolo, o pistão, que produz um movimento axial no interior de um cilindro, essa compressão pode ser de simples efeito, dada apenas de um lado do pistão ou de duplo efeito, quando ocorre de ambos os lados. De acordo com o diagrama P-V da Figura 1, pode-se entender o princípio de funcionamento ideal de um cilindro do compressor para um estágio. Considerando um processo ideal, não há perdas de energia já que os cilindros não apresentam espaços nocivos e as válvulas, engaxetamentos e pistões não possuem áreas abertas.

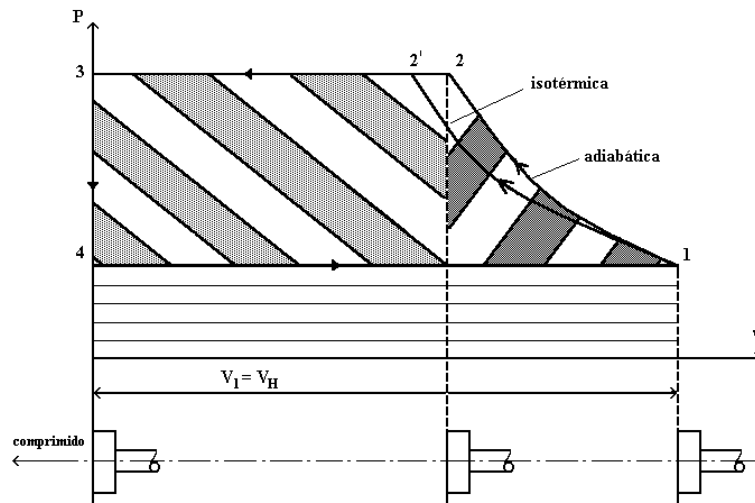


Figura 1 – Diagrama P-V Ideal (Fonte: Braskem, 2015)

Nesse caso, o “caminho” 1-2 corresponde a compressão do gás de cilindro – trabalho fornecido, 2-3 ao deslocamento do gás na tubulação de descarga – trabalho fornecido, 3-4 é a expansão – trabalho é igual a zero e 4-1 é a sucção do gás no cilindro – trabalho retido. A área representada no diagrama é a energia necessária nesse processo, em que não há troca de calor, é um processo adiabático. Além disso, em um mundo ideal o processo seria isotérmico, ou seja, a temperatura do gás deveria ser mantida constante ao longo da compressão, assim menos energia seria necessária, porém no processo real isso não é possível. A distribuição de energia é dada pela variação de volume, pressão e temperatura – variáveis termodinâmicas do processo.

Se aproximando um pouco mais da realidade, pode-se observar a Figura 2.

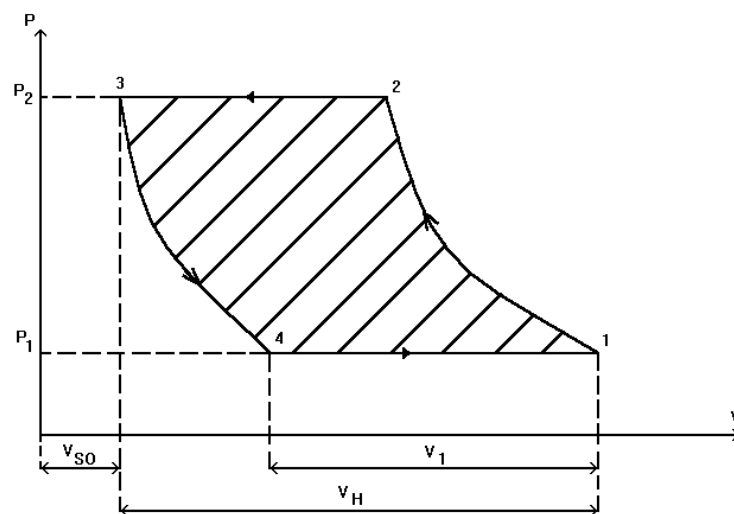


Figura 2 – Diagrama P-V (Fonte: Braskem, 2015)

Verifica-se que entre o volume V_1 (volume real succionado no cilindro) e o volume V_H (volume deslocado pelo pistão) há uma diferença. Esta diferença se dá por causa da expansão do gás alojado no espaço nocivo V_{SO} . O espaço nocivo corresponde a todas as folgas na câmara de compressão originadas por motivos construtivos, como: folga entre pistão e cilindro, montagem das válvulas, engaxetamento.

O compressor primário da área 12 é utilizado para compressão de gás eteno. Este é um gás que precisa ser comprimido em vários estágios. Pois não haveriam condições de construir uma estrutura mecânica que pudesse ser submetida a esforços para garantir uma taxa de compressão fortíssima, nesse caso a temperatura do gás atingiria números extremamente altos. Assim, se faz necessária uma máquina em diversos estágios, em que cada um cumpre uma determinada parcela de compressão e recondiciona a temperatura do gás nos equipamentos interestagiários para o próximo estágio.

3.4. PRATO 3

No ano de 2020, durante a parada de manutenção, foi verificado pela equipe da Braskem que o compressor primário da área 12 da PE-6 não estava funcionando conforme o esperado. Este equipamento tem como função realizar a compressão primária do eteno. Foi visto que o problema estava no prato 3 do quinto estágio de compressão. A falha ocorreu depois de apenas 3 anos de operação do prato 3, considerando que o prato original operou durante 24 anos, essa foi uma falha prematura. Durante a parada, o problema foi percebido a partir do vazamento de gás que estava ocorrendo no engaxetamento, levando a passagem de gás para o sistema de arrefecimento (resfriamento).

O engaxetamento consiste em explicar o modo de funcionamento do compressor, ele é composto por alguns pratos de válvula onde ficam anéis alojados, responsáveis pela vedação. Nos pratos ímpares passa água e nos pares, óleo. O prato 3, em questão, é o último a passar água.

As trincas no geral começam na região do prato próxima ao cilindro. Como as peças mecânicas que compõem o cilindro são torquedas e estão sobre solicitação, devido à pressão do regime ser crítica. Normalmente, a motivação que leva ao trincamento das peças são: final de vida útil, falha na usinagem, falha no retrabalho – que não deixam um

raio de concordância adequado, marca da ferramenta, etc. Com essas trincas a vedação fica prejudicada.

O prato 3 é feito de aço inoxidável AISI 304L, este é um material largamente utilizado em setores industriais (GARDNER, 2005; YE, 2005), já que é extremamente resistente à corrosão, devido a suas excelentes propriedades mecânicas de ductibilidade e soldabilidade. Composto basicamente de Fe, Cr e Ni e apresentando um teor de carbono de apenas 0,03%. Esse baixo teor de carbono previne a precipitação de cromo (que poderia formar carbonetos de cromo na zona da solda), garantindo um teor mínimo de cromo e a possibilidade de formação do filme passivo, assegurando a resistência a corrosão apresentada pelo material. Além das características químicas, esse material apresenta propriedades físicas como uma microdureza média de 190 HV e quando soldado, em torno de 110 HV (SOUZA, 2016).

O aço inoxidável 304L é muito utilizado em múltiplos setores industriais. Ele apresenta múltiplas aplicações em transportes (TAUQIR, 1996), indústria nuclear (HADDAR; FISSOLO, 2005), farmacêuticas, alimentícia, vasos de pressão (CHOPRA; GAVENDA, 1997), etc. Dentre essas várias aplicabilidades, o aço 304L é muito utilizado em sistemas de arrefecimentos de tubulações.

3.5. ANÁLISE DE FALHA

Segundo a NBR 5462 – ABNT a sigla que tem origem na língua inglesa FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) se traduz para Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos. A norma define que a Análise de Falha é uma forma qualitativa de análise de confiabilidade, ela abrange o estudo dos possíveis modos de falha de diversos itens, como componentes, sistemas, projetos e processos. Além disso, indica os efeitos causados por esses tipos de falha tanto nos próprios elementos, quanto na função específica do conjunto. A análise de falha caracteriza o processo e o mecanismo de falha de cada elemento estudado (SAKURADA, 2001).

Para que essa ferramenta seja delimitada, é importante que se tenha conhecimento dos conceitos das palavras: análise e falha. Dessa forma, de acordo com o dicionário elaborado por Michaelis (2000) ANÁLISE pode ser definida como:

“Exame pormenorizado de cada elemento componente de um todo, com o objetivo de investigar sua natureza, suas causas, funções, proporções etc. (MICHAELIS, 2000).”

Enquanto FALHA é estabelecida por Michaelis (2000) como:

“’Defeito’, ‘Desarranjo, enguiço’ ou ‘ato ou efeito de falhar’, sendo FALHAR: ‘Não dar o resultado desejado, não ser como se esperava’ (MICHAELIS, 2000).”

Assim, podemos entender o conceito de análise de falha como o estudo minucioso de cada parte do equipamento em que um defeito foi verificado.

Na engenharia, FMEA é uma técnica frequentemente usada para que seja garantido que os possíveis modos de falha, suas fontes e mecanismos associados sejam levados em conta e localizados. O FMEA é uma síntese de conhecimento da equipe de engenharia que compreende de que maneira o produto ou processo se dá, ela inclui uma análise de elementos que tem possibilidade de falhar fundamentado na experiência e nos seus históricos (FORD MOTOR COMPANY, 1997).

Diversos equipamentos e instrumentos são utilizados pelas indústrias de processo. Esses recursos são fundamentais para que a produção seja efetiva. A falha dessas instalações pode causar múltiplas consequências, desde casos pontuais até eventos catastróficos. Dependendo do caso, o resultado pode ser apenas custos de manutenção e inspeção de máquina ou pode levar a prejuízos financeiros para a empresa, em decorrência de redução de produção, acidentes ou problemas ambientais. A manutenção apenas corretiva não é o bastante para atender ao mercado competitivo atual, uma dedicação constante é necessária para que a confiabilidade das instalações industriais seja aumentada e os custos de manutenção sejam amenizados. Para que o resultado da produção seja otimizado, é preciso um sistema atualizado de organização e gerenciamento dos equipamentos. Assim, processos, recebimentos testados, especificações de compra, armazenamentos padronizados, instalações e procedimentos de operação e manutenção devem estar alinhados com os princípios e metas da empresa. Por isso, a manutenção preditiva se faz necessária, para que todos esses parâmetros sejam levados em conta no plano de manutenção (PASSAMAI, 2007).

O objetivo da análise de falha, realizada pela equipe de manutenção, está em minimizar falhas nas máquinas e quebras de produção na indústria, aumentando a

confiabilidade dos equipamentos. Por meio desse estudo, se busca encontrar a causa raiz da falha, planejar dinâmicas que tendam a reduzir ou eliminar a causa, acompanhar o desempenho da máquina e criar um procedimento operacional que garanta a maior longevidade ao equipamento (PASSAMAI, 2007).

3.5.1. ESTUDOS DE CASO SOBRE MECANISMOS DE TRINCAMENTO

Muito semelhante ao objeto de estudo deste trabalho, Ponte (2011) realizou uma análise de fadiga no último prato de um hiper-compressor de eteno na indústria petroquímica. Entretanto, o material do qual o prato era feito era de aço AISI/SAE 4340 normalizado. O hiper-compressor está sujeito a significativas variações de pressão, o que pode levar a fadiga dos seus componentes. O estudo teve como objetivo explicar as trincas que surgiram no último prato de vedação do cilindro do compressor. A ferramenta utilizada para verificação do efeito da temperatura no componente foi o método de elementos finitos. A resistência a fadiga foi definida através da curva de Wöhler, do critério Goodman modificado (análise de fadiga com tensões multiaxiais) e a reta de Langer (limite de escoamento do material), assim a tensão cíclica de fadiga aplicada ao prato foi dada através da junção dessas informações pela tensão de Von Mises. O resultado obtido neste trabalho mostra que há um concentrador de tensões no componente, o furo passante de geometria elíptica. Este apresenta uma angulação, formando um canal de óleo para lubrificação, se este ângulo fosse mais próximo de zero, a geometria do concentrador seria circular e seria reduzida a tensão no componente, gerando um aumento na segurança e confiabilidade do prato (PONTE, 2011).

Ainda se tratando da indústria petroquímica, referencia-se a análise de fratura em uma válvula de controle de fluxo realizada em Fortaleza, CE. Carvalho (2002) relata o incêndio da unidade petroquímica devido a essa falha. O material em estudo era uma liga SAE 5140. Se tinha por objetivo determinar possíveis causas que levaram a fratura dos parafusos que fechavam a tampa da válvula de controle. Essa falha levou ao vazamento de gases – H_2 e H_2S , que resultou no acidente ocorrido na planta. Para realização deste estudo foram feitas inspeções visuais, microscopia eletrônica de varredura – MEV, microscopia óptica, determinação de propriedades mecânicas, análise de tensões por simulação computacional e espectrometria. O resultado encontrado foi que os fatores cruciais para gerar tensões no componente e levar a falha foram: corrosão sob tensão,

falha de projeto, componentes da válvula fora de especificação e fratura por fadiga (CARVALHO, 2002).

No estudo de caso realizado por Pizzio (2016) se busca entender falhas prematuras por fadiga encontradas em uniões parafusadas – ISO M23x3, de um pré-compressor da indústria petroquímica de Triunfo, RS. Este trabalho teve como objetivo otimizar o desempenho em fadiga do conjunto parafusado. Foram realizados ensaios de fadiga utilizando *strain gauges* para verificar a tensão no material. As curvas de Wöhler também foram utilizadas para que fosse analisado o comportamento em fadiga relacionado ao comprimento do parafuso. Como resultado foi visto que o processo de laminação da rosca e, em seguida, o de tratamento térmico é o mais apropriado para o caso. Conclui-se que a atual configuração de união entre flange e carcaça, resulta em um nível reduzido de aperto. Isso foi verificado por meio das cargas máximas que são transferidas integralmente para o parafuso. Se ele fosse mais comprido, pela inserção de uma bucha extensora por exemplo, a vida em fadiga do material seria mais longa (PIZZIO, 2016).

Em 2006, Lopes realizou um estudo da influência de fatores da usinagem na resistência a fadiga de aços do tipo AISI 4140. No trabalho relacionou-se a profundidade, o avanço e a velocidade de corte com a resistência à fadiga do material. Além disso, também foi levado em conta a tensão residual resultante da usinagem relacionada a resistência à fadiga do aço. As influências da usinagem foram fundamentadas em parâmetros de rugosidade superficial. Por fim, foi constatado uma grande relação entre tensão residual e limite de resistência à fadiga, especialmente para elevados valores de rugosidade superficial (LOPES, 2006).

Os aços inoxidáveis são amplamente utilizados em diferentes setores produtivos, devido a sua excelente resistência a corrosão, oxidação, por apresentar favoráveis propriedades mecânicas em relação a altas temperatura, entre outros fatores. O estudo realizado por Giora (2012) apresenta a caracterização de barras laminadas de aço AISI 304L com e sem tratamento térmico de solubilização, com o intuito de verificar qual a influência desse recurso na resistência à corrosão do material. Utilizando as amostras foram feitos a ensaios de corrosão por exposição a névoa salina segundo a norma NBR 8094 e ASTM B 117, ensaios eletroquímicos de polarização potenciodinâmicos e ensaios eletroquímicos de reativação potenciocinéticos de ciclo duplo pela norma ASTM G 108. E ainda, para avaliação das propriedades mecânicas do material, também foram

realizados ensaios de tração, dureza Brinell e análise de microestruturas a partir da microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura. Foi verificado que as amostras não tratadas termicamente mostram maiores níveis de corrosão por pite. Dessa maneira, obteve-se como resultado que o tratamento térmico de solubilização garante uma resistência à corrosão maior (GIORA, 2012).

Dando seguimento a avaliações sobre o aço inoxidável austenítico 304L, Vatavuk (2010) realizou o estudo de uma análise topográfica de trinca de corrosão sob tensão nesse material. Foi realizada a microscopia de varredura eletrônica, visando entender a verdadeira topografia da trinca e visando imagens bastante similares as produzidas por fratura induzida de maneira proposital devido a separação das faces de fratura. Foi realizada uma comparação entre a superfície de fratura dada por corrosão sob tensão na liga em análise com uma fratura por clivagem em aço inoxidável ferrítico, também através da microscopia eletrônica de varredura. Como resultado se obteve que com a separação das faces de fratura, foram observadas duas regiões diferentes, uma com fratura plástica, indicando alvéolos ou *dimples*, e uma zona menos rugosa com ataque superficial pelos agentes corrosivos do meio (VATAVUK, 2010).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para concretização dos experimentos e análises realizados na sede do Grupo de Análise de Falha do LAMEF/UFRGS para obtenção de informações sobre o prato 3 do quinto estágio de compressão primária da planta de PEBD e EVA da Braskem, Triunfo – RS.

Inicialmente, é feita a caracterização da peça. Esse processo consiste na identificação e análise da estrutura e microestrutura do componente. Tendo por objetivo definir as propriedades físicas e químicas do material. As técnicas empregadas para a caracterização dependem do que está sendo avaliado, como a montagem da peça, microestrutura do material e o surgimento de defeitos e trincas.

Os ensaios mecânicos são muito utilizados para esse tipo de análise. Para análises de defeitos e falhas o microscópio eletrônico de varredura (MEV) é utilizado. Avaliações microestruturais são realizadas através da microscopia óptica e da lupa. E ainda, são feitos ensaios de dureza, baseados na resistência à deformação do material.

Neste trabalho, a metodologia foi dividida nas etapas apresentadas no fluxograma da Figura 3. O material como recebido, prato 3, foi seccionado em cinco partes, sendo levadas para avaliação apenas quatro seções: C, D, E e A. As três primeiras seções foram analisadas a fim de entender o processo de fabricação da peça, enquanto a última, onde se encontra a falha, foi avaliada buscando entender a superfície de fratura.

O entendimento da seção C teve por objetivo avaliar a microestrutura e a microdureza da peça base para a confecção do prato 3 e verificar o inserto horizontal utilizado para criação de um canal para refrigeração do componente. Para isso, foi realizada sua visualização na lupa, análise no ImageJ, feito um ensaio não-destrutivo de líquido penetrante, preparação metalográfica e, por fim, a macrografia da seção completa e a microestrutura e microdureza de determinados pontos.

A seção D foi avaliada no intuito de verificar o inserto vertical (feito para o canal de engaxetamento dos pratos no cilindro do compressor), entender como ambos os insertos estavam posicionados e avaliar a microestrutura e a microdureza das regiões soldadas. Dessa forma, a seção D foi cortada ao meio paralelamente ao canal vertical e dividida nas subseções D1 e D2. Foi feito o embutimento à frio de D1, posteriormente, a

preparação metalográfica e finalmente, a macrografia de toda a subseção e a microestrutura e microdureza de pontos nas regiões das soldas.

Para concluir o entendimento do processo de fabricação do prato 3, a seção E foi avaliada com o objetivo de verificar os canais de entrada e saída de água para refrigeração, então essa seção foi cortada ao meio dos dois canais e, assim, dividida em E1 e E2, que foram fotografadas e avaliadas.

Na seção A foi onde ocorreu a trinca, por isso a sua análise teve como objetivo entender a causa da fratura e encontrar seu(s) possível(eis) ponto(s) de início. Para isso, a fratura foi aberta utilizando nitrogênio líquido, se dividindo nas subseções A1 e A2, ambas foram fotografadas. Depois, A2 foi levada para visualização dos possíveis pontos de início na lupa e no MEV.

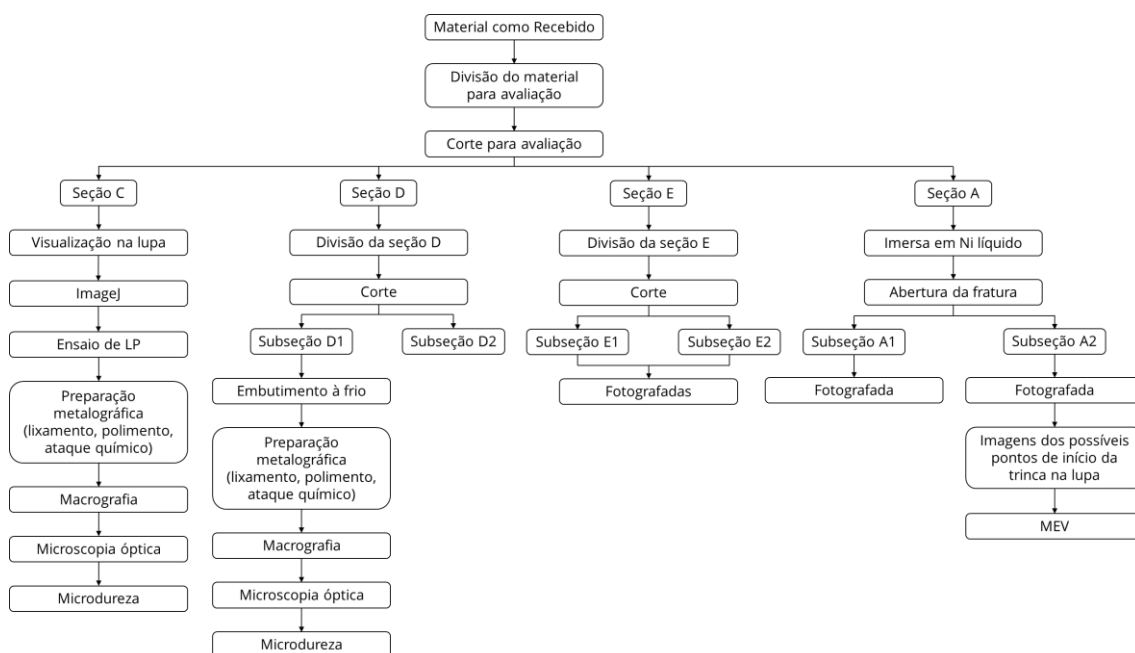


Figura 3 – Fluxograma das etapas realizadas neste trabalho (Fonte: a Autora, 2023)

4.1. ESTUDO DO MATERIAL COMO RECEBIDO

Antes da preparação da peça, foi feita a fotografia do material como recebido, Figura 4. Nela pode-se observar, indicada pela seta vermelha, a trinca que causou a falha do componente.



Figura 4 – Prato 3 como recebido, seta em vermelho indicando a trinca no componente (Fonte: a Autora, 2023)

Para que sejam realizadas as análises, primeiro foi preciso preparar as amostras. A peça em estudo foi marcada nas regiões onde se deseja retirar as seções para avaliação, as regiões mais críticas. A peça então foi seccionada conforme as marcações descritas na Figura 5.

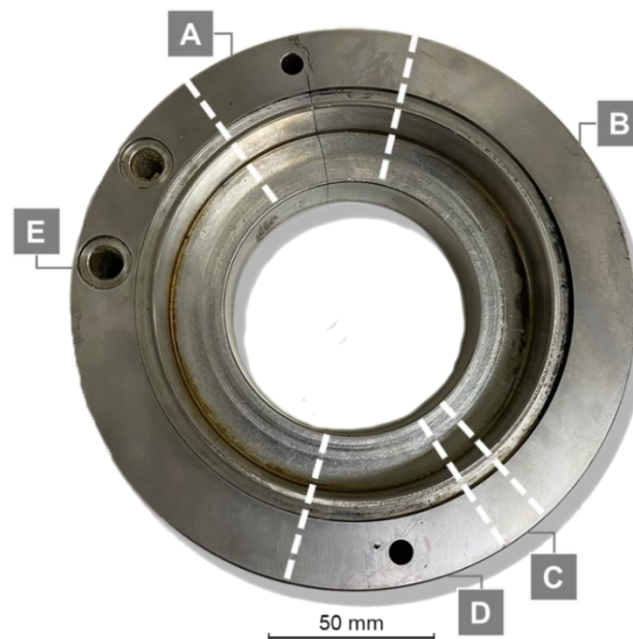


Figura 5 – Prato 3 marcado nas seções A, B, C, D e E; as linhas brancas tracejadas representam onde o corte foi realizado (Fonte: a Autora, 2023)

Posteriormente, a peça foi cortada de acordo com essas marcações na máquina de corte Struers. Essa etapa teve como objetivo separar as seções principais que foram analisadas com mais cuidado. A seção A apresenta a trinca que levou a falha da peça. As seções C e D foram usadas para avaliação microestrutural e de microdureza do material e para o entendimento do processo de fabricação da peça. Por fim, a seção E foi trabalhada, também, para entender a rota de processamento da peça.

4.2. ESTUDO DA SEÇÃO C: PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA PEÇA

A seção C, Figura 6, foi analisada para o entendimento do canal da passagem de água para refrigeração do prato 3 e para avaliar a microestrutura e microdureza do material base da peça.



Figura 6 – Seção transversal C (Fonte: a Autora, 2023)

Para isso, primeiro foram feitas imagens da seção transversal C da peça na lupa Olympus Japan utilizando a lente SZ40 e o *software* Zen.

Em seguida, buscando avaliar quanto o canal estava obstruído por incrustações, se utilizou o programa ImageJ para calcular a porcentagem livre para passagem da água.

Visando entender como esse canal para refrigeração foi montado, realizou-se um ensaio não destrutivo (END) utilizando líquido penetrante (LP) nesta seção. Esse ensaio consiste em 3 etapas: primeiro foi utilizado o spray E-59 Removedor, para que a superfície seja limpa, em seguida, foi usado o spray VP-30 Penetrante Visível Lavável à

Água, que é o líquido que penetra nas interseções e imperfeições da peça. Após 20 minutos, o spray D-70 Revelador Não Aquoso foi utilizado, ele serve para que seja revelado onde o Penetrante se alojou. Todos os sprays usados nesse processo são da marca Metal-Chek Materiais para END. Terminado o ensaio, a seção foi fotografada na câmera e na lupa.

A seção C foi lixada em água corrente, utilizando as lixas d'água Norton de granulometria 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 μm para uniformizar a superfície. Depois foi realizado o polimento, na politriz Panambra P-10 usando os panos para polimento, com as pastas de diamante de 4 μm e 1 μm , tornando a superfície especular e pronta para ser atacada. Foi feito o ataque eletrolítico com ácido oxálico (solução contendo a proporção de 10g de ácido oxálico para 100ml de água), utilizando 0,8 V e 1,2 A. E então, foi feita a macrografia da seção no escaner e imagens na lupa para que o inserto soldado utilizado para montar o canal de refrigeração da peça fosse visualizado.

Na seção C, também foi realizada a caracterização da microestrutura e microdureza do material. Foi feita a microscopia em 100x e 500x no Microscópio Óptico Leica DM2700 M através do *software* Las Core. Enquanto a microdureza foi feita no durômetro Instron Tukon 2100B, utilizando uma carga de 300g e o *software* Minuteman ELT.

4.3. ESTUDO DA SEÇÃO D: PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA PEÇA

A seção D foi utilizada para estudar a rota de confecção do canal vertical, usado para o engaxetamento dos pratos do cilindro do compressor. Para isso, ela foi seccionada nas subseções D1 e D2, conforme a Figura 7.

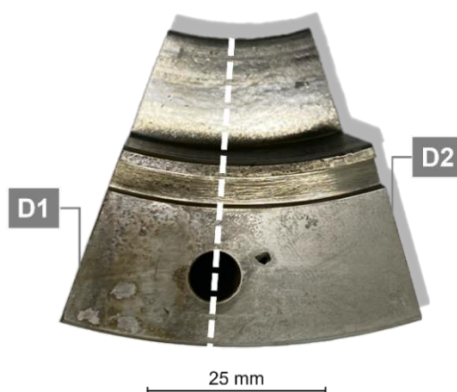


Figura 7 – Seção D marcada nas subseções D1 e D2, linha tracejada branca representa onde o corte foi realizado (Fonte: a Autora, 2023)

Então é realizado o corte na seção transversal de D como mostrado na Figura 7, centralizando o canal. D1 foi embutida à frio utilizando uma mistura de resina de poliéster (Acrílico Auto Polimerizante JET – pó incolor) e um agente catalizador (Acrílico Auto Polimerizante JET – líquido). Posteriormente, ela é lixada nas granulometrias de 80 μm até 1200 μm , em seguida, polida utilizando as pastas de polimento de 4 μm e 1 μm e, por fim, atacada utilizando água régia, uma solução contendo ácido clorídrico e ácido nítrico na proporção de 3:1. A subseção foi levada para o escaner e foi feita a sua macrografia.

D1 foi visualizada no microscópio óptico Leica e foram feitas imagens em 100 e 500x das regiões soldadas do inserto vertical – duas regiões, e do inserto horizontal – uma região. Além disso, nessas três soldas da subseção D1 foram traçados perfis de microdureza no durômetro Instron, utilizando uma carga de 300 g.

4.4. ESTUDO DA SEÇÃO E: PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA PEÇA

A seção E foi dividida nas subseções E1 e E2, marcada conforme a Figura 8, no intuito de estudar a região onde ocorre a ligação do canal de refrigeração com os canais de entrada e saída de água.



Figura 8 – Seção E marcada nas subseções E1 e E2, linhas tracejadas brancas indicam onde os cortes foram realizados (Fonte: a Autora, 2023)

Em seguida, foram fotografadas as seções transversais de E1 e E2 para visualização dos canais de entrada e saída de água para refrigeração.

4.5. ESTUDO DA SEÇÃO A: FALHA

A trinca da seção A – vista de topo na Figura 9 – foi aberta a partir da sua imersão em nitrogênio líquido durante um período de 6 minutos. Em seguida, a seção foi presa na morsa e foi realizada a abertura da fratura através de um impacto contundente dividindo A nas subseções A1 e A2 e possibilitando a avaliação da trinca.

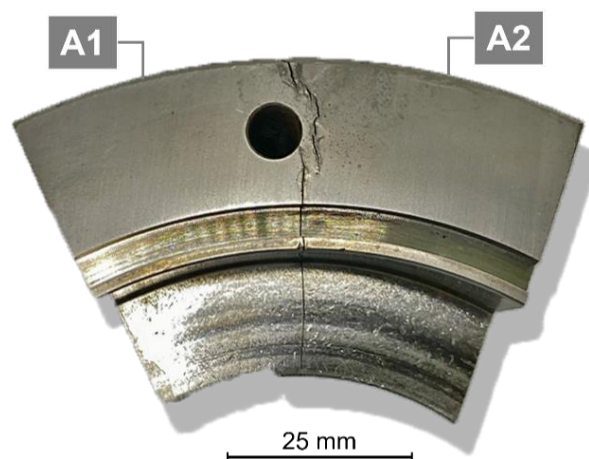


Figura 9 – Seção A, subseções A1 e A2 indicadas (Fonte: a Autora, 2023)

Na sequência, foram feitas fotos, em uma câmera, das superfícies de fratura e imagens na lupa dos 3 possíveis pontos de início da trinca.

Buscando entender com mais clareza os pontos de início da trinca, a subseção A2, apresentada na Figura 9, foi analisada no microscópio eletrônico de varredura (MEV) Superscan do modelo Shimadzu SSX-550. Porém, antes de levar A2 para o MEV, a fratura foi limpa utilizando detergente neutro, solução removedora de ferrugem e 2 ciclos de 6 minutos no ultrassom Ultrasonic Cleaner.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das análises realizadas sobre o processo de fabricação e a falha que ocorreu no prato 3, como consta no capítulo anterior. Iniciando pelo entendimento do processo de fabricação da peça e seguindo para a motivação para o início da trinca no material.

5.1. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA PEÇA

A partir da visualização na lupa da seção transversal C realizada em laboratório, foi observado que o canal de refrigeração do prato 3 estava severamente obstruído, Figura 10.

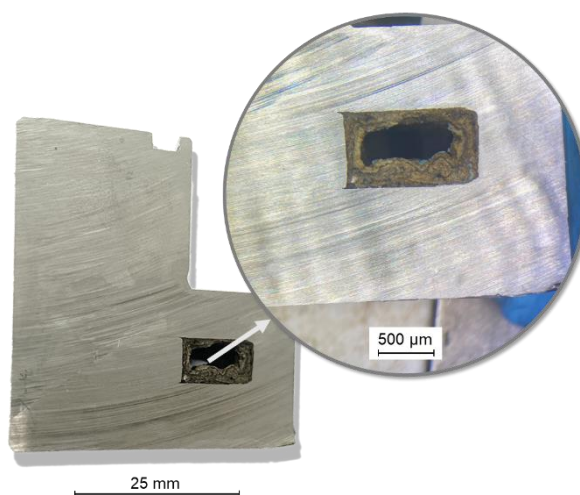


Figura 10 – Seção C, canal de refrigeração obstruído (Fonte: a Autora, 2023)

A partir da avaliação feita no ImageJ foi possível identificar que o canal está 74,59% obstruído pelas incrustações, ou seja, a passagem de água se dá apenas por 25,41% dele, representada pela parcela em vermelho na Figura 11. A formação de incrustações se deve à falta de tratamento na água utilizada para refrigeração. Tal obstrução pode gerar perda de eficiência de refrigeração, causando uma elevação da temperatura de trabalho do componente. Tal alteração pode ter sido um fator que contribuiu para a falha prematura do componente.

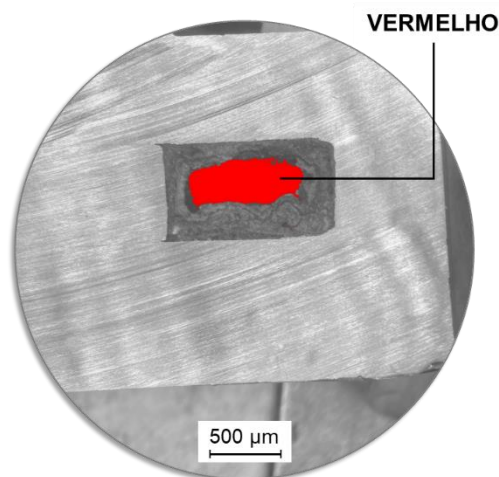


Figura 11 – Seção C, imagem feita no programa ImageJ, parcela em vermelho corresponde ao espaço livre no canal de refrigeração que permite a passagem de água (Fonte: a Autora, 2023)

O ensaio de LP revelou que possivelmente o canal de refrigeração foi montado através de um inserto a peça, Figura 12. Já que se pode notar que o líquido entrou por capilaridade em duas linhas paralelas delimitadas. Esta geometria, devido ao alinhamento e paralelismo, parece ter sido gerada propositalmente durante o processo de fabricação, descartando a possibilidade de ser um defeito de operação do componente.

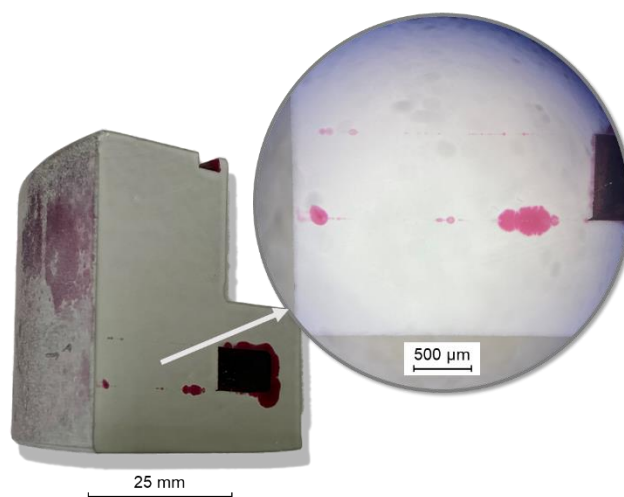


Figura 12 – Seção C, ensaio de LP para revelar o inserto do canal de refrigeração (Fonte: a Autora, 2023)

Posteriormente, a fim de analisar melhor o que foi visto no ensaio de LP, foi feita a preparação metalográfica e uma macrografia da seção C em lupa, a qual revelou a existência de um inserto soldado a peça base, como indicado na Figura 13. Este inserto provavelmente existe visando a construção do canal de refrigeração de forma mais

econômica e a utilização do processo de soldagem busca garantir a estanqueidade do referido canal. Ainda na Figura 13, é possível observar as linhas de interseção entre a peça base e o inserto e a microestrutura diferenciada na região da solda.

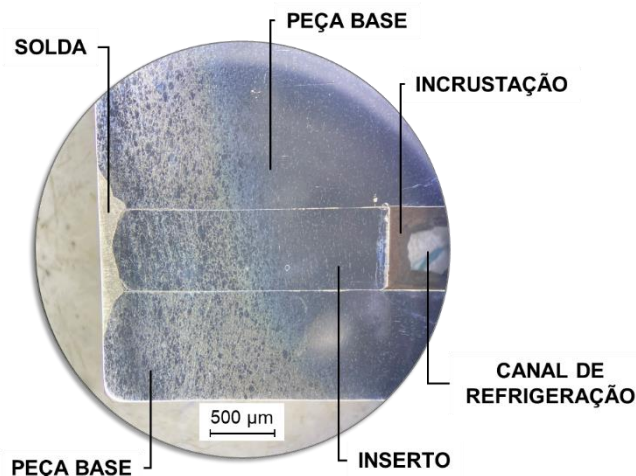


Figura 13 – Macrografia da seção C, inserto soldado visualizado na lupa, utilizando um aumento de 0,67x (Fonte: a Autora, 2023)

A avaliação da subseção transversal D1 também possibilitou o entendimento do processo de fabricação do prato 3. A macrografia de D1, Figura 14, apresenta como o componente é dividido, a região em verde representa a peça base, a amarela o inserto vertical – que corresponde ao inserto necessário para criar o canal onde os pratos são acoplados um no outro (engaxetamento) – e a região vermelha corresponde ao inserto horizontal – para o canal de água para refrigeração.

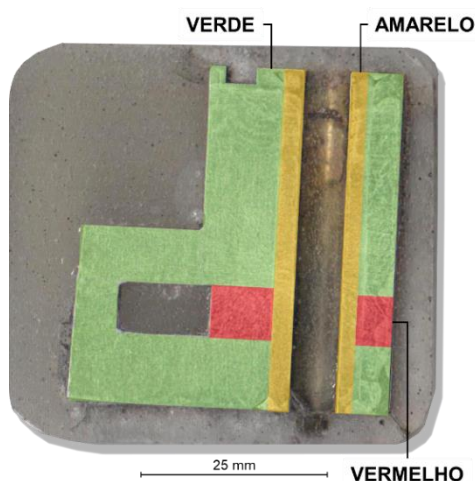


Figura 14 – Macrografia da subseção D1, superfície escaneada, indicadas as regiões que compõem a peça: em verde corresponde a peça base, amarelo ao inserto vertical e vermelho ao inserto horizontal (Fonte: a Autora, 2023)

A macrografia revelou que o inserto vertical, assim como o inserto horizontal, é soldado a peça base, como identificado na Figura 15 – soldas I e III. Foram identificadas duas motivações para a necessidade de um inserto vertical, são elas: para corrigir um erro de projeto ou para evitar a sobrecarga da solda II do inserto horizontal.

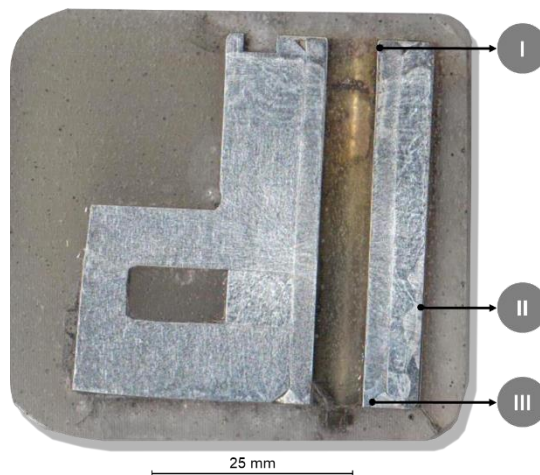


Figura 15 – Macrografia da subseção D1, superfície escaneada, indicadas as três soldas realizadas para compor a peça: I e III correspondem às soldas do inserto vertical, II à solda do inserto horizontal (Fonte: a Autora, 2023)

Se tratando de um descuido na fabricação do componente, o que teria acontecido seria que a peça base foi anteriormente perfurada com uma dimensão superior a estipulada no projeto e, por isso, foi necessário reduzir o diâmetro do canal a partir de um inserto.

No caso de evitar um sobrecarregamento na solda II, o que ocorreria seria que durante a operação, o prato 3 estava submetido a solicitações mecânicas, ou seja, esforços vindos nas direções indicadas pelas setas vermelhas no desenho esquemático da Figura 16. Essas solicitações em direções iguais, mas sentidos opostos – ambas comprimindo o inserto horizontal – iriam sobrecarregar a solda II, tornando a região extremamente sobrecarregada e mais suscetível a falhas. Conjuntamente a essa motivação, o inserto vertical também serviria como vedação, evitando que a água (em amarelo) que passa no canal de refrigeração atinja o canal vertical através da interseção entre peça base e inserto horizontal, assim garantindo a estanqueidade do componente, Figura 16.

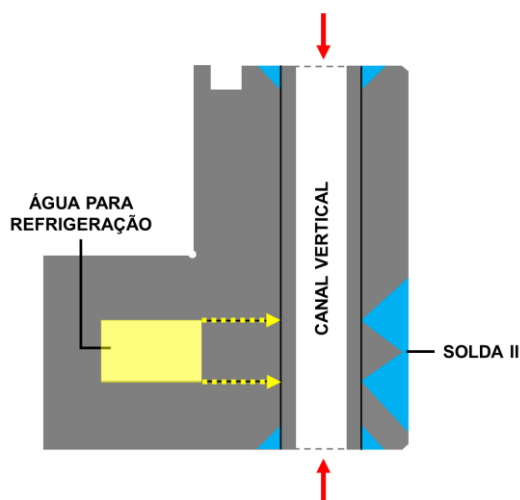


Figura 16 – Desenho esquemático da subseção D1, indicadas nas setas vermelhas as solicitações mecânicas, em amarelo o canal de refrigeração e em azul as soldas (Fonte: a Autora, 2023)

Assim, foi observado que a montagem do prato 3 se dá em três partes: dois insertos – com suas respectivas soldas – e a peça base, apresentadas no desenho esquemático da Figura 17. O desenho apresenta a peça base em verde, o inserto vertical em amarelo, o inserto horizontal em vermelho e todas as partes soldadas em azul.

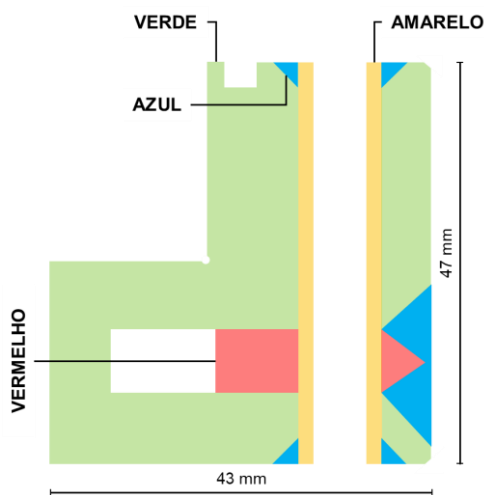
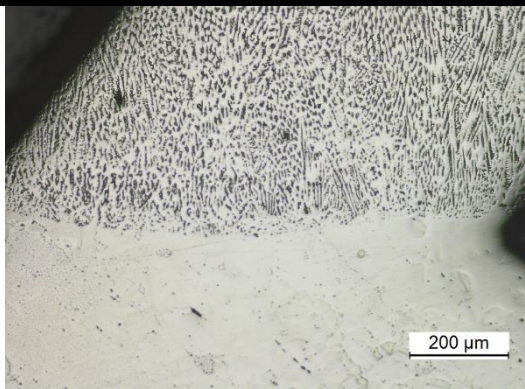
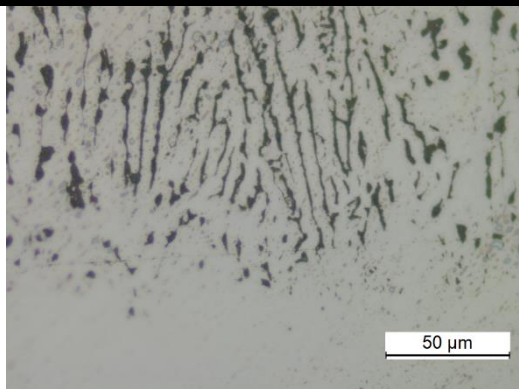
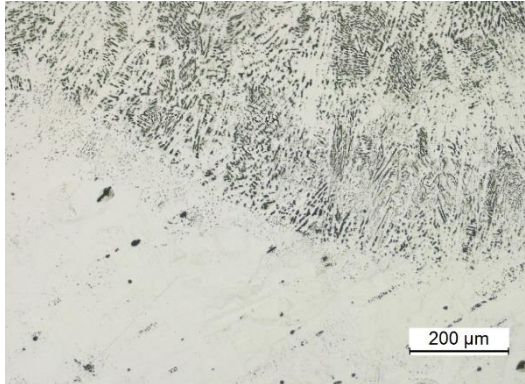
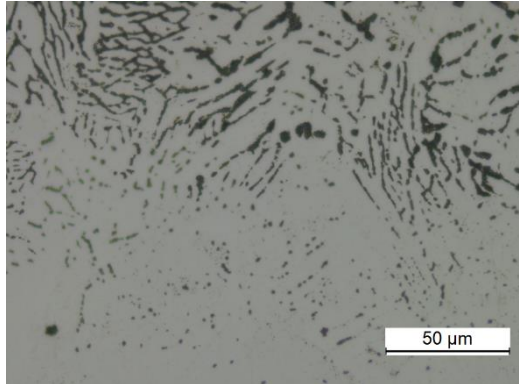
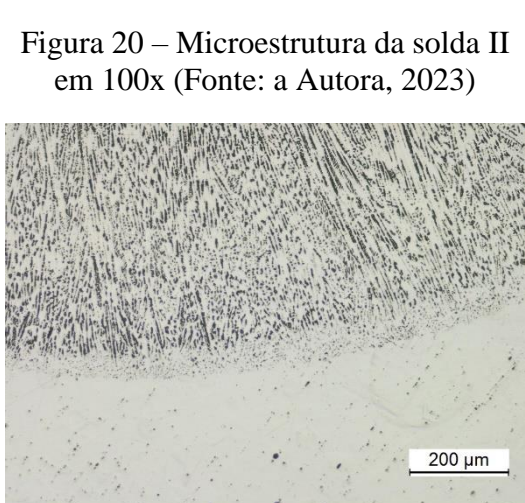
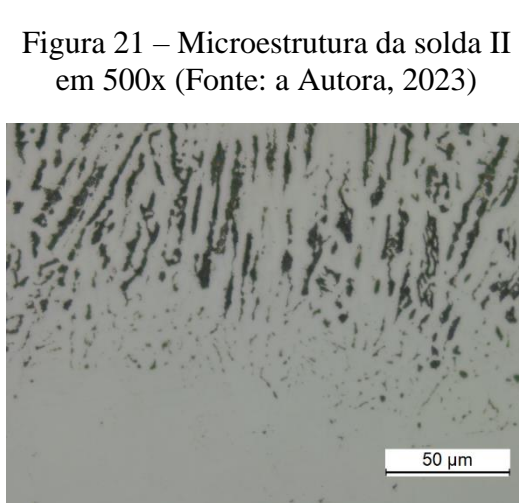
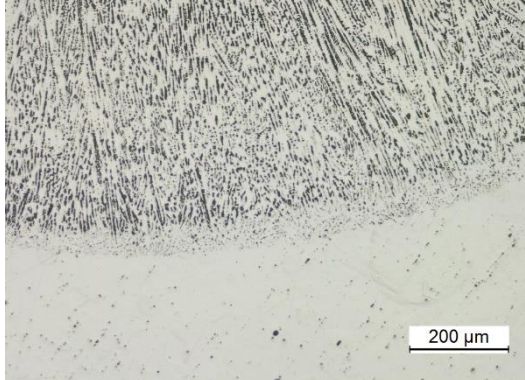
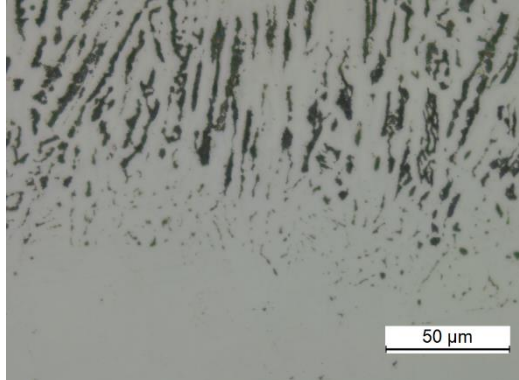
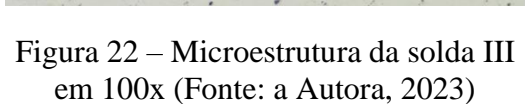
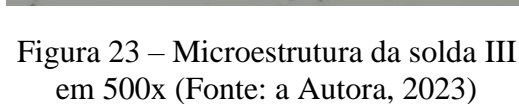


Figura 17 – Desenho esquemático da subseção D1, separadas por cores as divisões da peça: em verde a peça base, amarelo o inserto vertical, vermelho o inserto horizontal e em azul as soldas (Fonte: a Autora, 2023)

As microestruturas das três soldas, identificadas na Figura 15 como I, II e III, estão descritas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 Microestruturas das três soldas realizadas para a confecção do Prato 3, em aço AISI 304L. Subseção D1. Regiões ordenadas na Figura 15. Imagens feitas no microscópio óptico Leica, em 100 e 500x.

AISI 304L	100x	500x
I		
	<p data-bbox="373 824 863 891">Figura 18 – Microestrutura da solda I em 100x (Fonte: a Autora, 2023)</p> 	<p data-bbox="904 824 1394 891">Figura 19 – Microestrutura da solda I em 500x (Fonte: a Autora, 2023)</p> 
II		
	<p data-bbox="373 1335 863 1402">Figura 20 – Microestrutura da solda II em 100x (Fonte: a Autora, 2023)</p> 	<p data-bbox="904 1335 1394 1402">Figura 21 – Microestrutura da solda II em 500x (Fonte: a Autora, 2023)</p> 
III		
	<p data-bbox="373 1843 863 1910">Figura 22 – Microestrutura da solda III em 100x (Fonte: a Autora, 2023)</p>	<p data-bbox="904 1843 1394 1910">Figura 23 – Microestrutura da solda III em 500x (Fonte: a Autora, 2023)</p>

Fonte: a Autora, 2023.

As soldas I e III, indicadas na tabela 5.1, correspondem, respectivamente, ao topo e a base do inserto vertical. Enquanto a solda II foi feita para fixar o inserto horizontal. As soldagens foram feitas com maus cuidados já que elas apresentam várias cavidades entre solda e peça soldada.

Para traçar o perfil de microdureza de cada solda, foram feitas 6 medições, a tabela 5.2 apresenta os valores encontrados, incluindo a média da microdureza e o desvio padrão dos pontos.

Tabela 5.2 Microdurezas das três soldas realizadas para a confecção do Prato 3, em aço AISI 304L. Subseção D1. Pontos I, II e III ordenados na Figura 15. Imagens feitas no durômetro Instron, em Vickers, carga 300g (HV 0.3).

AISI 304L	1°	2°	3°	4°	5°	6°	Média	Desvio Padrão
I	199	209	167	206	186	172	189,83	16,16%
II	233	188	162	147	158	180	178,00	28,12%
III	199	214	216	206	180	206	203,50	11,91%

Fonte: a Autora, 2023.

Os desvios padrão e os valores médios de microdureza encontrados no material em avaliação são divergentes aos resultados encontrados no estudo realizado por Souza (2016). Em seu trabalho, a média de microdureza no metal de solda do aço austenítico AISI 304L foi de 110 HV. Enquanto no presente trabalho as três regiões soldadas apresentaram uma microdureza média de 190,44 HV, ou seja, o material apresenta uma dureza 42,24% superior aos dados referenciados. Tal dureza, superior ao indicado na literatura, implica em um material mais frágil, levando ao trincamento. O controle dos parâmetros de soldagem poderia contribuir para prolongar a vida do componente, já que uma dureza muito elevada torna o material mais suscetível a propagação de trincas em defeitos.

Para finalizar a avaliação do processo de fabricação do prato 3, buscou-se entender o funcionamento do canal de refrigeração da peça. A seção E foi utilizada para isso. Ela foi dividida em duas subseções, E1 e E2, conforme apresentado na Figura 24.

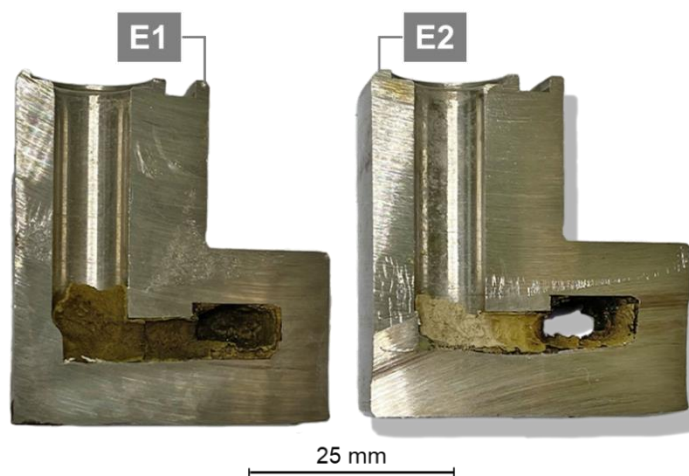


Figura 24 – Subseções E1 e E2 (Fonte: a Autora, 2023)

Na Figura 24, é possível observar que os canais de entrada (em E1) e saída (em E2) estão severamente obstruídos, assim como o próprio canal de refrigeração que circunda a peça. Dessa forma, além da passagem de água dentro do componente estar debilitada, a entrada e saída também estão, tornando a peça ainda mais suscetível a perda de eficiência, fazendo com que o componente trabalhe sobre altas temperaturas, incompatíveis com seu projeto. Esta sendo mais uma motivação para a falha no prato 3.

5.2. MICROESTRUTURA DO MATERIAL

A caracterização microestrutural da peça base foi feita na seção C. As regiões avaliadas são: região superior (I), região central A (II), região central B (III), inserto horizontal (IV) e região inferior (V) – Figura 25.

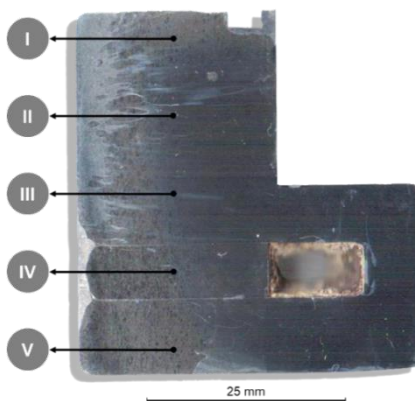


Figura 25 – Macrografia da seção C, identificação das regiões analisadas no microscópio óptico: I é a região superior, II região central A, III região central B, IV região do inserto horizontal e V região inferior (Fonte: a Autora, 2023)

As microestruturas mostradas na tabela 5.3 abaixo correspondem a cada ponto informado na Figura 25.

Tabela 5.3 Microestruturas do aço AISI 304L. Seção C. Regiões ordenadas na Figura 25. Imagens feitas no microscópio óptico Leica em 100 e 500x de aumento.

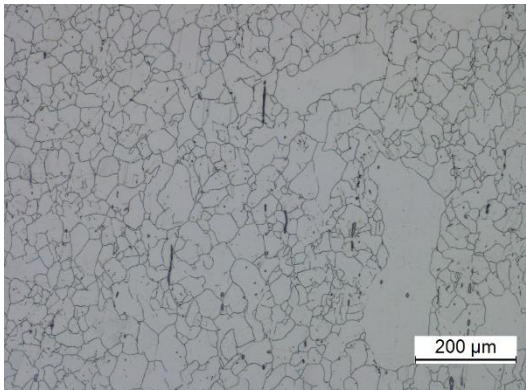
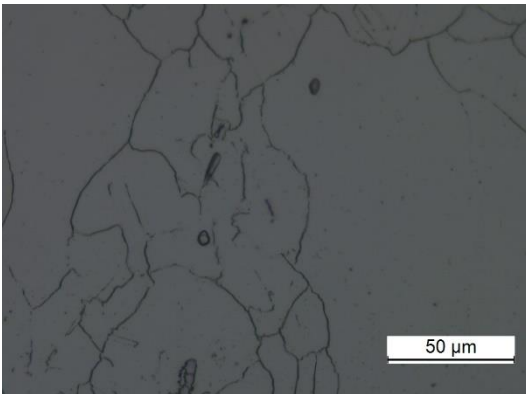
AISI 304L	100x	500x
I		

Figura 26 – Microestrutura do ponto I em 100x (Fonte: a Autora, 2023)

Figura 27 – Microestrutura do ponto I em 500x (Fonte: a Autora, 2023)

II

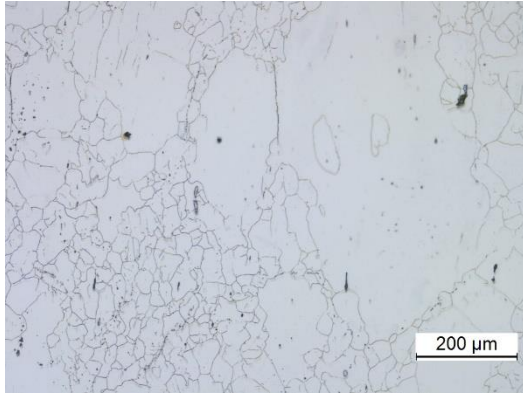


Figura 28 – Microestrutura do ponto II em 100x (Fonte: a Autora, 2023)

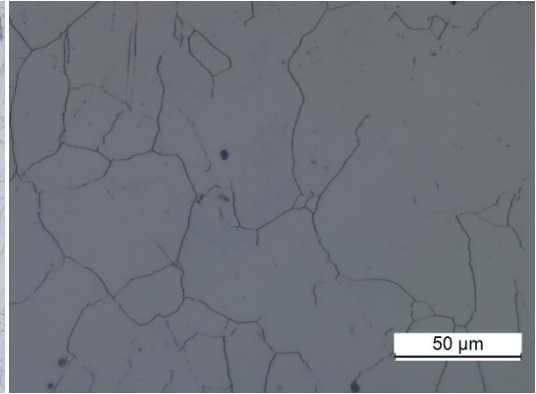


Figura 29 – Microestrutura do ponto II em 500x (Fonte: a Autora)

III

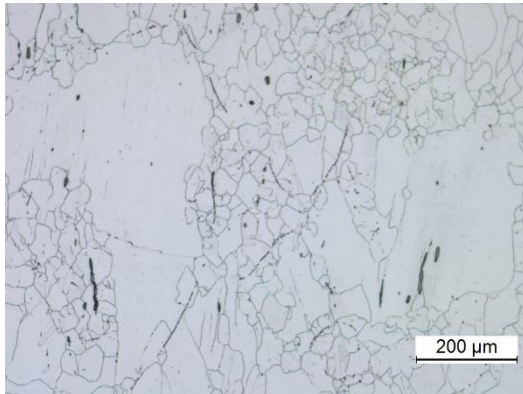


Figura 30 – Microestrutura do ponto III em 100x (Fonte: a Autora, 2023)

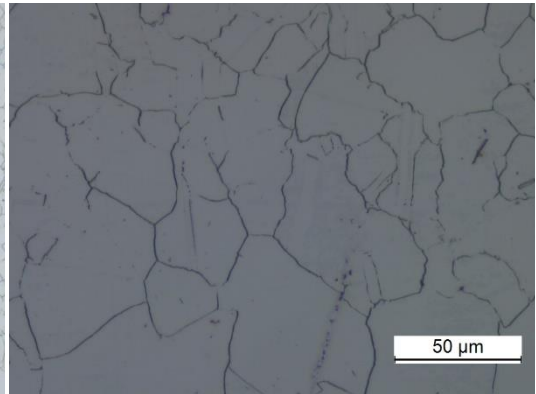


Figura 31 – Microestrutura do ponto III em 500x (Fonte: a Autora, 2023)

IV

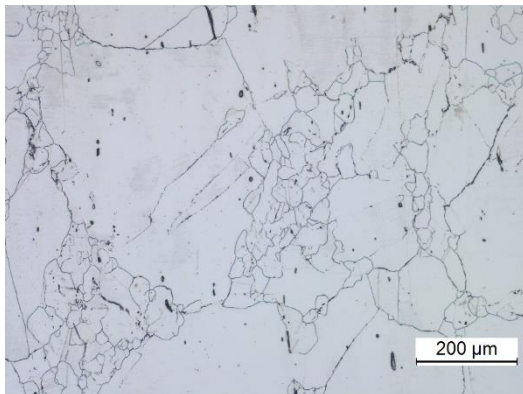


Figura 32 – Microestrutura do ponto IV em 100x (Fonte: a Autora, 2023)

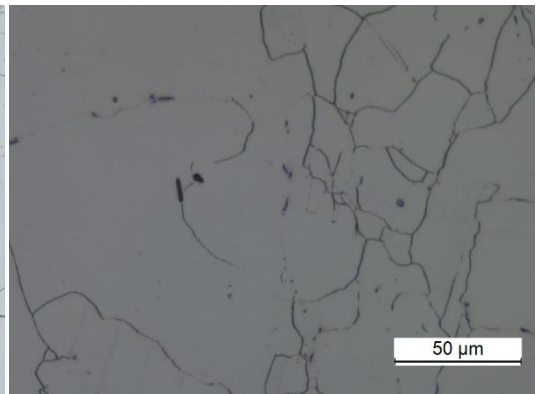


Figura 33 – Microestrutura do ponto IV em 500x (Fonte: a Autora, 2023)

V

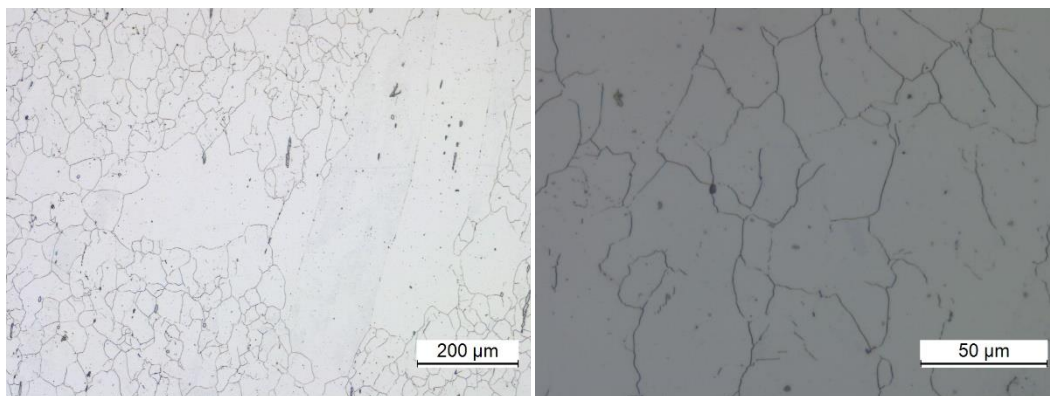


Figura 34 – Microestrutura do ponto V em 100x (Fonte: a Autora, 2023)

Figura 35 – Microestrutura do ponto V em 500x (Fonte: a Autora, 2023)

Fonte: a Autora, 2023.

Nas microestruturas do material da tabela 5.3 é possível observar grãos de tamanho maior, o que leva a redução da tenacidade do material. Nestas mesmas regiões identificadas na Figura 25, foram analisadas as microdurezas do material, conforme apresentado na tabela 5.4.

Tabela 5.4 Microdurezas do aço AISI 304L. Pontos ordenados na Figura 25. Medições feitas no durômetro Instron – em Vickers, carga 300g.

AISI 304L	I	II	III	IV	V	Média	Desvio Padrão
HV 0.3	178	169	175	165	182	173,80	6,11%

Fonte: a Autora, 2023.

Os resultados de microdureza apresentados pelo material estão próximos aos valores da literatura, onde são encontrados números em média de 190 HV para a microdureza de aços austeníticos AISI 304L. No presente trabalho, a média foi de 173,80 HV com desvio padrão de 6,11%, ou seja, sem diferença estatística significativa.

5.3. FALHA

A seção A, onde estava localizada a trinca no material, foi aberta nas subdivisões A1 e A2. As fotografias feitas na câmera apresentam a fratura depois de limpa, Figura 36. Em A1 o inserto vertical se manteve acoplado a peça base, enquanto em A2 observa-se a

sua cavidade. Em ambas as subseções pode-se verificar as marcas de praia, apontadas pelas setas vermelhas, indicando trinca por fadiga. Além disso, também é possível notar as regiões mais escuras, mostradas pelas setas amarelas, identificando as regiões soldadas.

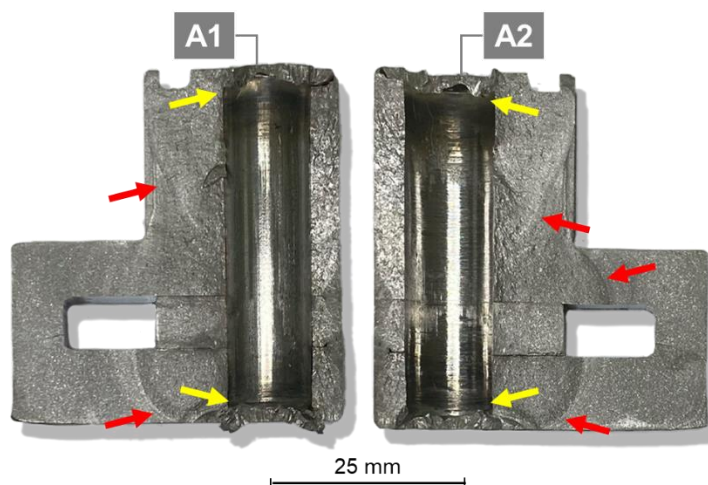


Figura 36 – Fratura da seção A, subseções A1 e A2, setas vermelhas indicando as marcas de praia e setas amarelas indicando as soldas (Fonte: a Autora, 2023)

A subseção A2 foi escolhida para avaliação em decorrência da cavidade formada pelo inserto vertical, que tornou melhor a visualização na lupa. Ela foi marcada em três regiões de maior interesse para analisar o início da trinca, Figura 37.

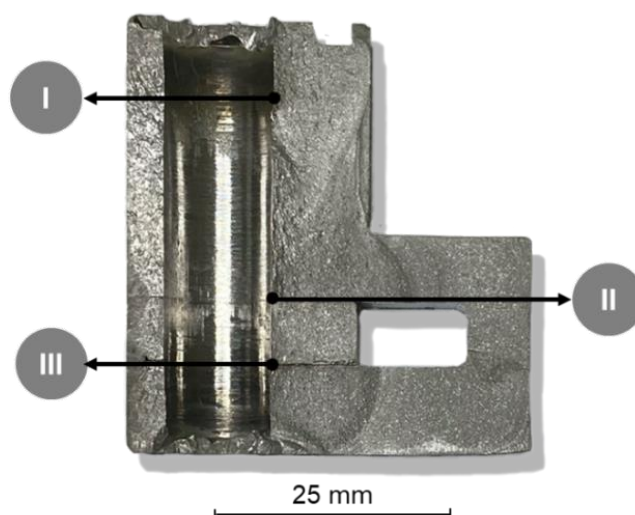
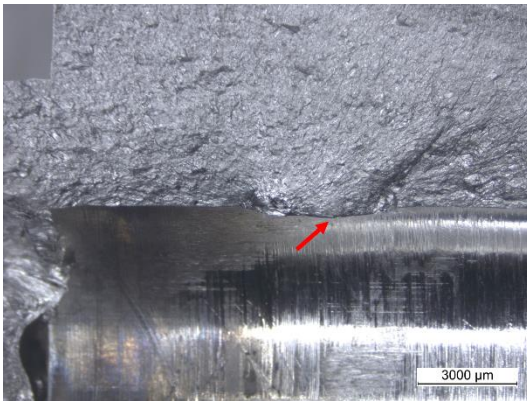
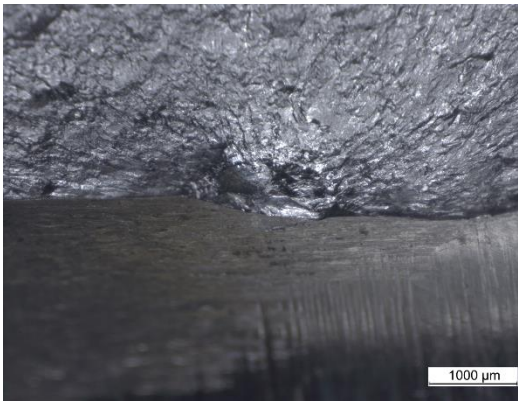
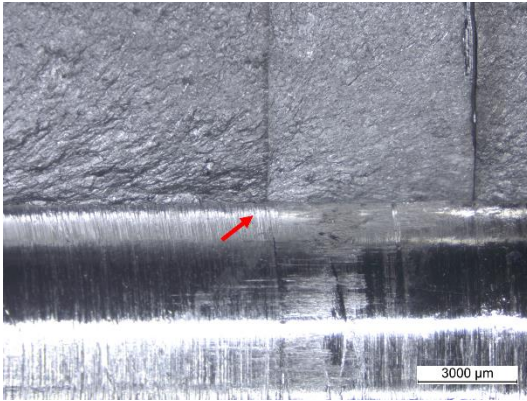
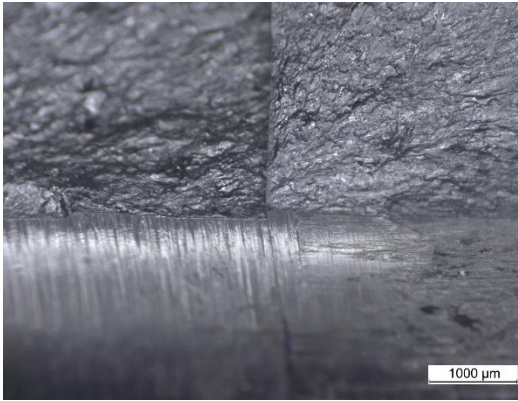


Figura 37 – Subseção A2, indicadas as regiões I, II e III os possíveis pontos de início da trinca (Fonte: a Autora, 2023)

As imagens feitas na lupa compõem a tabela 5.5, onde são apresentados os três possíveis pontos de início da trinca, indicados na Figura 37 como I, II e III.

Nas Figuras 38, 40 e 42 da tabela 5.5 é possível observar a alta rugosidade da cavidade em todo o canal, inclusive próximo aos pontos de início – apontada nas setas vermelhas, o que indica que o processo de inserção do inserto vertical prejudicou a peça base do componente, se tornando também um contribuinte para a falha, assim como descrito na literatura (LOPES, 2006).

Tabela 5.5 Imagens dos possíveis pontos de início da trinca no aço AISI 304L. Subseção A2. Regiões ordenadas na Figura 37. Imagens feitas na lupa em 0,67 e 2x de aumento.

AISI 304L	0,67x	2x
I		
<p>Figura 38 – Imagem da região I em 0,67x, seta vermelha indicando o ponto de início da trinca (Fonte: a Autora, 2023)</p>	<p>Figura 39 – Imagem da região I em 2x (Fonte: a Autora, 2023)</p>	
II		
<p>Figura 40 – Imagem da região II em 0,67x, seta vermelha indicando o ponto de início da trinca (Fonte: a Autora, 2023)</p>	<p>Figura 41 – Imagem da região II em 2x (Fonte: a Autora, 2023)</p>	

III

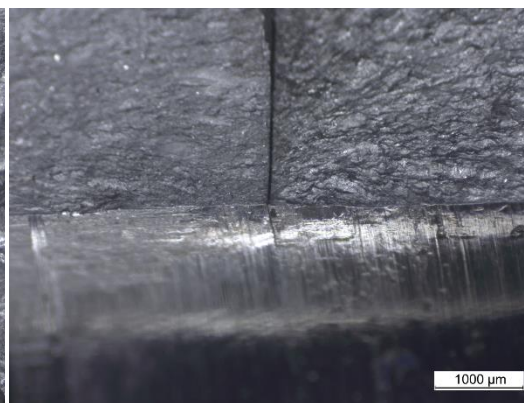
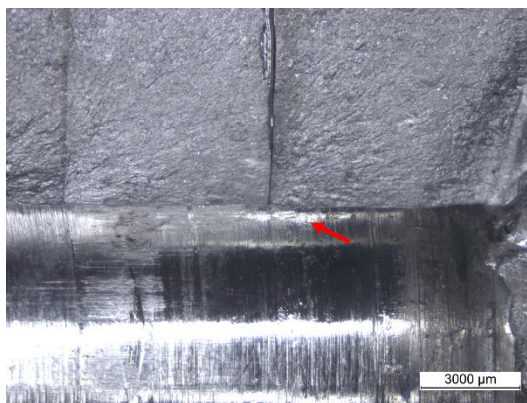


Figura 42 – Imagem da região III em 0,67x, seta vermelha indicando o ponto de início da trinca (Fonte: a Autora, 2023)

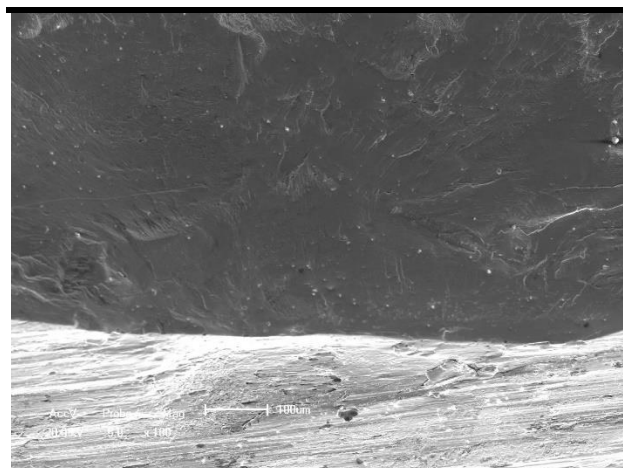
Figura 43 – Imagem da região III em 2x (Fonte: a Autora, 2023)

Fonte: a Autora, 2023.

A partir da observação em lupa, o ponto I se tornou o principal suspeito a iniciar a fratura. Por isso, a tabela 5.6 apresenta as imagens realizadas através do MEV desse ponto e dos seus arredores.

Tabela 5.6 Análise microscópica do ponto I no aço AISI 304L. Subseção A2. Imagens feitas no MEV.

100x



200x

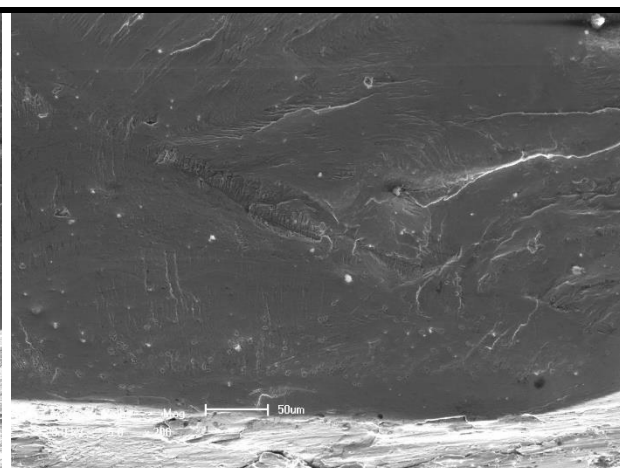
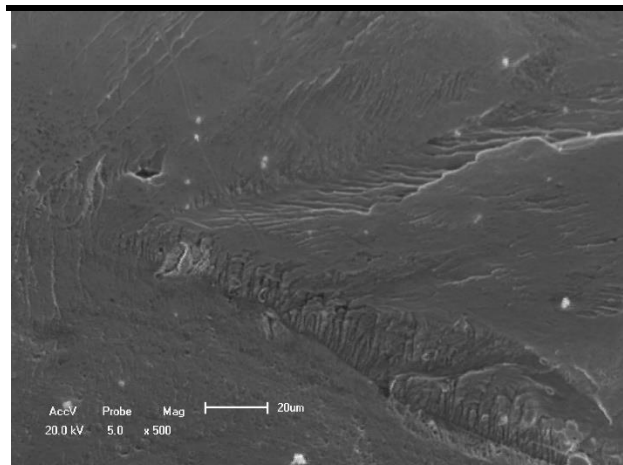


Figura 44 – Ponto I em 100x no MEV (Fonte: a Autora, 2023)

Figura 45 – Ponto I em 200x no MEV (Fonte: a Autora, 2023)

500x



1000x

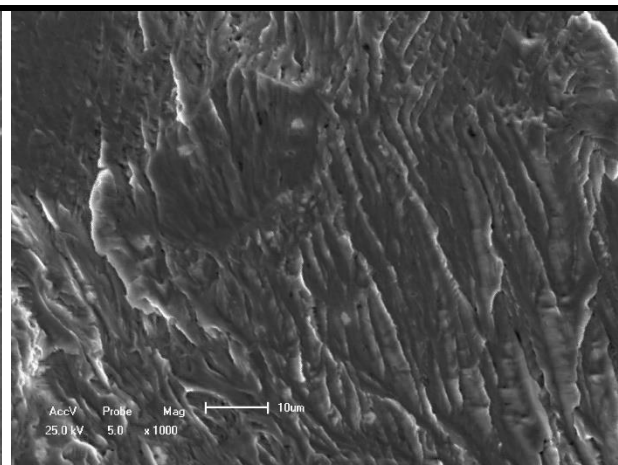


Figura 46 – Estrias de fadiga. Ponto I em 500x no MEV (Fonte: a Autora, 2023)

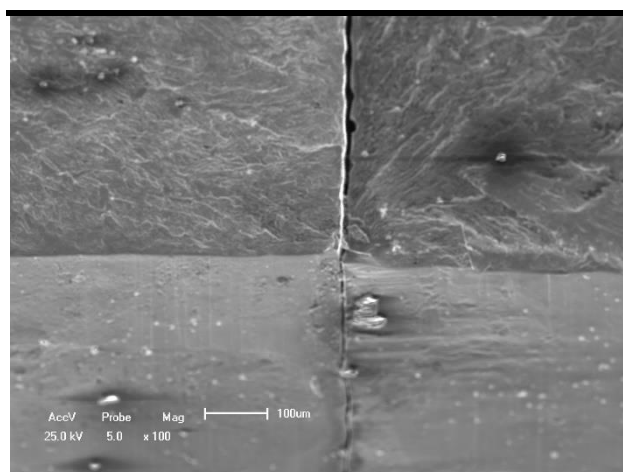
Figura 47 – Estrias de fadiga. Ponto I em 1000x no MEV (Fonte: a Autora, 2023)

Fonte: a Autora, 2023.

O ponto III também foi analisado no MEV, sendo considerado também um ponto de início em concomitância com o ponto I. A tabela 5.7 apresenta as imagens realizadas nele.

Tabela 5.7 Análise microscópica do ponto III no aço AISI 304L. Subseção A2. Imagens feitas no MEV.

100x



500x

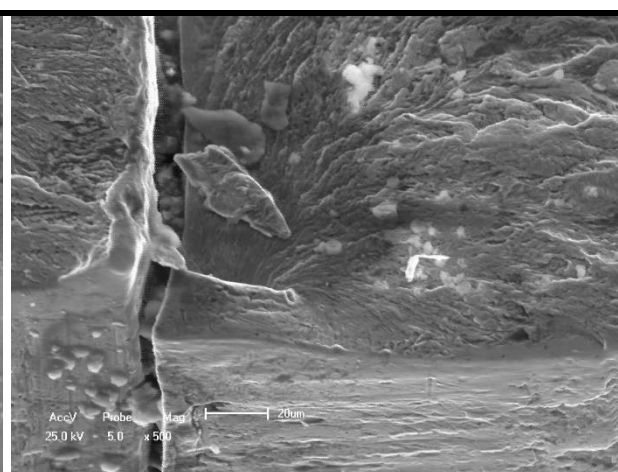
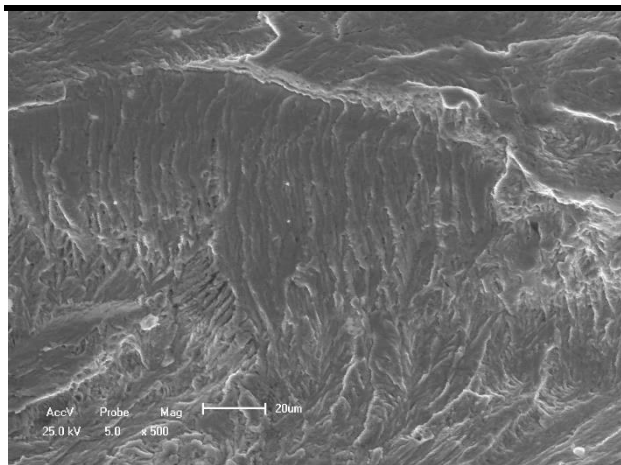


Figura 48 – Ponto III em 100x no MEV (Fonte: a Autora, 2023)

Figura 49 – Ponto III em 500x no MEV (Fonte: a Autora, 2023)

500x



1000x

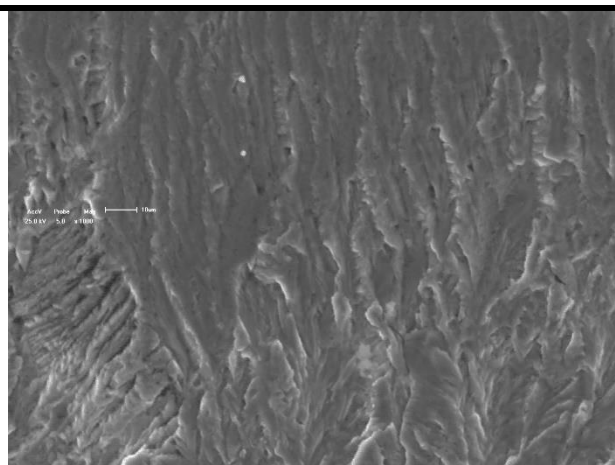


Figura 50 – Estrias de fadiga. Ponto III em 500x no MEV (Fonte: a Autora, 2023)

Figura 51 – Estrias de fadiga. Ponto III em 1000x no MEV (Fonte: a Autora, 2023)

Fonte: a Autora, 2023.

A partir das avaliações feitas tanto na lupa como no MEV, foi observado que a fratura do prato 3 se iniciou devido a fadiga do componente. Os pontos I e III correspondem ao início da trinca, as marcas de praia e estrias de fadiga originadas desses pontos indicam que eles iniciaram a fratura conjuntamente.

O ponto II é uma região secundária, a fratura iniciou do ponto I e se propagou de maneira bidimensional até atingir o inserto horizontal, se tornando tridimensional e iniciando o ponto II.

As imagens da tabela 5.8 apresentam o ponto II também analisado através do MEV.

Tabela 5.8 Análise microscópica do ponto II no aço AISI 304L. Subseção A2. Imagens feitas no MEV.

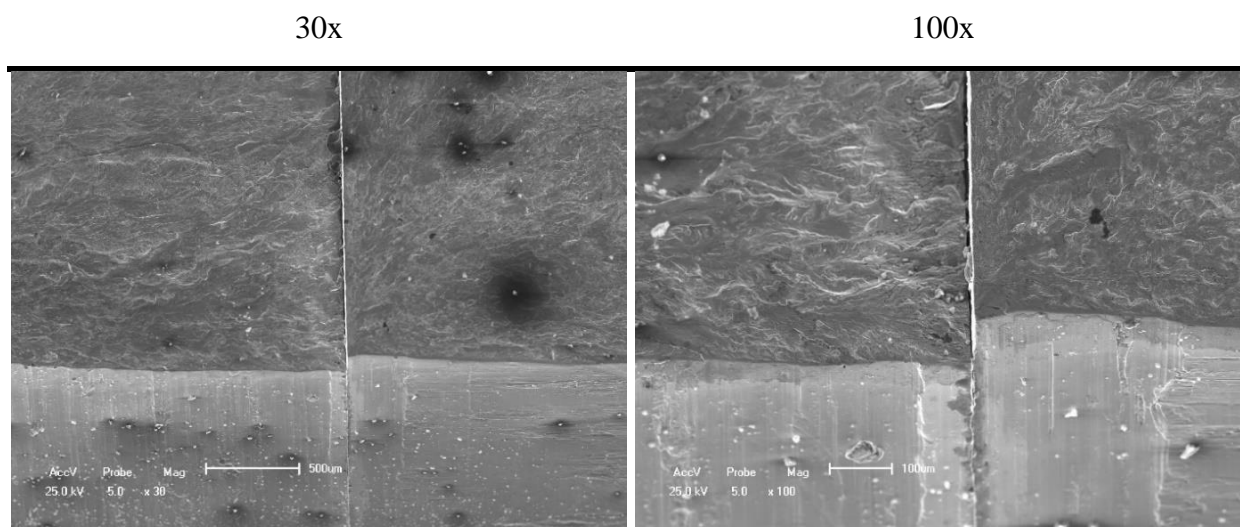


Figura 52 – Ponto II em 30x no MEV (Fonte: a Figura 53 – Ponto II em 100x no MEV (Fonte: a Autora, 2023)

Fonte: a Autora, 2023.

Baseado em todas as avaliações realizadas no prato 3, entende-se que a falha ocorreu devido a deficiências atuando em conjunto em dois processos: o de fabricação e o operacional.

O prato 3 apresenta um processo de fabricação complexo, o componente é composto pela peça base, um inserto vertical e um horizontal. Os insertos são soldados a peça e são cruzados, gerando múltiplos concentradores de tensão nas regiões de interseção entre a base e eles. O que torna os pontos como o I, II e III, regiões extremamente suscetíveis a falha por fadiga. Assim como apresentado por Carvalho (2002), Ponte (2011) e Pizzio (2016), fratura por fadiga é um dos principais fatores de falha na indústria petroquímica.

O processo operacional do prato 3 consiste na passagem de água para refrigeração através do canal criado a partir do inserto horizontal. Entretanto, como visto anteriormente, esse canal estava severamente obstruído devido as incrustações, o que dificultou a passagem de água, prejudicando a refrigeração do componente. A má refrigeração do prato 3 também leva a fadiga do componente em operação, já que ele estava sofrendo um sobreaquecimento e não trabalhando na temperatura estipulada, que corresponde de 32 a 37 °C para sucção e de 90 a 100 °C para a descarga.

Seria muito interessante avaliar a possibilidade de reduzir a rugosidade do canal vertical. Uma possível solução seria, ao invés de introduzir o inserto por pressão, fazer esse processo por interferência. Ou seja, aquecendo a peça base, que iria expandir, e resfriando o inserto, que iria comprimir, facilitando o seu encaixe. Feito isso, ambas as partes iriam retornar ao seu tamanho original estando acoplada uma à outra e a rugosidade do canal seria atenuada. Desta forma reduzindo a concentração de tensões nos pontos identificados como críticos na atual análise de falha.

E ainda, visando contribuir para o processo operacional do prato 3, avaliar a possibilidade da utilização de um aditivo no canal de refrigeração, como o etilenoglicol, ou do tratamento da água usada para refrigeração, para que seja evitado o acúmulo de incrustações, não gerando um sobreaquecimento na peça e, conseqüentemente, perda da sua eficiência.

6. CONCLUSÕES

Através da análise de falha realizada neste trabalho foi possível atingir o objetivo de identificar o mecanismo que levou ao trincamento do prato 3: falha por fadiga. A fadiga foi indicada a partir da visualização da abertura da trinca, dessa forma foi possível ver as marcas de praia a olho nu e as estrias de fadiga utilizando a microscopia eletrônica de varredura.

Para o entendimento completo da falha por fadiga, foi necessário compreender como operava o componente. Pela avaliação de diferentes seções, pode-se observar o seu processo de fabricação e funcionamento. Foi verificado que esses dois parâmetros influenciaram na falha.

O prato 3 apresenta uma rota de processamento complexa, incluindo dois insertos cruzados e três regiões soldadas, fazendo com que ocorram acúmulos de tensões em determinados pontos. Além disso, o material apresentou uma microdureza média de 190,44 HV, superior aos valores encontrados em literatura de 110 HV. E ainda, o inserto vertical foi acoplado de maneira a tornar sua cavidade extremamente rugosa, fator que contribuiu para o mau funcionamento do componente.

Em questões operacionais, o canal de refrigeração estava extremamente incrustado, 74,59% dele estava obstruído, enquanto a passagem livre de água era apenas de 25,41%, ou seja, devido a obstrução, a passagem de água ficou debilitada, fazendo com que a temperatura de operação real divergisse da temperatura estipulada em projeto e levando a perda de eficiência do componente.

Dessa maneira, seria interessante a aplicação de algumas melhorias. Uma delas é a redução da rugosidade do canal vertical por meio da mudança do processo de fabricação dele, se sugere utilizar o processo de interferência. Em que a peça base é dilatada e o inserto contraído, assim facilitando seu encaixe e reduzindo a rugosidade. E ainda, como melhoria, pode ser feita a utilização de um aditivo no canal de resfriamento, para que seja evitado o acúmulo de incrustações que obstruem a passagem de água, tornando assim a refrigeração mais efetiva.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuros estudos, sugere-se a avaliação da tenacidade a fratura do material, buscando aumentar a vida em fadiga do componente. Processos como o de soldagem reduzem a tenacidade, tornando o componente muito mais suscetível a propagação de trincas e até a falha.

Além disso, também é sugerida uma análise de modelos finitos para observar o estado de tensões no componente, afim de verificar a oportunidade de melhoria no projeto, reduzindo as tensões nos pontos de descontinuidade geométrica e regiões soldadas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: Informação e documentação: Referências. Rio de Janeiro, 1994.

A BRASKEM: PERFIL E HISTÓRIA. BRASKEM, 2021. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/perfil>. Acesso em: 26 de março de 2023.

BALDISSARELLI, L.; FABRO, E. Manutenção Preditiva na indústria 4.0. 2019.

BRUN, J. W. Manual de Operação do Eteno Verde: mo 5010-00107. BRASKEM, [S.l.], 2014.

CARVALHO, M. C.; DEUS, E. P. Análise de Fratura de Dispositivo de Controle de Fluxo Utilizado na Indústria Petroquímica. UFC. Fortaleza, 2002.

CAVALCANTE, A. P.; CANTO, L. B. AVALIAÇÃO DO EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE BAQUELITE SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO POLIPROPILENO. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. 2009.

CHOPRA, O. K.; GAVENDA, D. J. Effects of LWR coolant environments on fatigue lives of austenitic stainless steels. [S.l.], 1997.

COSTA, J. M. A. d. Sistematização da Gestão e do Controle das Atividades de Manutenção numa Empresa de Válvulas Industriais. 2016.

EMATNÉ, T. A.; GUEDES, E. E. V. Gestão da Produtividade: estudo de caso para análise de métodos e práticas adotados na manutenção de sistemas de ROV. 2019.

Ford Motor Company, 1997.

GAMA, A. L. F. O uso de machine learning na implementação de manutenção preditiva em usinas termelétricas. Rio de Janeiro, 2017.

GARDNER, L. The use of stainless steel in structures. Progress in Structural Engineering and Materials, Wiley Online Library, 2005.

GENTIL, V. Corrosão. Rio de Janeiro, 2007.

GIORA, R. D. P. Avaliação Comparativa de Barras Laminadas do Aço 304L com e sem Tratamento Térmico de Solubilização com Foco em Corrosão. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

HADDAR, N.; FISSOLO, A. 2d simulation of the initiation and propagation of crack array under thermal fatigue. Nuclear engineering and design, Elsevier, 2005.

KARDEC, A; NASCIF, J; BARONI, T. Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas. Coleção Manutenção – ABRAMAN. Rio de Janeiro, 2002.

LEITE, G. A. Controle Antisurge de Compressores Centrífugos. Projeto de graduação de Engenharia de controle e automação-PUC RIO. Rio de Janeiro, [S.l.], 2013.

LOPES, K. S. S. Influência dos parâmetros de usinagem na resistência à fadiga de aços AISI 4140. Belo Horizonte, 2006.

MICHAELIS ABNT. Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa. 2000.

MORO, N.; AURAS, A. P. Introdução à gestão de manutenção. Florianópolis, 2007.

NEPOMUCENO, L. X. Técnicas de manutenção preditiva-vol. 1. [S.l.]: Editora Blucher, 2014.

OTANI, M.; MACHADO, W. V. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. Revista Gestão Industrial. 2008.

PASSAMAI, B. D.; CASTILHO, G. B. NOVA METODOLOGIA DE ANÁLISE DE FALHA EM EMPRESA DE REFRIGERANTE – PROPOSTA E ESTUDO DE CASO. UFES – Universidade Federal do Espírito Santo. 2007.

PEREIRA, A.; NEVES, F. Gestão da Manutenção. Curso Técnico, SENAI-CFP “ALVIMAR CARNEIRO DE REZENDE”, Contagem, Minas Gerais, [S.l.], 2011.

PERES, M. L. et al. Sistema de planejamento e controle de manutenção baseado nos índices de controle de processo numa empresa de telecomunicações. 2011.

PINTO, A. K.; XAVIER, J. A. N. Manutenção: função estratégica. 2009.

PIZZIO, E.; LEMOS, G. V. B.; STROHAECKER, T. R. Estudo de Fadiga de Uniões Parafusadas. 71º Congresso Anual, ABM Week, 2016.

RASMUSSEN, P.; KURZ, R. Centrifugal Compressor Applications - Upstream and Midstream. Proceedings of the 38th Turbomachinery Symposium, Houston. p. 169- 186, 2009.

ROLLINS, J. P. Manual de Ar Comprimido e Gases. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

SAKURADA, E. Y. As técnicas de Análise do Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos. Capítulo 5. Florianópolis, 2001. SEVERO, B. B.; TROJAN, F.; KOVALESKI, J. L. Manutenção preditiva por ultrassom. III Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Ponta Grossa, 2013.

SOUZA, L. H.; XAVIER, C. R.; MEDEIROS, N.; MARCELO, C. J. Avaliação da soldagem TIG autogéna sobre as características dimensionais da solda do aço AISI 304L. Fortaleza, 2016

TAUQIR, A.; SALAM, I.; HASHMI, F. H.; KHAN, A. Q. An air crash case study. Engineering Failure Analysis, Elsevier, 1996.

TAVARES, Lourival Augusto. Excelência na Manutenção – Estratégias para Otimização e Gerenciamento. 2ª edição. Salvador: Casa da Qualidade, 1996.

XAVIER, J. N. Manutenção classe mundial. Minas Gerais, 2000.

PANOSSIAN, Z. Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas. Volume II. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1993.

Ponte, P. J. V. Análise de Fadiga e Confiabilidade do Último Prato que Veda o Cilindro de um Hiper-Compressor de Eteno. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

SILVA, S. C. MECANISMOS DE TRINCAMENTO DE AÇO DE MICROESTRUTURA AUSTENO-FERRÍTICA EM MEIO CORROSIVO. Rio de Janeiro, 2011.

GIORA, R. D. P. AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE BARRAS LAMINADAS DO AÇO AISI 304L COM E SEM TRATAMENTO TÉRMICO DE SOLUBILIZAÇÃO COM FOCO EM CORROSÃO. Porto Alegre, 2012.

VATAVUK, J.; FALDINI, S. B. Análise Topográfica de Trinca de Corrosão sob Tensão em Aço 304L: Estudo de Caso. Revista Mackenzie de Engenharia e Computação. 2010.