

Tema: Produtos metálicos ferrosos

## ANÁLISE TÉCNICO-GERENCIAL DA PRODUÇÃO DE EIXOS MOTRIZES RECUPERADOS POR SOLDAGEM\*

*Heretiano Dalmacio Sampaio Junior<sup>1</sup>*

*Willy Ank de Moraes<sup>2</sup>*

### Resumo

Neste trabalho será apresentado o detalhamento das atividades necessárias à realização dos serviços de recuperação de eixos comuns de acionamento de grandes equipamentos mecânicos. Apesar do ideal ser o emprego de eixos sobressalentes para substituição do eixo fraturado, dando continuidade aos trabalhos sem interrupção dos serviços, as técnicas demonstradas neste trabalho mostram ser viável tecnicamente e economicamente a recuperação de eixos fraturados por soldagem.

**Palavras-chave:** Eixos; Soldagem; Manutenção

### ANALYSIS TECHNICAL AND MANAGERIAL OF THE PRODUCTION OF SHAFTS RECOVERED BY WELD

#### Abstract

In this work will be presented in detail the activities necessary to achieve the recovery of joint drive shafts of large mechanical equipment services. Despite being ideal employment axle parts for replacement of the fractured shaft, continuing to work without interruptions, the techniques demonstrated in this work show that it is technically and economically feasible recovering fractured axles by welding.

**Keywords:** Shaft; Welding; Maintenance.

<sup>1</sup> *Engenheiro Mecânico e Técnico em Metalurgia, Diretor Administrativo e Financeiro, Inspebras, Praia Grande, SP, Brasil; heretianojr@inspebras.com.br.*

<sup>2</sup> *Doutorando, Mestre em Eng.<sup>a</sup> de Materiais e Técnico em Metalurgia, Professor Adjunto da Unisantia, Vice Diretor da Divisão Técnica de Ensino da ABM, Consultor Técnico, Inspebras, Santos, SP, Brasil; willyank@unisanta.br; willyank@inspebras.com.br.*

\* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

A imediata substituição de um componente falhado nem sempre é possível, já que o setor de suprimentos pode não dispor de um sobressalente igual ou similar e que a disponibilidade comercial do mesmo não é imediata. O tempo necessário para o recebimento de um novo componente é fator relevante, podendo interferir negativamente no processo produtivo. Nestas circunstâncias não é raro que o setor produtivo incita a adoção de condições de operação adversas, com o emprego de componentes incorretos ou mesmo excluindo do processo o equipamento ou circuito onde ocorreu a falha [1].

Desta forma, torna-se considerável a importância da recuperação de componentes falhados, através de trabalhos desenvolvidos por equipes de manutenção [2]. Nestes casos, a preocupação maior está na definição do procedimento técnico para a correta recuperação deste componente, definido em função do tipo de falha ocorrida [3]. Assim sendo, para realizar uma recuperação adequada, torna-se necessário executar corretamente três etapas:

- 1 – preparação do eixo fraturado em função do diâmetro;
- 2 – escolha do processo de soldagem e do material de adição e;
- 3 – criação e execução de um procedimento de soldagem padrão.

No caso de eixos uma recuperação adequada é economicamente viável, na maioria das vezes. Para fazer uma reparação que ofereça confiança, devem-se eliminar as causas que provocaram a ruptura do eixo. Apesar dos casos envolvendo corrosão e desgaste, a falha dos eixos se dá mais comumente pela fadiga [1,3,4]. Assim, para recuperar a maioria dos eixos de aço, torna-se extremamente relevante a análise e compreensão das causas da fadiga:

- a) da origem e evolução da fadiga (iniciação, propagação e fratura final);
- b) da carga aplicada em relação ao limite de fadiga ( $\sigma_{Fad}$ ) do aço – considerando-se eixos sem trincas pré existentes.

### 1.1 Causas da Fadiga

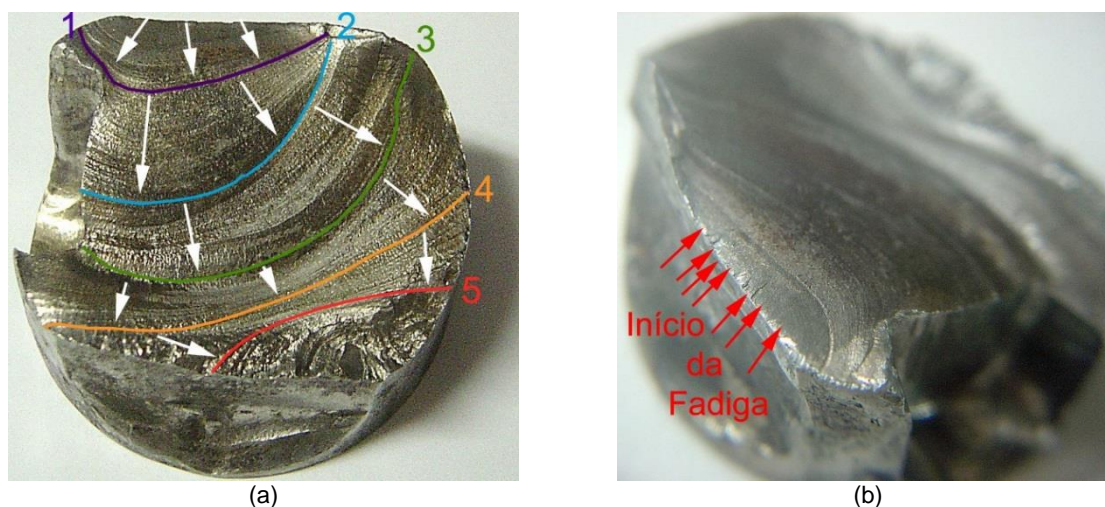
A avaliação das causas da ocorrência da fadiga requer uma análise da superfície de fratura, pois superfícies fraturadas por fadiga apresentam características morfológicas macroscópicas e microscópicas bem particulares que indicam sua origem, tipo de carregamento, intensidade de tensão e histórico de evolução [4]. A Figura 1 ilustra, como exemplo, uma superfície de fratura de um eixo, cuja fratura apresenta inúmeras características morfológicas que descrevem a sua vida em fadiga.

A ruptura por fadiga inicia-se através de microfissuras, geradas em superfícies internas (inclusões, trincas, vazios de solidificação, etc.) ou, principalmente, nas superfícies externas do componente, onde existam concentração de tensões. Concentradores de tensão promovem um aumento localizado da tensão aplicada sendo que a máxima tensão ( $\sigma_{m\acute{a}x.}$ ) que surge no concentrador de tensão pode ser relacionada à tensão aplicada externamente ( $\sigma_0$ ) por meio de medições experimentais de tensão (extensometria ou outros), por análises numéricas (elementos finitos), ou através de ábacos. De uma forma geral, empregam-se valores do fator de concentração de tensão ( $K_t$ ) para descrever a amplificação localizada da tensão pelo concentrador:

$$\sigma_{m\acute{a}x.} = K_t \cdot \sigma_0 \quad (1)$$

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Onde:  $\sigma_{\text{máx}}$ . representa a máxima tensão presente na região do concentrador de tensão;  $K_t$  é o fator de concentração de tensões e  $\sigma_0$  a tensão aplicada no componente (fora do concentrador de tensões).



**Figura 1.** Fratura em eixo de embarcação marítima ocasionada por fadiga mecânica: (a) superfície de fratura com “marcas de praia” (“*beach marks*”) indicando a direção de propagação da trinca (de 1 para 5); (b) região de origem da fadiga com inúmeras “marcas de catraca” (“*ratched marks*”).

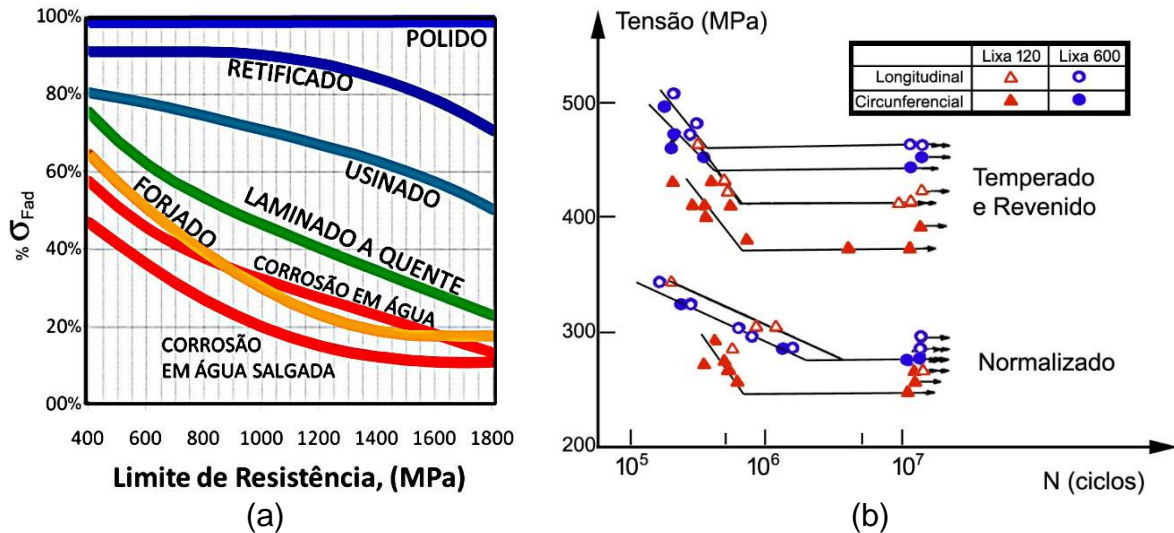
A concentração de tensão, quantificada pela equação 1, depende da variação geométrica do componente. No caso da falha por fadiga de eixos, duas condições tornam-se fundamentais neste contexto [4-6]:

- Estado superficial - A resistência à fadiga diminui quando a superfície está descarbonizada ou a superfície é muito rugosa devido a raias de usinagem, micro soldas produzidas por uma lubrificação insuficiente, corrosão, porosidade, etc. A Figura 2 ilustra este efeito sobre a fadiga dos aços [6,7].
- Mudança de seção - A resistência à fadiga diminui consideravelmente quando o eixo tem entalhes ou mudanças bruscas de seção ou diâmetro, especialmente se ficam ângulos vivos ou raios insuficientes para evitar uma concentração de tensões nesses pontos. A Figura 3 apresenta o efeito de concentradores de tensão sobre a vida em fadiga dos aços [8].

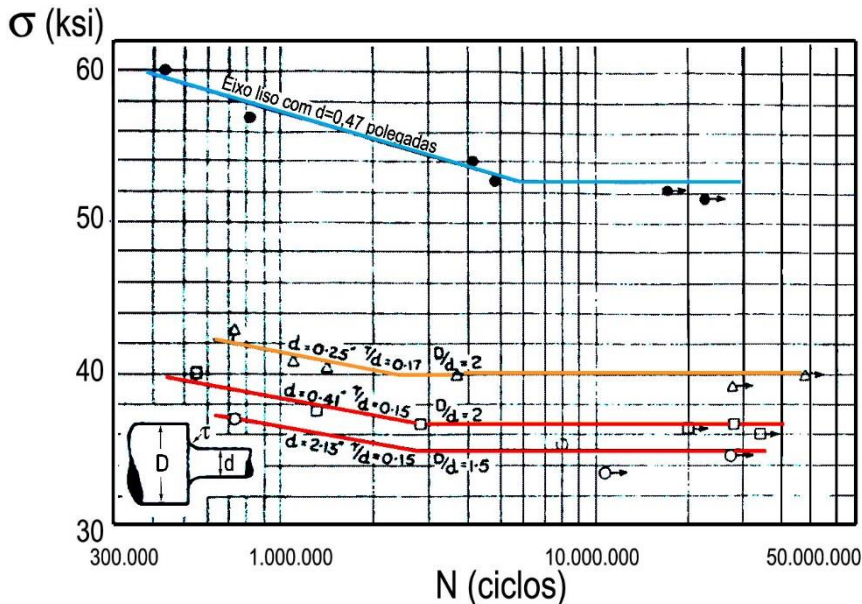
Desta forma, um bom acabamento superficial e a ausência de concentradores de tensão são condições fundamentais para uma recuperação eficiente de um eixo fraturado.

Os aços possuem um limite de vida em fadiga ( $\sigma_{\text{Fad}}$ ), abaixo do qual não ocorre falha por carregamentos mecânicos de fadiga [3-6]. Para estes materiais, os níveis de tensão aplicados não devem ultrapassar de  $\sigma_{\text{Fad}}$ . A avaliação da resistência à fadiga é feita através de ensaios mecânicos, tal como o de flexão rotativa [9]. No caso dos aços, o limite de fadiga dos aços de média resistência vale aproximadamente a metade do seu limite de resistência ( $\sigma_{\text{Fad}}/S_{\text{LR}} \approx 0,50$ ) [10].

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 2.** (a) Alteração do limite de fadiga com as condições superficiais em aços de variados valores de  $S_{LR}$ , adaptado de [6] e (b) efeito sobre as curvas de fadiga do tipo de acabamento e do tratamento térmico em aços SAE 1045, adaptado de [7].



**Figura 3.** Alteração no limite de vida em fadiga ( $\sigma_{Fad}$ ) de um eixo de aço carbono ( $\%C \approx 0,50\%$ ) de  $\sigma_{Fad} = 52,5 \text{ ksi}$  ( $\approx 362 \text{ MPa}$ ) para  $\sigma_{Fad} = 35 \text{ ksi}$  ( $\approx 241 \text{ MPa}$ ) em função da variação no seu diâmetro ( $D/d$ ) e no raio de acomplamento ( $\tau$ ). Adaptado de [7].

## 1.2 Recuperação por Soldagem

O emprego da soldagem não só torna possível a rápida recuperação de um eixo fraturado, evitando os problemas já descritos de tempo, custo e perda de produtividade, como também permite um aumento da resistência ao desgaste e à corrosão [11]. Para efetuar uma recuperação adequada deve-se eliminar a zona de ruptura anterior do eixo, através de usinagem cuidadosa. Uma camada de 12mm deve ser retirada e a superfície obtida não pode apresentar fissuras ou microtrincas, o que deve ser verificado por um método não destrutivo de execução simples e rápida, por exemplo, líquido penetrante.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Muitas vezes, a fratura dos eixos ocorre em algum dos seus extremos e, na maioria das vezes é difícil aproveitar a ponta quebrada para soldá-la novamente devido ao problema do alinhamento. Assim, torna-se necessário o emprego de outra peça de aço, que servirá como enxerto, que deve ser compatível com o restante do componente. Além de apresentar características mecânicas e estruturais similares ao metal do eixo, o seu diâmetro deve ser ligeiramente maior, para permitir que o mesmo seja corretamente ajustado por usinagem com o restante do eixo, na fase final da recuperação por soldagem.

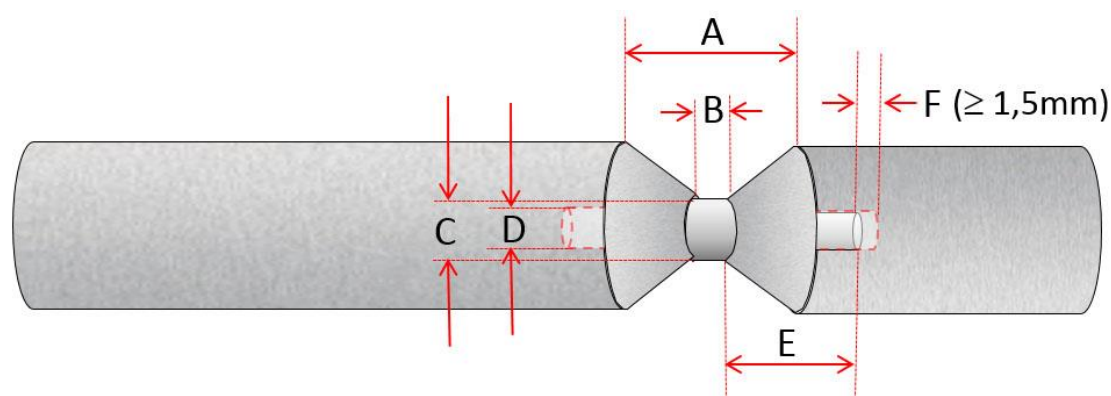
Caso o eixo tenha se partido em duas partes, a união deve ser feita através de um pino guia, conforme ilustrado na Figura 4. Este pino deve ser compatível com o aço do eixo e com o aço do enxerto, caso este último seja empregado. O eixo, pino guia e enxerto devem ser usinados de forma a minimizar a concentração de tensão durante a união por soldagem deste conjunto, conforme ilustrado na Figura 5 e nas dimensões descritas pelo Gráfico da Figura 6.



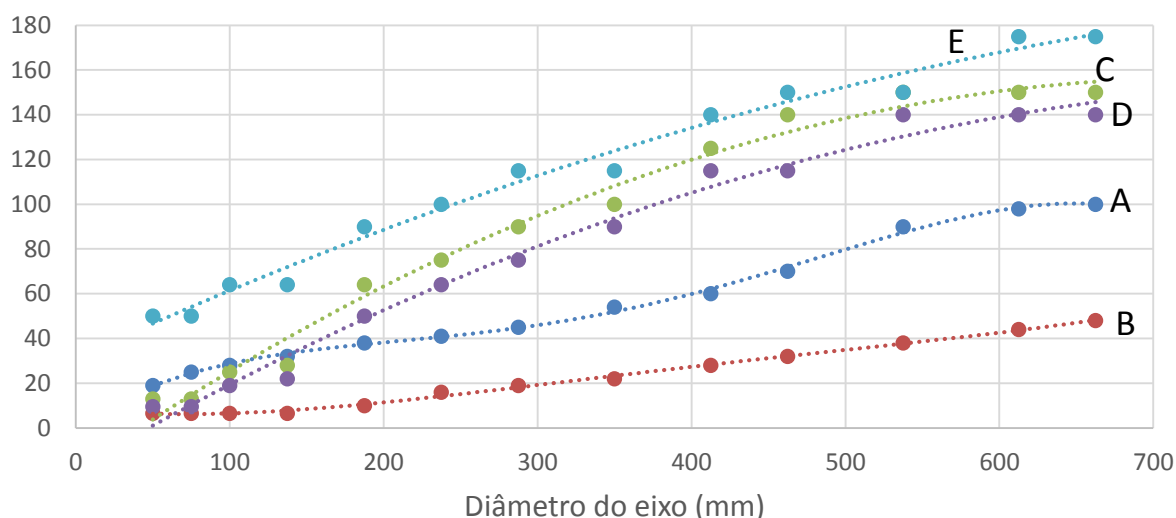
**Figura 4.** Ajustes necessários na recuperação de um eixo de aço.

Cada extremo do pino guia deve ter uma folga com o fundo do furo de, no mínimo, 1,5mm (dimensão F na Figura 5), para evitar que a dilatação do pino, durante a operação de soldagem, crie tensões internas na junta. Da mesma forma o pino deve ter um raio de curvatura de, no mínimo, 2,5mm na mudança de seção. As tolerâncias que devem ficar entre o pino e os furos do eixo e do enxerto, devem ser do tipo H6 e H7 respectivamente, de acordo com as tolerâncias ISO 286-2 (aplicável para eixos e orifícios cilíndricos) e que correspondem a um ajuste suave.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 5.** Dimensões padronizadas para reparação de eixo fraturado [2,3,11].



**Figura 6.** Valores das dimensões referenciadas na Figura 5 para minimizar as concentrações de tensão e promover uma boa união soldada no reparo de um eixo fraturado [2,3,11].

A escolha do processo de soldagem e do material de adição deve ser realizada com base: (1) no diâmetro do eixo fraturado; (2) do metal de base utilizado e (3) com o processo de soldagem escolhido. Estas definições podem ser auxiliadas através de diversas metodologias, das quais se destaca o diagrama de Schaeffler, que é o principal instrumento para avaliação do depósito de solda de aços inoxidáveis ou ligas Fe-Cr, Fe-Ni, Fe-Cr-Ni [12]. Ele permite conhecer com antecedência a composição química da estrutura de uma solda e também escolher os eletrodos apropriados para cada soldagem, mesmo heterogênea, de aço liga, aço carbono, aço inox ferrítico, austenítico, etc.

O diagrama de Schaeffler pode indicar, mediante a estrutura formada, num processo de soldagem, os prováveis defeitos como segregação de fase, trinca a quente e etc. Neste diagrama podemos observar a região de indicação de crescimento de grão, trinca a frio induzida por hidrogênio, precipitação de fase sigma entre 600 a 950°C e trinca de solidificação conforme representados na figura 3 [12].

## 2 ESTUDO DE CASO

Será considerado a recuperação de um eixo de aço SAE J403 1045, com diâmetro nominal de 1¼ polegada (44,45mm) como exemplo de aplicação das técnicas de

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

recuperação de eixos. Trata-se de um componente muito empregado para motores e sistemas de transmissão industriais. Neste trabalho considerou-se um possível cenário de falha por fadiga, que ocasionou a ruptura do eixo em questão. Posteriormente foram avaliados os procedimentos técnicos necessários à sua recuperação.

## 2.1 Causa da Falha

Os principais objetivos da realização de uma análise de falhas é prevenir a ocorrência de novas falhas e garantir a segurança, confiabilidade e uma manutenção exequível das máquinas. Desta forma, uma correta análise de falhas de um eixo falhado é de primordial importância para o sucesso da recuperação deste componente.

Uma análise de falhas é constituída de estudos referentes à estrutura do material, às propriedades desse material e sua adequação à aplicação, aos esforços ao qual esse material está sujeito, detalhes de fabricação, testes de qualidade, informações sobre o processo, tempo de utilização do equipamento, histórico de manutenções realizadas no equipamento, ensaios não destrutivos, ensaios destrutivos, testes e simulações, entre outros [4]. Estes estudos levam à formulação e verificação de hipóteses que iniciaram a falha como modo de falha que geram um laudo técnico referente às causas que levaram a ocorrência da falha e da melhor proposta de recuperação do problema.

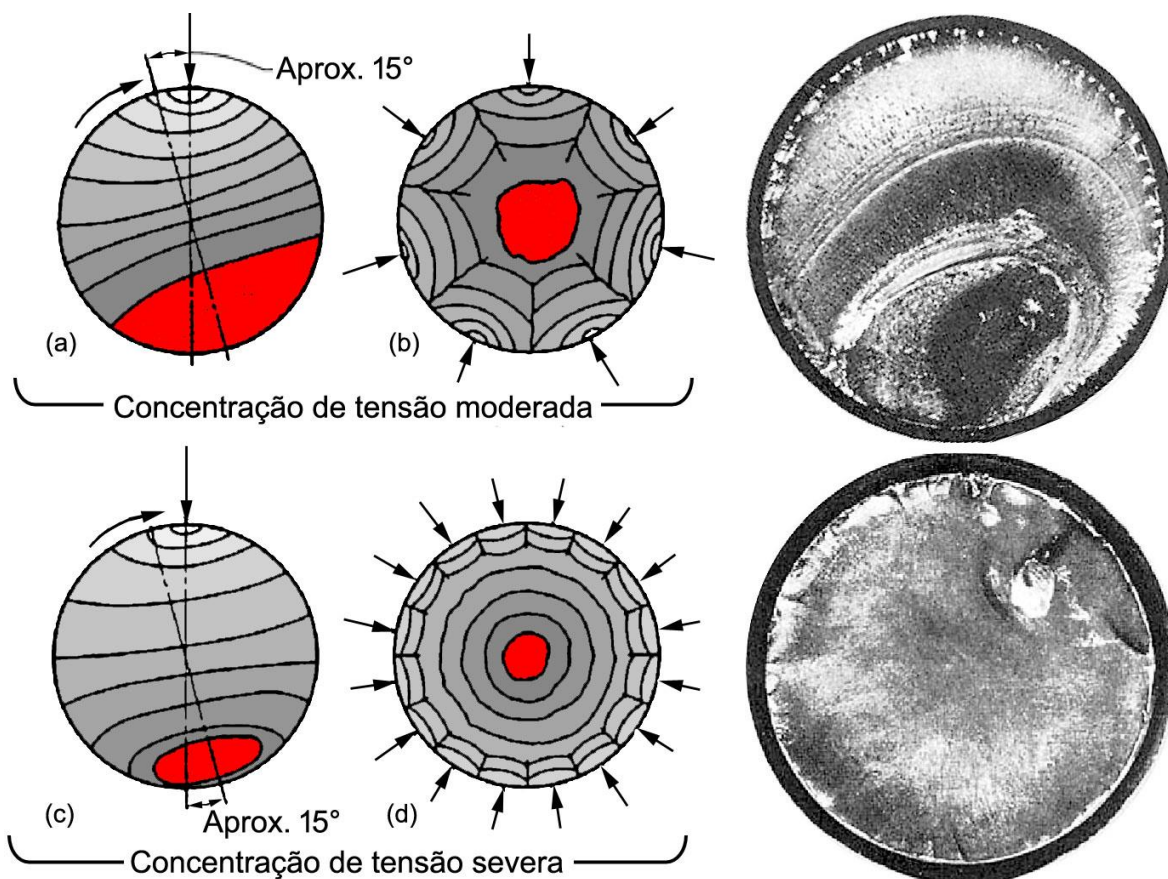
No caso em questão, a falha foi ocasionada por uma fratura por fadiga. Fadiga é o processo progressivo e localizado de falha de um material, sob carregamento cíclico [5]. A fratura por fadiga geralmente se inicia na região de maior concentração de tensão, onde ocorrem valores de  $K_t$  (Eq. 1) mais elevados. Para os eixos, as principais formas de concentração de tensão são: uma diminuição da seção transversal com uma variação relativamente abrupta (vide gráfico Figura 3), presença de rasgos de chaveta ou reentrâncias e saliências usinados ou formados ao longo da vida útil do eixo com acoplamentos deste componente com anéis e mancais em geral. A propagação das trincas formadas ocorre em função dos esforços aplicados no eixo durante trabalho. No final uma destas trincas atinge um tamanho crítico que induz a fratura final do eixo.

Uma vez caracterizada a falha por fadiga do eixo, torna-se necessário avaliar, pelo tipo de fratura presente (morfologia), onde a fadiga foi iniciada, qual o nível de tensão presente, a variação desta tensão e se houveram variações mais intensas (por exemplo de direção) ao longo da evolução do processo de fadiga [5]. A Figura 7 ilustra exemplos de como a morfologia da superfície de fratura pode ser associada ao tipo de carregamento mecânico que gerou a falha.

Na recuperação do eixo devem-se evitar as mesmas condições mecânicas de concentração de tensão que levou à falha inicial do eixo. Na elaboração ou escolha do procedimento de soldagem para a recuperação do eixo deve-se considerar a análise das causas de ruptura e preparação das partes a unir de forma minimizando concentrações de tensão empregando dimensões suaves (Figuras 5 e 6).

---

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 7.** Características de eixos fraturados por fadiga: à esquerda, esquemas de configuração da propagação das trincas até a fratura final (vermelho); à direita, superfícies de fratura de eixos sem (acima) e com (abaixo) componente de flexão rotativa intenso [3].

Outras circunstâncias podem estar presentes atuando para promover a falha [1, 4]. Uma análise de falhas mais geral, verificando o funcionamento do sistema e dos equipamentos acessórios, torna-se essencial para se evitar a recorrência da falha, perda de tempo e recursos na recuperação do componente. Neste sentido, um dos métodos mais difundidos de análise de falha é o “Diagrama causa e efeito”, também conhecido como “Espinha de peixe”.

## 2.2 Processo de Soldagem

A recuperação do eixo deve empregar material equivalente ao material do próprio eixo para garantir a resistência requerida. Para isso são necessitadas informações de especificação, tais como: tipo de aço (composição química e comportamento mecânico), tratamentos indicados e as características resultantes necessárias.

No estudo de caso em particular, o aço considerado (SAE J403 1045), constitui-se de um aço para construção mecânica com teor de carbono médio de 0,45% e um teor de Mn máximo de 0,90%. Analisando o diagrama de transformação isotérmica deste aço (diagrama TTT-*Time Temperature Transformation*), nota-se que o SAE 1045 é um aço de temperabilidade crítica. Neste caso, este aço apresenta grande capacidade em se transformar, de austenita para martensita, em uma certa profundidade e em condições de resfriamento rápido, tal como ocorre na soldagem.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.





Outra informação importante para análise neste estudo do caso é com relação ao tratamento termoquímico de cementação e tratamentos térmicos de têmpera e revenimento que podem estar citados nas especificações do projeto. O tratamento termoquímico de cementação promove o endurecimento superficial pela modificação da composição química e microestrutura em regiões superficiais através da difusão de carbono para a superfície do componente mantendo o núcleo dúctil e tenaz. Pode-se tornar necessário o polimento da parte externa do eixo antes e após o tratamento térmico, com a finalidade de facilitar e promover a cementação de forma igual em todas as partes do componente. Trata-se de uma dificuldade do projeto com relação à geometria da peça.

Para empregar o diagrama de Schaeffler, primeiramente deve-se calcular o valor percentual do cromo equivalente e logo após deve-se calcular o valor percentual de níquel equivalente do material. Para executar este cálculo, existem diversas equações disponíveis na literatura [12], conforme apresentadas a seguir:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb \quad (2)$$

$$Cr_{eq} = Cr + 1,21 \cdot Mo + 0,48 \cdot Si + 0,14 \cdot Nb + 2,27 \cdot V + 0,72 \cdot W + 2,20 \cdot Ti + 0,21 \cdot Ta + 2,48 \cdot Al \quad (3)$$

$$Cr_{eq} = Cr + 1,37 \cdot Mo + 1,5 \cdot Si + 2 \cdot Nb + 3 \cdot Ti \quad (4)$$

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 0,70 \cdot Nb \quad (5)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 0,5 \cdot Mn + 30 \cdot C \quad (6)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 0,5 \cdot Mn + 30 \cdot C + 30 \cdot N \quad (7)$$

$$Ni_{eq} = Ni + (0,11 \cdot Mn - 0,0086 \cdot Mn^2) + 24,5 \cdot C + 14,2 \cdot N + 0,41 \cdot Co + 0,44 \cdot Cu \quad (8)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 0,31 \cdot Mn + 22 \cdot C + 14,2 \cdot N + Cu \quad (9)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 35 \cdot C + 20 \cdot N + 0,25 \cdot Cu \quad (10)$$

Após a determinação dos valores de cromo e níquel equivalente, para o caso em particular do aço SAE J403 1045, deve-se repetir o procedimento para o consumível selecionado. Com base no código ASME II-Part C [13], aplicável ao caso, o eletrodo mais indicado a esta aplicação é o eletrodo AWS E 312-16, devido as suas altas propriedades mecânicas e estabilidade de sua estrutura metalúrgica. Este é um tipo de eletrodo que pode fornecer metal depositado sobre os mais diversos tipos de metais de base, como se pode comprovar mediante o diagrama de Schaeffler.

O aço SAE J403 1045 é empregado para construção mecânica e apresenta a seguinte composição química típica [4]: 0,45%C; 0,75%Mn; 0,02%P; 0,015%S; 0,20%Si;  $(Ni+Cr + Mo) \leq 0,05\%$  (típico). O limite de resistência à tração do SAE 1045 está entre de 630 e 780 MPa.

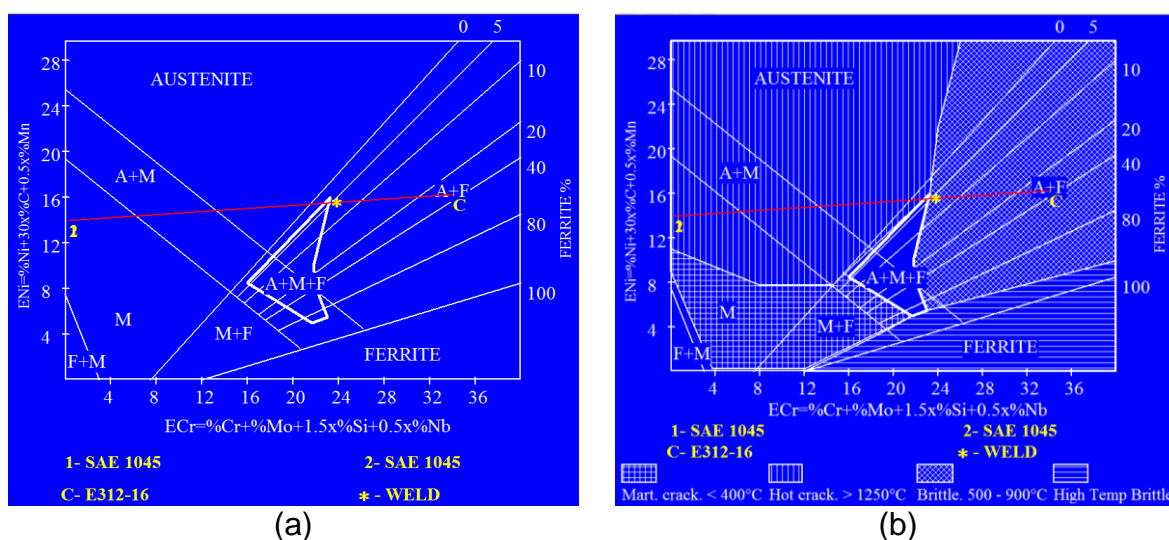
O consumível de soldagem AWS E 312-16 é empregado na soldagem de engrenagens, eixos, caixas de mancais, almofada em aços ferramenta e para sacar parafusos. Apresenta a seguinte composição química típica: 0,15%C; 2,50%Mn; 0,04%P; 0,015%S; 0,90%Si; 10,5%Ni; 32%Cr; 0,75% Mo (típico). Limite de resistência à tração é mínimo de 660 MPa [13]. Este consumível, solda em corrente contínua de polaridade inversa (CC+) ou em corrente alternada (CA), em todas as posições de soldagem, os elementos de liga são provenientes da alma do eletrodo. O revestimento é do tipo rutilico ( $TiO_2$ ) com adições de silicato de potássio ( $Na_2SiO_3$ ).

Para conferir credibilidade à escolha feita, foi empregado o software “*Schaeffler Diagram*” da ESAB [14]. Este software permite analisar o diagrama de Schaeffler e suas variáveis, como diluição, propriedades conferidas ao metal de solda, perigos existentes em função das diferentes regiões do diagrama e outros. A Figura 8.a

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

demonstra composição da estrutura obtida conforme o diagrama de Schaeffler, cuidado em relação à temperatura, percentual de metal de base e metal de solda e composição do metal de solda resultante.

A Figura 8.b apresenta os riscos provenientes da estrutura obtida através da diluição entre a composição química do metal de base e do metal de solda. Analisando a referida figura a diluição resultante pode apresentar precipitação de fase sigma entre 500 a 900°C, portanto não pode manter a essa temperatura durante muito tempo, caso contrário o cromo do consumível AWS E312-16 de alto teor de cromo irá se atrair junto ao carbono do metal de base SAE 1045, que é fase sigma, definida como a precipitação de carbonetos de cromo da ordem de  $M_6Cr_{23}$  que ocorre preferencialmente nos contornos de grão.



**Figura 8.** (a) Diagrama de Schaeffler - SAE 1045 / Consumível AWS E 312-16. (b) Diluição entre metal de base SAE 1045 e consumível de soldagem E312-16 [14].

Como base no diagrama de Schaeffler (Figura 8.a) pode-se verificar que o metal de base SAE 1045 apresentará estrutura 100% martensítica. Por isso, um pré aquecimento deve ser estabelecido 300 e 400°C e durante a soldagem [13], deve-se procurar manter a temperatura dada no pré-aquecimento. Para isso torna-se necessário um controle (acompanhamento) de temperatura contínuo empregando-se, por exemplo, um lápis térmico ou, preferencialmente, termopares com registro gráfico da temperatura de trabalho.

Para melhorar o desempenho do processo de recuperação por solda, adota-se a posição de soldagem mais favorável: 1G (horizontal plana). Para isso, o conjunto eixo-enxerto-guia (Figura 5) deve girar em relação ao seu eixo longitudinal em uma velocidade contínua e controlada, regulando a rotação do eixo durante o depósito de solda e controlando o posicionador de acordo com o processo de soldagem. Após a soldagem não devem ficar poros, inclusão de escória, fissuras na cratera ao final do cordão, *overlap*, etc. Qualquer defeito deste tipo deve ser eliminado imediatamente antes de continuar a soldagem. Devem-se estabelecer todos os parâmetros de acordo com o processo e com o eletrodo ou arame a utilizar: amperagem, voltagem, velocidade de avanço, abertura do arco, temperatura de interpasse, etc.

O consumível AWS E312-16 apresenta em soldagem direta uma estrutura aproximadamente 60% austenita + 40% ferrita, conforme descrito pelo diagrama de Shaeffler. Com um processo de soldagem adequado, obedecendo as temperaturas

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



recomendadas de pré aquecimento e de interpasse, cria-se uma estrutura estável na união destes materiais.

O resfriamento deve ser lento, sendo que a forma mais prática para tal é envolvendo a união soldada com material isolante (por exemplo, fibra de vidro). A inspeção por líquido penetrante é necessária para verificação da existência de alguma microfissura. Logo após, deve-se proceder a uma usinagem do eixo, deixando-o de acordo com as medidas originais determinadas pelo projeto.

### 3 ACOMPANHAMENTO

A melhor forma é pela manutenção preditiva, cuja principal recomendação é a realização de análise de vibração, a determinação de sua periodicidade requer experiência para definir e depende de fatores como tipo de equipamento que este eixo está acionando, da quantidade de horas de operação deste equipamento, e das condições históricas deste equipamento. Existe também a análise de vibrações online, porém devem ser analisados os recursos disponíveis para este investimento. Neste caso específico a recomendação de periodicidade de análise de vibração é de 90 dias.

Outra forma de manutenção preditiva indicada a este caso é o ensaio visual com sugestão de periodicidade de 15 dias. É válido destacar que para as duas técnicas preditivas aplicadas existe uma forte dependência do histórico do equipamento. Para a manutenção preventiva pode-se definir uma rotina de inspeção para reduzir os níveis de falhas em emergência e melhorar a disponibilidade do equipamento.

Considerando que a descontinuidades surgem da superfície para o centro, a recomendação é a inspeção por ensaios não destrutivos por líquido penetrante para detecção de descontinuidade superficiais não visíveis a olho nú e partículas magnéticas para detecção de descontinuidades superficiais e sub-superficiais até 4mm de profundidade com periodicidade de 1 ano.

### 4 CONCLUSÕES

É importante ressaltar que para realização de qualquer serviço de manutenção, é necessário conhecimento e experiência, pois praticar a manutenção de máquinas e equipamentos industriais não é simples. O ideal sempre seria obter eixos sobressalentes nas oficinas de manutenção para substituição do eixo fraturado dando continuidade aos trabalhos sem grande interrupção dos serviços. Porém as recomendações aqui colocadas reduzem o potencial impacto por uma operação de recuperação por equipes de manutenção.

Todo problema deve ser analisado com a maior quantidade de informações confiáveis possível como no trabalho em questão: avaliação das propriedades dos materiais, processos mais eficientes na recuperação do eixo, análise de diagramas, estudo do metal de base, estudo da seleção do consumível, análise do diagrama de Schaeffler, parâmetros técnicos adequados a serem empregados na soldagem, entre outros.

Pode-se considerar que, trabalhos como estes, são de grande importância para os profissionais que atuam na área de manutenção, para adquirir conhecimento de como implementar um programa de manutenção para solucionar problemas e garantir a funcionalidade de equipamentos mecânicos presentes na área industrial.

---

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

## REFERÊNCIAS

- 1 Sachs NW. Pratical plant failure analysis - A guide to understanding machinery deterioration and improving equipment reliability. Boca Raton: CRC - Taylor & Francis; 2007.
- 2 Bento EA, Sarni MIJ. Melhoria do processo de soldagem da recuperação de eixos de moenda. *Ciência & Tecnologia*. 2011;3(1):70-82.
- 3 Wulpi DJ. Failures of Shafts. In: Becker WT, Shipley RJ. Failure Analysis and Prevention. Materials Park: ASM International; 2002;11:2302-2344.
- 4 Godefroid LB, Cândido LC, Moraes WA. Análise de Falhas (Curso). São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM); 2008.
- 5 Moraes WA, Sampaio JHD. Fadiga nos aços estruturais. *Revista do Aço*. 2014;1(10):20-31.
- 6 Branco CM. Fadiga de estruturas soldadas. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian; 1986.
- 7 Nisitani H, Imai R. Comparison of fatigue process in 0.45%C steel specimens polished under different conditions. *Bulletin of the JSME*. 1985;28(245):2503-10.
- 8 Boyer HE. Atlas of Fatigue Curves. Materials Park: ASM International; 1986.
- 9 Estevinho AL, Oliveira AD, Santos GR, Junior HDS; Veloso TP. Construção de máquina de fadiga [Monografia de conclusão de curso de engenharia industrial mecânica]. Santos: Unisanta; 2010.
- 10 Meggiolaro MA, Castro JTP. Avaliação estatística das estimativas de propriedades mecânicas no projeto à fadiga. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 57º Congresso da ABM; 22 a 25 de Julho; São Paulo, Brasil. São Paulo: ABM; 2002. p.1019-1028.
- 11 James MN, Bigham K. Fatigue strength of shafts reclaimed by welding. *R&D Journal*. 1994;10(1):7-11.
- 12 Brooks JA, Lippold JC. Selection of wrought austenitic stainless steels. In: Olson DL, Siewert TA, Liu S, Edwards GR. Welding, Brazing and Soldering (ASM Handbook Vol. 6). Materials Park: ASM International; 1998. 1170-1204.
- 13 American Society Mechanical Engineers. ASME SECTION II – PART C – SFA-5.4: Specification for stainless steel electrodes for shielded metal arc welding. New York: ASTM, 2010.
- 14 Schaeffler/DeLong/WRC-92 Analysis. ESAB (Elektriska Svetsnings-Aktiebolaget); 2014 [acesso em 26 ago. 2012]. Disponível em: <http://costcalculator.esab.com/Schaeffler/>

---

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.