

Estudo de caso de recuperação de eixo de AISI 4140 com processo de soldagem usando eletrodo revestido 48 E7018

Rita Taynara Alves da Câmara ^[1], Francisco Edson Nogueira Fraga ^[2]

^[1] UFERSA, Engenharia Mecânica; aluno: Rita Taynara alves da Câmara; ritataynaraa@gmail.com

^[2] UFERSA, Engenharia Mecânica; Francisco Edson Nogueira Fraga; nfraga@ufersa.edu.br

Data da defesa: 19/04/2024;

Resumo: Considerando que todo material ou equipamento está sujeito a falhas, cujos danos podem ser tanto financeiros quanto afetar a vida humana, o presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo bibliográfico abordando os diversos tipos de falhas mecânicas. Esses incluem falhas por fadiga de baixo e alto ciclo, falhas por fluência e por impacto, além de caracterizar as fraturas dúcteis e frágeis. Para obtenção da peça para estudo de caso, foi realizada uma visita *in loco* em uma empresa de manutenção de equipamentos usados na indústria petrolífera e salineira. Durante essa visita, obteve-se um eixo de uma bomba centrífuga usado como bomba de lama em perfurações para obtenção de petróleo. Este eixo, fabricado em aço 4140, havia passado por um processo de soldagem utilizando o eletrodo 48 E7018 de 3,25mm, como uma tentativa de recuperação de desgaste. No entanto, a técnica não foi satisfatória, resultando na fratura do eixo. Para investigar a causa da fratura e propor medidas mitigadoras, realizou-se uma análise da superfície da fratura e da solda, juntamente com uma metalografia da amostra retirada da região soldada, buscando identificar os fatores que contribuíram para o fracasso da soldagem e sugerir formas de prevenção para futuros casos similares. Após analisar as condições de soldagem, concluiu-se, que a soldagem deve ser realizada alternando os lados do eixo para evitar distorções, e que o alívio de tensões pós-soldagem é fundamental neste caso. Além da melhoria do processo de soldagem, este estudo propôs outras duas medidas mitigadoras: o uso do produto Plastbeell para reparar o eixo ou a aquisição de uma barra cilíndrica de AISI 4140 e a contratação de um serviço de usinagem para ajustá-lo às medidas necessárias do eixo.

Palavras-chave: falha; fraturas; eixo; recuperação.

1. INTRODUÇÃO

A falha é um termo designado para quando um componente ou equipamento se tornou inoperante ou deixou de desempenhar o seu papel satisfatoriamente. Os tipos de falhas mais comuns são as falhas por fadigas, mas grande parte dessas poderiam ter sido evitadas realizando um estudo adequado antes da utilização da peça ou equipamento. Um material pode se romper mesmo antes de atingir o seu limite de ruptura ou escoamento, quando submetido a cargas cíclicas, mesmo que em baixas tensões. O material inicia uma perda das propriedades muitas vezes visíveis apenas por microscópio, o que pode levar a uma fratura inesperada [1-2].

Segundo Callister [3], a fratura simples ocorre quando um material é submetido a uma tensão, essa tensão pode ser de tração, compressão, torção, cisalhamento ou uma combinação dessas. De acordo com a deformação plástica do material, é possível verificar que existem dois tipos de fratura: dúctil e frágil, onde o material dúctil é mais tenaz, ou seja, possui uma maior capacidade de absorção de energia antes de entrar na fase plástica, se comparado ao material frágil que possui uma fratura de maneira mais inesperada [3].

Além da falha por fadiga, também pode ocorrer a falha por fluência, que ocorre quando o material é colocado sob condições de serviço em altas temperaturas e são expostas a tensões mecânicas estáticas. A mesma ocorre em todos os tipos de materiais e são consideradas relevantes nos metais, quando a temperatura atinge 40% Temperatura de fusão do material (T_f). [3].

A análise de falha é um estudo investigativo de grande relevância, que permite identificar a causa da falha, possibilitando a tomada de decisões mitigadoras e melhorias nos próximos projetos. Para realizar essa análise,

é pertinente a busca por informações das condições de operação, como: carga a qual é submetida, temperatura de trabalho, rotação, entre outras informações que possam favorecer a análise. Em caso de fratura, é realizada a chamada fractologia, que consiste na análise das características da fratura. Essa técnica pode ser realizada inicialmente á olho nu, ou com auxílio de uma lupa, identificando as características macroscópicas da fratura.

Para realizar uma análise detalhada da estrutura microscópica da fratura, é comum empregar-se um microscópio de varredura eletrônica. Este equipamento possibilita a visualização de características como dimples, estrias e clivagem, fundamentais para a caracterização do tipo da fratura ocorrida. Além disso, é possível realizar uma análise da morfologia do material, por meio da metalografia utilizando um microscópio óptico ou de varredura eletrônica. Nesse processo, uma amostra do material é retirada e preparada para observação microscópica, oferecendo informações adicionais sobre sua estrutura e propriedades [2].

O presente trabalho teve como principais objetivos obter uma peça que falhou, realizar a análise de falha colocando em prática os conhecimentos adquiridos na revisão bibliográfica e propor medidas mitigadoras para evitar falhas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Entender por que o material falhou, permite evitar falhas futuras e tendo em vista que, a falha ocorre devido á alguma negligência, seja durante o projeto, na fabricação do material, na construção, na operação do componente ou na manutenção, á análise da falha tem sua devida importância. Todo equipamento ou componente quando chega a falhar, apresenta características indicativas do seu tipo de material e o tipo de carregamento que provocou a falha, algumas dessas características podem ser vistas macroscopicamente (a olho nu, ou com auxílio de uma lupa) e outras apenas com o uso de equipamentos que permitem a ampliação da visão em milhares de vezes e com alta resolução, permitindo a visualização da morfologia do material e o tipo da fratura [4].

A fractografia consiste na análise da morfologia da superfície danificada, com o objetivo de identificar o tipo da fratura e suas possíveis causas. Como forma complementar da análise macrográfica, pode-se usar um microscópio eletrônico de varredura (MEV) que permite uma ampliação de até 50000 vezes, permitindo a observação de características como: marcas de rio, clivagem e dimples. [3-4]

2.1 FRATURA FRÁGIL

O material frágil tem como principal característica a pouca ou nenhuma deformação, ocasionando uma fratura repentina. Para esse tipo de material, a trinca se propaga com velocidade elevada e de forma perpendicular a direção da tensão de tração aplicada. A fratura pode ocorrer de maneira transgranular, passando pelos grãos, como mostra a Figura 1, ou de maneira intergranular, com a propagação das trincas ao longo do contorno de grão, como mostra a Figura 2 [3].

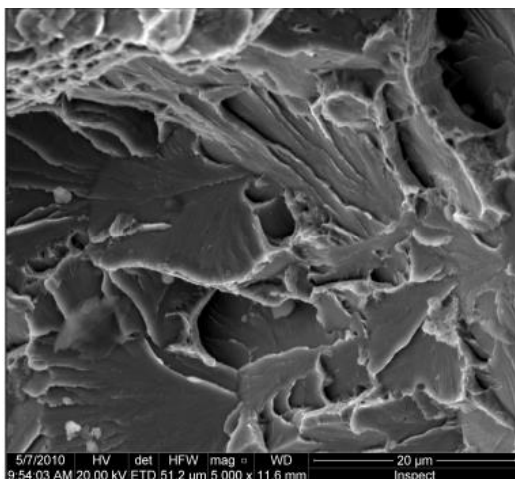


Figura 1- Fratura frágil transgranular, passando pelos grãos.
(Fonte: [5])

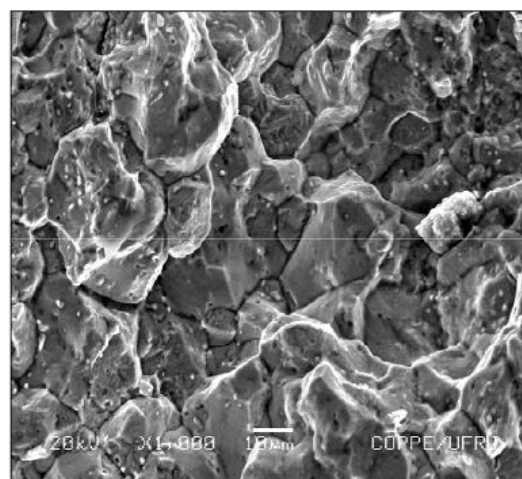


Figura 2- Fratura frágil intergranular, passando ao longo dos contornos de grão.
(Fonte: [5])

A fratura frágil ocorre com a ruptura de ligações atômicas ao longo dos planos cristalinos, sendo esse processo chamado de clivagem. A superfície da fratura em uma vista macroscópica, possui um aspecto brilhoso e granuloso, como mostra a Figura 3. Já em uma visão microscópica, é possível

visualizar as marcas de praia e as chamadas marcas de sargento, em formato de “V”, indicando onde iniciou a fratura, como mostra a Figura 4. [2-3]

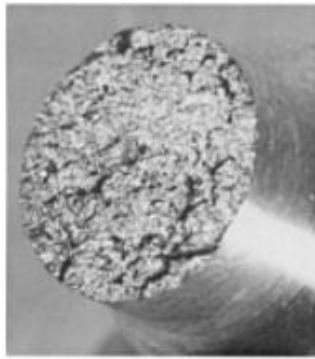


Figura 3 – Vista macroscópica de uma fratura frágil.

Fonte: American Society [6]

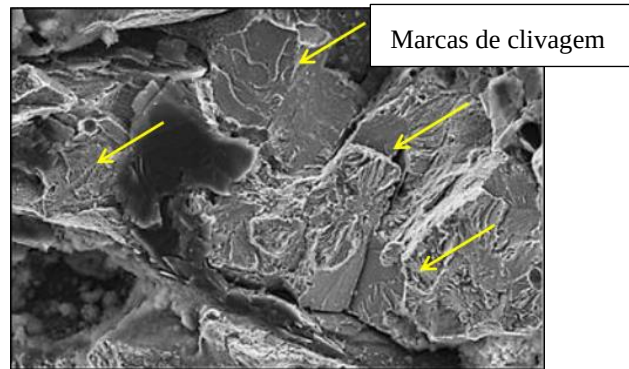


Figura 4 – Marcas de clivagem de uma fratura frágil.

Fonte: Adaptado [4].

2.2 FRATURA DÚCTIL

O material dúctil tem como principal característica, a grande capacidade de se deformar plasticamente, com isso suportam grandes esforços e quando ocorre a fratura é normalmente devido a sobrecargas [2].

O processo da fratura dúctil é dividido em etapas. Inicialmente se formam pequenas cavidades na seção transversal do material, em seguida esses microvazios aumentam de tamanho e, por consequência, aproximam-se formando uma trinca elíptica. Essa trinca continua se propagando paralela a direção do seu eixo principal até ocorrer a fratura em um ângulo de aproximadamente 45° (ângulo no qual a tensão de cisalhamento é máxima), em relação ao eixo de tração [3].

A fratura dúctil possui como característica macroscópica, um formato taça e cone, devido sua semelhança com esses objetos, e a parte interna central da superfície da fratura é irregular e fibrosa, como mostra a Figura 5.

Em uma análise microscópica, a fratura dúctil apresenta microcavidades que são chamadas de dimples. O formato dos dimples variam de acordo com o tipo de carregamento qual a peça foi submetida. Em caso de tração, possuem um formato mais arredondado e em caso tensões de cisalhamento, possuem formato mais elíptico. A Figura 6 mostra a presença de dimples em uma análise microscópica de uma fratura dúctil [2].

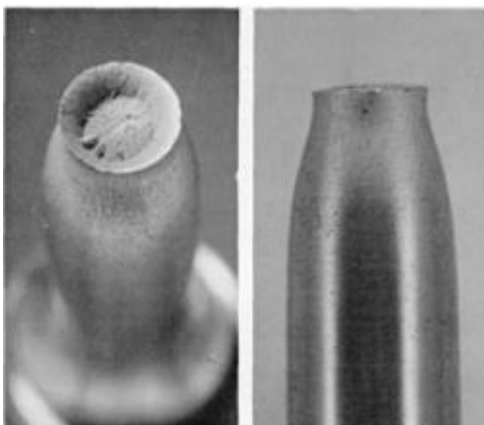


Figura 5- Vista macroscópica da fratura dúctil. Fonte: American Society [6].

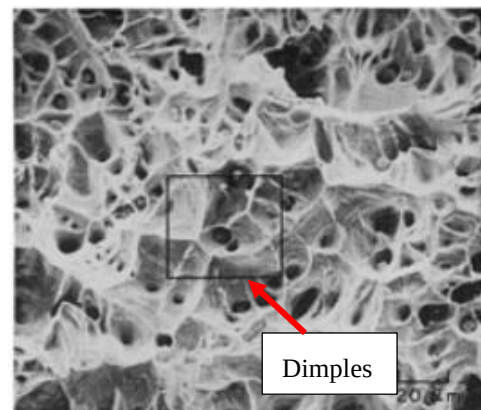


Figura 6- presença de dimples em uma análise microscópica de uma fratura dúctil. Fonte: American Society [6].

2.3 FALHA POR FLUÊNCIA

A fluência é uma deformação plástica que ocorre com uma taxa de deformação que varia com o tempo, dependendo da tensão aplicada e temperatura submetida. É um fenômeno indesejável e que remete atenção da indústria devido a redução na vida útil no componente/equipamento, principalmente para aplicações onde a temperatura de serviço ultrapassa 0,4 a 0,5 vezes a temperatura de fusão do material [3-7].

Graficamente como mostra a Figura 7, é possível observar o comportamento do material para fluência sob uma carga constante. Inicialmente, com a aplicação da carga, o material se deforma elasticamente de maneira instantânea, após esse processo, ocorre a chamada: fluência primária, onde a taxa de fluência é continuamente decrescente, sugerindo que o material está passando por um encruamento, aumentando sua resistência à fluência. Em seguida, inicia a fluência secundária, onde a taxa de fluência é constante, neste estágio a fluência possui uma maior duração e ocorre um equilíbrio entre o encruamento e a recuperação. Por último, na fase terciária ocorre uma aceleração da taxa de fluência e ocorre a fratura, resultante da alteração na microestrutura [3].

Santos [7] afirma em seu trabalho que um dos maiores desafios na análise do comportamento da fluência, é relacionar a taxa de deformação com a tensão aplicada e para essa quantificação é largamente empregada a equação (1):

$$\dot{\epsilon}_{min} = A\sigma^n \quad (1)$$

Onde:

A e n: são constantes do material

Tendo em vista as limitações de retiradas de amostras do material, para posterior reparo (ensaio destrutivo), e a não precisão de alguns ensaios não destrutivos, como: ultrassom e métodos magnéticos, para acompanhamento dos danos causados pela fluência no material, Santos [7] analisou em seu trabalho, testes mecânicos, com pequenas amostras do material sem necessidade de reparo posterior e com o equipamento em funcionamento, tornando um método não destrutivo de análise. A técnica utilizada é a chamada “small punch”, onde normalmente é retirada uma pequena amostra e a mesma é submetida a uma carga, através de um punção de diâmetro reduzido. Apesar de ainda não possuir uma normalização específica, para Santos [7] é um ensaio promissor e que tende a ser uma importante ferramenta de avaliação da fluência [7].

A fratura por fluência macroscopicamente possui como característica um aspecto opaco e poroso, com uma análise microscópica, é possível ver a presença de microvazios entre os contornos de grão que aumentam com o tempo de exposição do material às altas temperaturas e tensão, como mostra a Figura 8.

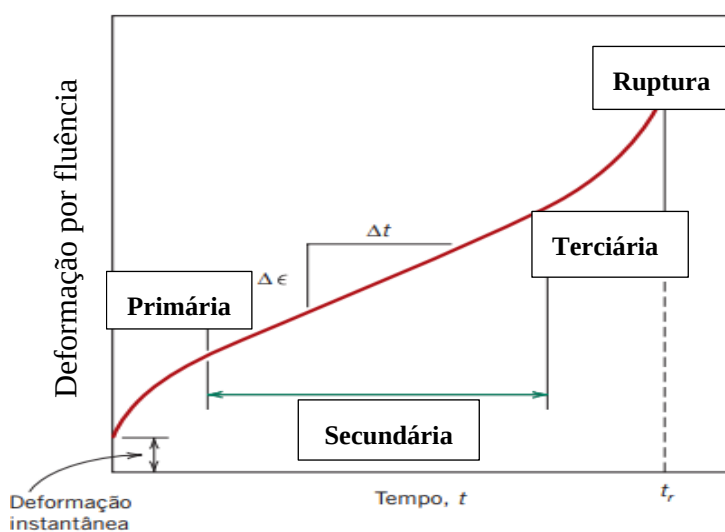


Figura 7- Gráfico do comportamento da deformação por fluência em relação ao tempo. (Fonte: Adaptado [3])

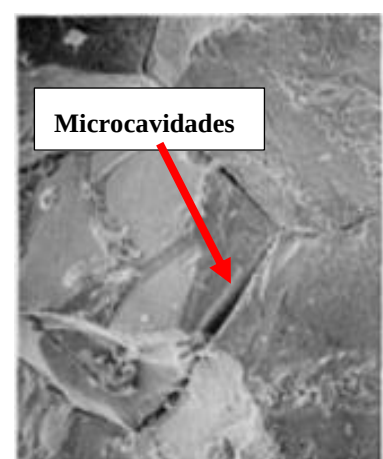


Figura 8- Superfície de uma fratura por fluência. Fonte: American Society [6].

2.4 FALHA POR FADIGA

Para Callister [3] “*Fadiga é uma forma de falha que ocorre em estruturas submetidas a tensões dinâmicas e variáveis*”. Esse tipo de falha, pode ocorrer antes mesmo do material atingir o limite de resistência a tração, ou o limite de escoamento, devido a submissão a esforços repetitivos ou cíclicos. Mesmo em materiais normalmente dúcteis, a falha por fadiga ocorre com pouca ou nenhuma deformação plástica, ocorrendo repentinamente, sem aviso prévio [3].

As falhas por fadiga normalmente iniciam com uma pequena trinca gerada a partir de elementos concentradores de tensão. A primeira fase da falha é chamada de nucleação da trinca, as trincas surgem devido a heterogeneidade das superfícies granulares e cristalinas dos metais e inicialmente ocorrem a 45° em relação a direção de sollicitação, conforme vão se propagando, mudam a direção. Na segunda fase surgem as chamadas marcas de praia e a propagação da trinca ocorre na direção da tensão de tração, podendo ocorrer de forma transgranular ou intergranular. A terceira e última fase é a ruptura repentina do componente [8].

A fratura por fadiga pode ser classificada também de baixo ou alto ciclo. A fadiga de baixo ciclo ocorre com menos de 10^4 a 10^5 ciclos, já a fadiga de alto ciclo ocorre com valores superiores a 10^4 a 10^5 ciclos. A fadiga de alto ciclo com tensão inferior ao limite de escoamento, possui deformação predominantemente elásticas, com marcas de praia na maior parte da superfície e fratura final pequena como mostra a Figura 9 (a). Já para fadiga de baixo ciclo com tensões acima do limite de escoamento, a deformação é predominantemente plástica, as marcas de praia ocupam uma menor parte da superfície e a fratura final ocupa um espaço maior, como mostra a Figura 9 (b e c). [2-3]

As peças com concentradores de tensão mais acentuados, apresentam marcas de praia na maior parte da superfície e variam de acordo com a quantidade de ciclos e o tipo de carregamento. A frente da trinca se propaga mais rapidamente na periferia do componente, mudando a curvatura das marcas de praia, como mostra a Figura 9 (d,e e f). Na figura 9, as setas representam o início da trinca e a zona sombreada o final da fratura. [2]

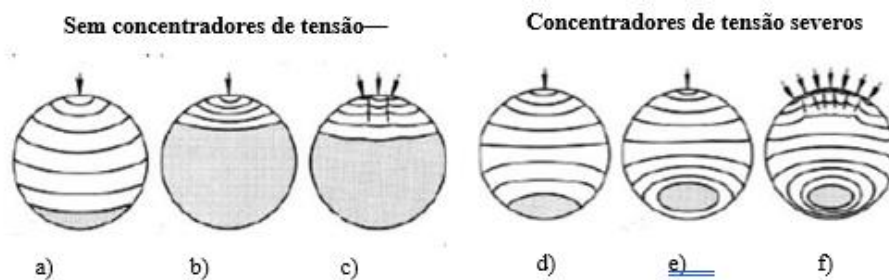


Figura 9- Fadigas produzidas por tensões de baixo e alto ciclo.

(Fonte: Adaptado [2])

2.5 ANÁLISE DE FALHA

Para conduzir uma análise de causa de falha de forma eficaz, é essencial iniciar o processo com a coleta abrangente de dados operacionais do componente em questão. Isso inclui informações como temperatura de operação, rotação, carga aplicada, tempo de uso e qualquer histórico relevante de manutenção, além da origem da peça ou equipamento. Detalhes como o material utilizado na fabricação, tratamentos térmicos aplicados e parâmetros de utilização também são cruciais.

Após obter o histórico da peça, o próximo passo é realizar uma inspeção visual para examinar as características macroscópicas da fratura. Em casos que demandem uma investigação mais aprofundada, é recomendável realizar uma análise microscópica detalhada. Se houver dúvidas quanto ao material de fabricação ou se a peça sofreu alguma modificação, é aconselhável conduzir uma metalografia para avaliar a microestrutura com maior precisão e confiança. Essas etapas garantem uma abordagem completa e precisa na identificação das causas subjacentes às falhas mecânicas.

Para realizar a metalografia, é necessário primeiro coletar uma amostra representativa do material em análise. Caso a amostra seja pequena, é realizada a etapa de embutimento para facilitar os processos subsequentes. Posteriormente, a amostra passa pelo processo de lixamento, que pode ser executado manualmente ou com o auxílio de uma politriz, seguido pelo polimento e, por fim, o

ataque químico. Após a preparação da amostra, esta é examinada sob um microscópio. Para essa análise, pode-se utilizar um microscópio óptico, mas para uma precisão ainda maior, recomenda-se o uso de um microscópio eletrônico de varredura. Essas etapas garantem uma análise detalhada da microestrutura do material, possibilitando uma compreensão mais profunda de suas características e propriedades.

3. ESTUDO DE CASO

Para realização do presente trabalho, foi realizada uma visita *in loco* em uma empresa de manutenção de equipamentos usados na indústria petrolífera e salineira, onde foi coletado o eixo da bomba centrífuga Mission Magnum 1, retratada na Figura 10 e 11, que constitui uma parte da chamada, “bomba de lama” no setor petrolífero. A bomba desempenha um papel crucial na perfuração do poço, sendo responsável por bombear a lama retirada do poço para o reservatório e, posteriormente, do reservatório de volta para dentro do poço através da broca. Essa função é essencial para manter a estabilidade do poço e garantir o resfriamento adequado da broca durante o processo de perfuração.

O eixo tem como função transmitir energia. Em bombas centrífugas são cilíndricos e maciços, com extremidades roscada para montagem do rotor e a outra com chaveta para acoplar o sistema de transmissão de força e torque. As causas mais comuns de falhas em bombas usadas para bombear materiais abrasivos, se deve a fadiga, corrosão, desgaste, sobrecarga e vibração excessiva. No caso abordado, a causa foi o desgaste devido ao desgaste do selo mecânico (Figura 12) que permitiu o contato da lama com o eixo. A lama possui partículas abrasivas que intensificam o desgaste junto ao atrito natural [8-9].



Região de atrito e desgaste

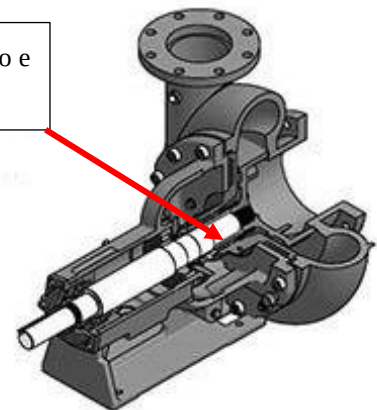


Figura 10- Foto real bomba Mission Magnum 1
(Fonte: Autoria própria)

Figura 11- Desenho tridimensional da bomba centrífuga Mission Magnum1 (Fonte: [11])



Lama que entra em contato com o eixo e causa desgaste

Figura 12- Selo Mecânico novo x Selo Mecânico desgastado. (Fonte: Autoria própria)

De acordo com o catálogo do equipamento, o eixo é confeccionado em 42CrMo (AISI4140), material comumente usado para esse tipo de solicitação. Conforme ilustrado na Figura 13, foi realizada uma tentativa de reconstrução do referido eixo por meio do método de soldagem com eletrodo revestido. O proprietário da oficina, informou que o eletrodo utilizado foi do tipo 48 E7018, com um diâmetro de 3,25mm e que o processo de soldagem, incluiu um pré-aquecimento sem controle exato de temperatura, sendo finalizado quando a peça atingiu uma tonalidade azulada, cerca de 350°, seguido por um resfriamento com cobertura, evitando exposição ao vento [9-10].

O segundo eixo ilustrado na Figura 13, mostra o eixo novo, onde é possível notar que a fratura ocorreu entre a base e a rosca. Durante a coleta de dados, foi relatado que a fratura ocorreu antes mesmo do início da operação do equipamento, onde após o processo de soldagem, verificou-se um empenamento no eixo e na tentativa de desempenar por conformação mecânica, o eixo fraturou. Na Figura 14 é possível visualizar a superfície da fratura. [9]

Através de uma simulação realizada por [8], com auxílio do software Ansys, foi possível constatar que a região mais crítica de concentração de tensão do eixo, está na extremidade que fica a rosca que se acopla ao rotor da bomba, mais especificamente no raio de saída da rosca como mostram as Figuras 15 e 16. Exatamente no local onde houve a fratura do eixo analisado.



Figura 13- Eixo que sofreu fratura x Eixo novo
(Fonte: Autoria própria).



Figura 14- Superfície da fratura
(Fonte: Autoria própria)

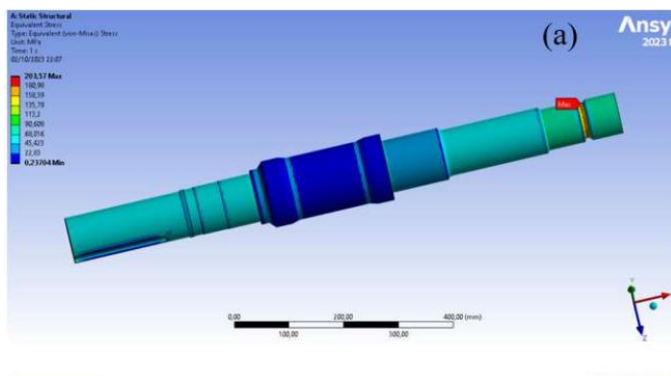


Figura 15- Distribuição de tensões em todo eixo.
(Fonte: REIS, Warlley [8]).

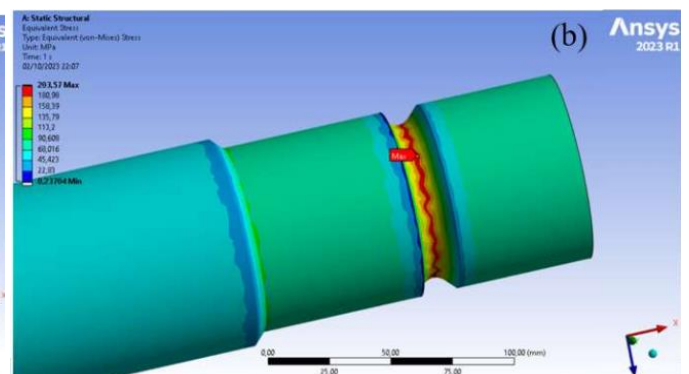


Figura 16- Região crítica de tensão do eixo.
(Fonte: REIS, Warlley [8]).

O AISI 4140, também conhecido como aço-cromo-molibdênio, é classificado como um aço de médio carbono, com uma variação de carbono entre 0,38% e 0,43%. Suas características incluem alta dureza, baixa soldabilidade, alta resistência a corrosão e alta temperabilidade. Após um tratamento térmico adequado, pode-se alcançar uma resistência à fadiga significativa. O material apresenta um limite de escoamento de 370 a 460 MPa e uma tensão máxima de tração 720 MPa. Para modificar suas propriedades, é possível submetê-lo a tratamentos térmicos. Além disso, suas propriedades permanecem estáveis até aproximadamente 480°C [12].

Corrêa e Schaeffer [13], realizaram um trabalho comparativo entre o AISI 4140 recozido e normalizado, onde obtiveram as imagens representadas na Figura 17, e constaram o material normalizado (B) apresentou um

menor crescimento de grão e maior dureza e o material recozido (A) apresentou um maior crescimento de grãos o que justificou a menor dureza obtida nos ensaios. [13]

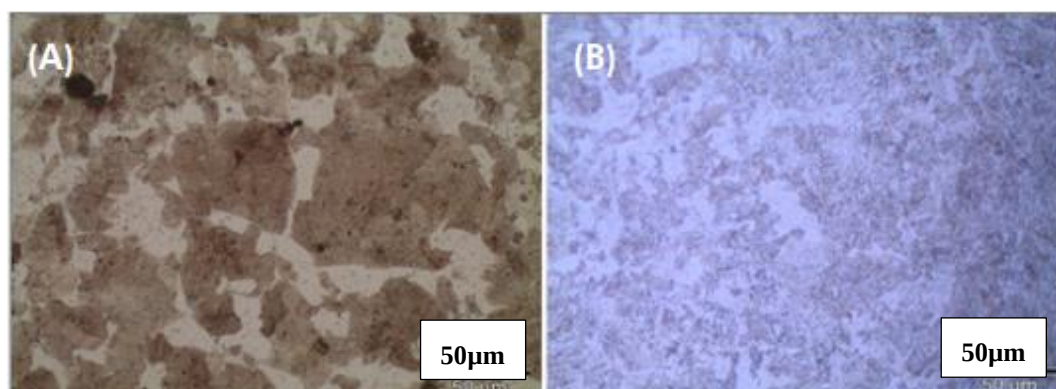


Figura 17- AISI 4140 (A) Recozido (B) normalizado (Fonte: Adaptado Côrrea e Schaeffer [12])

Santos e Soares [14] citam: “Os eletrodos para soldagem de aços de baixa liga são selecionados de acordo com a propriedade mecânica e não de acordo com a composição química, como ocorre nos aços carbono. O metal de adição deve possuir valores de limite de escoamento e limite de resistência iguais ou superiores ao do metal de base”.

“Embora não seja considerado o processo de soldagem mais eficiente, a solda com eletrodo revestido é comumente utilizada, devido seu baixo custo, simplicidade do equipamento e execução” [13]. Além das diversas possibilidades de combinações de revestimento. Como citado anteriormente, foi utilizado o eletrodo 48 E7018 de 3,25mm para preenchimento do eixo desgastado. Segundo a ESAB, o E7018 é um eletrodo recomendado para aços de baixo e médio teor de carbono, que deposita metal de alta qualidade e com baixo teor de hidrogênio, o que evita a fragilização por hidrogênio que é um dos problemas mais recorrentes relacionado a soldagem de aços de baixa liga, onde trincas aparecem ou terminam seu desenvolvimento até 48 horas após a soldagem [14].

Tabela 1- Propriedades mecânicas do AISI4140 e do eletrodo revestido E7018. (Fonte: [12] e [14])

	AISI4140	E7018
Limite de escoamento	370 a 460 Mpa	480 MPa
Resistência a tração	720 Mpa	560 Mpa

Para uma análise mais detalhada, uma amostra do material foi retirada com auxílio de uma serra fita de bancada, onde inicialmente foi retirada uma seção do eixo na parte que foi soldada, em seguida foi retirado $\frac{1}{4}$ da seção para realizar a análise como mostra a Figura 18. Devido ao tamanho adequado da peça, não foi necessário realizar o embutimento da amostra. Em seguida, avançou-se para a etapa subsequente, que envolveu o lixamento auxiliado por uma politriz. Posteriormente, ainda utilizando a politriz, a amostra foi submetida ao polimento utilizando um pano específico e aplicação de alumina, a amostra ficou conforme ilustrado na Figura 19, onde já era possível ver os passes de solda realizados.



Figura 18- Seção retirada da parte soldada do eixo.
(Fonte: Autoria Própria)



Figura 19- Amostra após o polimento.
(Fonte: Autoria Própria)

Procedeu-se então ao ataque químico com uma solução de Nital 2%, empregando o método de imersão da superfície da amostra na solução, conforme ilustrado na Figura 20. Após o ataque químico durante 7 segundos, a amostra foi lavada com água corrente e em seguida secada com auxílio de algodão, ficando pronta para análise no microscópio como mostra a Figura 21. O microscópio utilizado para análise foi do tipo óptico Olympus GX51, o mesmo permite uma ampliação de até 1000x.



Figura 20- Ataque químico a amostra em Nital 2%.
(Fonte: Autoria Própria)

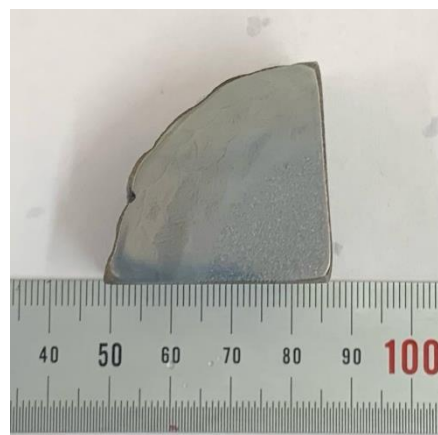


Figura 21- Amostra após ataque químico.
(Fonte: Autoria Própria)

4.RESULTADOS E DISCUSSÕES

Analizando a superfície da fratura, mesmo um pouco oxidada, é possível concluir que se trata caracteristicamente de uma fratura frágil, devido seu aspecto granuloso e brilhoso, conforme ilustrado anteriormente na Figura 14 e a seguir na Figura 21, como visto na revisão bibliográfica, a fratura frágil indica que o material sofreu pouca ou nenhuma deformação e possui um dureza elevada.

Analizando o aspecto visual da solda, é possível concluir que não houve um planejamento adequado para a solda realizada, os cordões de solda foram feitos de maneira irregular, variando as espessuras e sem alternar os lados da peça, o que favorece a chamada “distorção de solda” que é resultado da expansão e contração do metal de solda e metal base, durante o ciclo de aquecimento e resfriamento. A distorção de solda gera o que chamamos de “empenamento” da peça, que foi o processo que ocorreu no eixo aborçado e levou a fratura na tentativa de desempenamento [15].



Figura 22- Superfície da fratura
(Fonte: Autoria própria)



Figura 23- Região soldada-
(Fonte: Autoria própria)

Com a análise microscópica do metal base, é possível notar a presença de perlita retratada pelas partes escuras e ferrita pelas partes claras. Comparando a Figura 24 (B), obtida na análise do metal base do eixo, as imagens presentes na literatura de metalografias realizadas no aço 4140 realizada por [13] e ilustrada na Figura 24 (A), é possível notar que foi mantida a estrutura do AISI 4140 recozido, com um maior crescimento de grãos, proporcionando uma menor dureza.

A visualização da zona termicamente afetada e dos cordões de solda não ficaram favoráveis para tirar conclusões, possivelmente devido ao ataque e ao tipo de microscópio utilizado, por esse motivo não foram colocadas no presente trabalho.

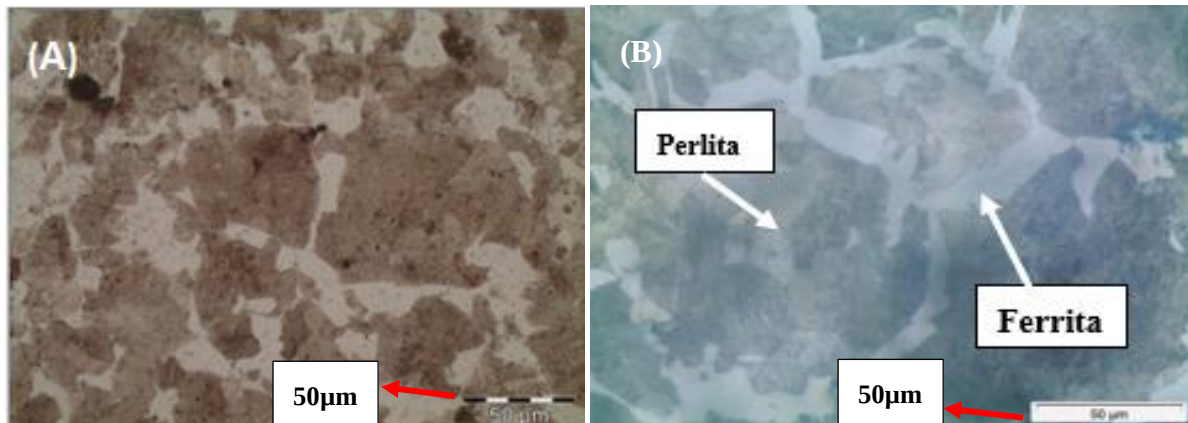


Figura 24- (A)Microscopia AISI 4140 obtida na literatura (B) Microscopia do metal base do eixo.

(Fonte: (A) CORRÊA, Fábio e SCHAEFFER, Lírío [13] e (B) Autoria própria.)

Considerando todos os fatos abordados, é possível sugerir melhorias para o próprio processo realizado, para obtenção de uma recuperação do eixo de forma confiável. Para evitar a distorção de solda citada anteriormente e consequentemente o empenamento do eixo, recomenda-se que os cordões de solda sejam realizados alternando a posição do eixo. O segundo conjunto de cordão de solda deve ser realizado a 180° do primeiro, o terceiro a 90° do segundo e o quarto a 180° do terceiro, após esse processo, segue o preenchimento dos espaços vazios sempre alternando os quadrantes e buscando manter a mesma quantidade de deposição de material. A Figura 25 mostra a ordem dos primeiros conjuntos de cordões e como deve ser feito o preenchimento alternado dos quadrantes na diagonal A-C e B-D [16].

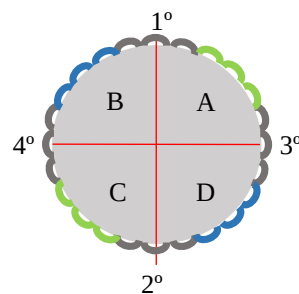


Figura 25- Representação frontal da ordem de preenchimento do eixo com cordões de solda.

Fonte: (Autoria própria).

Outro procedimento fundamental a ser realizado é o tratamento térmico de alívio de tensões pós soldagem, onde a peça é aquecida a uma temperatura inferior a temperatura crítica de transformação do material, depois de atingida essa temperatura, a peça é mantida aquecida durante um tempo determinado e em seguida é resfriada de forma uniforme e controlada, normalmente com auxílio de um forno para reduzir a temperatura gradativamente. Esse processo diminui a chance de formação de microestrutura frágil, como a martensita que confere ao aço alta dureza e baixa ductilidade [17].

Em busca de soluções mais viáveis, existem atualmente substâncias que garantem, realizar o reparo de maneira mais simples, barata e mantendo a mesma resistência, sendo ainda mais vantajoso por não precisar do processo de aquecimento e resfriamento do material. São as chamadas “Solda a frio” usando um revestimento epóxi, conforme mostra a Figura 26. O revestimento pode ser encontrado a partir de R\$ 200,00 reais 450g e o serviço de usinagem a ser realizado após a aplicação do revestimento custa cerca de R\$ 450,00 para o eixo estudado.

A Plasteel do grupo Quimatic Tapmatic é fabricante desse tipo de revestimento e diz “Por efetuarem solda a frio, os produtos da linha Plasteel são ainda uma alternativa mais prática, segura e econômica que a **solda convencional** e a metalização nos reparos industriais. O motivo é que a solda a frio não utiliza calor (ou seja, não oferece riscos de incêndio e explosão), não causa empenamento ou danos às propriedades na estrutura reparada.” [18]



Figura 26- Eixo desgastado x Eixo recuperado com a solda a frio Plasteel.

(Fonte: Quimatic Tapmatic[18])

Considerando que um eixo novo no site da marca Mission Magnum está custando \$899 dólares, cerca de R\$4555 reais, outra solução que se torna viável é a compra de uma barra cilíndrica de AISI 4140 com o maior diâmetro necessário pro eixo e contratar o serviço de usinagem para deixá-lo com as medidas necessárias, evitando os problemas que podem ser causados pelo processo de soldagem. O orçamento obtido para fabricação de um eixo novo foi de R\$ 950,00 [10 e 19].

Todas as medidas mitigadoras discutidas anteriormente exigem uma análise por parte da empresa para determinar o que é mais viável, levando em consideração os custos e o tempo disponíveis para a manutenção.

5. CONCLUSÃO

A análise de falha é essencial para que medidas sejam tomadas e a falha não se repita. No estudo de caso apresentado foi possível observar medidas que poderiam ter sido tomadas ou melhoradas, e resultariam no sucesso da operação, mas não foram feitas. Com isso, foi possível propor 3 medidas mitigadoras, sendo a primeira mantendo o processo que foi feito com as melhorias necessárias e e outras duas alternativas para serem analisadas de acordo com o que é viável para empresa:

- Para recuperação do eixo mantendo o processo de soldagem por eletrodo revestido:
 - Não é recomendável a realização de cordões de solda de maneira contínua no eixo, onde um cordão é depositado ao lado do outro sem interrupção, pois favorece o empenamento do eixo devido às variações de temperatura durante o aquecimento e resfriamento do material. A maneira correta consiste em realizar os cordões de solda de maneira intercalada, alternando entre lados do eixo, até o preenchimento completo.
 - Para o caso estudado, resfriar a peça ao ar, sem realizar o tratamento térmico de alívio de tensão, torna-o mais suscetível a falha. O processo correto seria, após a soldagem aquecer o material a uma temperatura abaixo da temperatura crítica de transformação, mantê-la um tempo nessa temperatura e em seguida realizar o resfriamento controlado, reduzindo a temperatura gradativamente.
- Realizar o reparo do eixo com resina epóxi Plasteel, solda a frio, e em seguida a usinagem do eixo para adapta-lo as medidas necessárias.
- Comprar uma barra cilíndrica de AISI 4140 e contratar o serviço de usinagem do eixo conforme as medidas solicitadas.

6. AGRADECIMENTOS

- Ao meu orientador Edson Nogueira, por todo apoio e incentivo prestado.
- Ao Técnico Antônio Fabrício, pela ajuda na utilização dos equipamentos para cortar e preparar á amostra para o lixamento.
- Ao proprietário da oficina (prefere não se identificar), por ter cedido a peça para estudo e ter prestado todas as informações necessárias para elaboração do trabalho.

- A Universidade Federal Rural do Semi-Árido e ao professor Manoel Quirino por proporcionar e conceder o acesso ao laboratório de Metalografia e Microscopia, para análise da amostra e melhor desenvolvimento do trabalho.

7.REFERÊNCIAS

- [1] LIMA, A.G.;et al. Fadiga em Componentes mecânicos: estudo para redução de perdas econômicas e de vidas. Simpósio de excelência em gestão e tecnologia.2018.
- [2] CALEGARO, Ana. Análise de falha de um eixo Virabrequim.Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora-MG,2018.
- [3] CALLISTER, Willian; RETHWISCH, David. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução. 9ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- [4] FORTES, Mariana. Conteúdo Digital para Ensino de Análise e Interpretação De Falhas Mecânicas. Fundação Oswaldo Aranha- Centro Universitário de Volta Redonda. Volta Redonda, 2013.
- [5] BARBOSA, Cassio. Análise Fractográfica de Falhas. Instituto Nacional de Tecnologia. São Paulo-SP, 2018.
- [6] American Society, f. M. (1987), *Metals Handbook. Vol. 12. Fractography*, ASM International.
- [7] SANTOS, Fernanda. Análise Crítica De Ensaio De Fluência Em Amostras Reduzidas Empregados Como Ferramenta De Avaliação De Vida Residual De Aços Utilizados Em Caldeiras Térmicas. COPPE, UFRJ. Rio de Janeiro,2019.
- [8] JESUS, Jailson. Falha por Fadiga em Componentes Mecânicos: um Estudo de Caso. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. Manaus-AM, 2022.
- [9] REIS, Warley. Análise de Falha de Eixo de Bomba Centrífuga. Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Itabira-MG, 2023.
- [10] Proprietário da oficina (prefere não se identificar). Informações do processo de soldagem realizado no eixo. Visita in loco em 27 de janeiro de 2024.
- [11] Mission Magnum I Pump. Toobe Pumps. Disponível em: [<https://www.tobeepump.com/oem-pump-service/mission-magnum-pumps.html>]. Acesso em: 28 de março de 2024
- [12] AÇO 4140 (SAE). Dustre. Disponível em: [<https://dustre.com.br/produtos-ligas-especiais/4140-2/>]. Acesso em: 29 de março de 2024.
- [13] CORRÊA, Fábio e SCHAEFFER, Lírio. Comparação das Propriedades Mecânicas do Aço AISI 4140 no Estado Recozido e Normalizado. UFRGS. Porto Alegre-RS.
- [14] SANTOS, Ellen e SOARES, Leandro. Validação da Qualificação de Procedimento de Soldagem para Recomposição de Metal Base SAE-4140 de Eixos Propulsores do Segmento Naval. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte- MG, 2018.
- [15] ESAB. Eletrodos Revestidos 48.04. Disponível em: [https://esab.com/br/sam_pt/products-solutions/filler-metalspdf/?filename=mdmproductfamily13192&siteid=sam_pt&countryname=BRA&countrylocale=pt-br]. Acesso em: 27 de março de 2024.
- [16] Aventa. Distorção na Soldagem, o que é e como evitar. Disponível em: [<https://aventa.com.br/novidades/o-que-e-distorcao-soldagem>]. Acesso em 04 de abril de 2024
- [17] Tratamento térmico de alívio de tensões na Soldagem. Disponível em: [https://esab.com/br/sam_pt/esab-university/articles/tratamento-termico-de-alivio-de-tensoes-na-soldagem/]. Acesso em: 04 de abril 2024
- [18] Quimatic Tapmatic. 5 vantagens da recuperação e proteção de eixos com uso de resinas Plasteel. Disponível em: [<https://www.quimatic.com.br/blog/2022/03/como-recuperar-eixos-com-economia-segurancaerapidez/#:~:text=A%20solda%20a%20frio%20com,conjunto%20perder%20suas%20propriedades%20mec%C3%A2nicas>]. Acesso em: 04 de abril de 2024
- [19] Shaft for Mission Magnum Centrifugals pumps. Sandman (A Tobee Brand). Disponível em: [<https://missionmagnum.com/product/20612-02-33-shaft-for-mission-magnum-centrifugal-pumps/>]. Acesso em 06 de abril.