

Análise Metalúrgica de Falhas

Annelise Zeemann, Guilherme Zeemann
TECMETAL Soluções Tecnológicas em Materiais Ltda
Rio de Janeiro, Brasil

RESUMO

A análise metalúrgica de falhas é uma ferramenta poderosa em qualquer análise de risco ou gestão de integridade de unidades, equipamentos ou estruturas; pois ao sofrer uma falha o material sofre danos cuja morfologia revela os mecanismos que o levaram a falhar, ou seja a análise metalúrgica permite expor o tipo de solicitação que foi imposta ao material e excedeu sua capacidade. É comum acreditar que a maioria das falhas ocorre por falta de resistência mecânica, ou porque a tensão imposta é elevada ou porque o material tem baixa resistência; e neste sentido é dedicada uma atenção especial à análise de tensões; mas é importante entender que nem sempre as falhas são de natureza puramente mecânica e que podem existir condições locais que levem à falha mesmo com baixos níveis de tensão média. E não raro é identificar na análise metalúrgica condições totalmente inesperadas que levaram à falha, associadas à fabricação ou à operação, muito fora das premissas adotadas pelos projetistas, e que dificilmente seriam consideradas em uma análise preliminar de causa raiz, como por exemplo ter sido aplicado um tratamento térmico não compatível com a aplicação, ou existir um defeito não detectado na solda ou ainda ter ocorrido uma estagnação de fluidos por causa de uma parada não programada; indicando que a análise metalúrgica deve ser realizada antes de serem consideradas as hipóteses de causa raiz, pois ela descarta muitas possibilidades ou, ao contrário, pode ser suficiente para apontar a causa raiz. Este trabalho apresenta as metodologias adotadas na análise metalúrgica para identificar mecanismos de falha que podem esclarecer quais as solicitações que foram determinantes para a falha ter ocorrido, evidenciando o que são resultados objetivos de ensaios e análises, e como estes resultados requerem uma interpretação com base em informações fornecidas pelo usuário e estudo na literatura. São ainda apresentadas as limitações da análise metalúrgica em definir a causa raiz, esta última exigindo investigações conduzidas de forma multidisciplinar por diferentes atores, como usuários, projetistas, fabricantes e especialistas no tratamento de falhas.

Palavras-chave: Análise metalúrgica de falhas, mecanismos de falha, análise microestrutural, falhas instantâneas, falhas progressivas, solicitações impostas

INTRODUÇÃO

O objetivo de uma análise de risco é antecipar possíveis problemas para evitá-los. Quando ocorre uma falha, de consequência maior ou menor, isto significa que a análise de risco não foi eficiente, mas não significa que o problema chegou ao final. Não analisar a causa de uma falha é o maior risco que se pode correr pois como a falha não foi evitada obviamente não foi possível prevê-la e, portanto, a probabilidade de voltar a ocorrer é muito grande caso nenhuma medida seja tomada.

Existem muitas técnicas para identificar as causas da ocorrência de uma falha, chamada de **causa raiz** (root cause) justamente porque a falha pode mostrar apenas sintomas do problema, óbvios, que afloraram ("acima" da superfície), mas a raiz do problema pode estar escondida ("abaixo" da superfície) e para ser evidenciada é necessária uma avaliação mais profunda.

A causa raiz é identificada através de uma análise global da falha (root cause analysis – RCA), desdobrando todos os tipos de eventos e causas imediatas, em geral acompanhada de ações e recomendações para prevenir futuras falhas. Esta análise de causa raiz exige um grupo multidisciplinar para avaliar o problema, em geral reunindo pessoal que conhece o projeto, pessoal que entende como o componente, estrutura ou equipamento foi fabricado, e pessoal que entende detalhes da operação, além de profissionais que conhecem as técnicas de análise de causa raiz.

A análise metalúrgica, objeto deste artigo, contribui para a RCA evidenciando de que forma o material reagiu às condições impostas e identificando o tipo de solicitação que excedeu a capacidade do material, relacionada à temperatura e/ou ao meio ambiente e/ou aos esforços. A análise metalúrgica conta com análises de composição química e microestrutura, além de ensaios mecânicos [1] e em alguns casos ensaios de corrosão. Uma análise metalúrgica sozinha não define a causa raiz, mas ela é uma ferramenta poderosa em definir o mecanismo de falha, que por sua vez é fundamental para o estudo da causa raiz.

CARACTERÍSTICAS DE FALHAS

Do ponto de vista operacional uma falha em um equipamento, uma tubulação, uma estrutura ou qualquer tipo de componente, é um não atendimento a um requisito de utilização, que nem sempre ocorre de forma drástica, como uma ruptura. Pode ser um vazamento em uma válvula, um desgaste em um eixo, um pite em uma tubulação, uma trinca em uma estrutura, entre outras formas, mas o principal é que uma falha deixa marcas no material que podem revelar o que aconteceu. Estas marcas são os chamados “danos” (damage) e uma falha pode acontecer em um único momento (falha instantânea) ou pode acumular danos (falha progressiva) até que o material perca a capacidade de resistir à solicitação imposta.

As solicitações impostas ao material durante sua vida podem estar associadas às **tensões** - estáticas, dinâmicas ou cíclicas; às **temperaturas** - desde muito baixas até muito altas; e/ou ao **meio ambiente** - que pode ser mais ou menos corrosivo, promover algum tipo de desgaste ou algum tipo de fragilização. A resposta do material, resistindo ou não resistindo (falhando), depende de suas características metalúrgicas. Isto mostra que a correta seleção e especificação do material para um dado projeto depende fundamentalmente de terem sido corretamente analisadas as premissas de uso, e uma falha do material acontece quando ele não tem a necessária resistência (mecânica, ao meio ou à temperatura) para a solicitação imposta.

A figura 1 apresenta um esquema que identifica as etapas da “vida” de um material em um componente, dando também uma ideia de tempo. Para qualquer tipo de equipamento, estrutura, tubulação entre outros, existe 1) o **projeto**, que inclui a configuração do componente (desenho), a especificação do material e o plano de qualidade (que define o nível de integridade requerido à aplicação; 2) a **fabricação**, que inclui a aquisição da matéria-prima e todos os processos fabris associados, sendo que em construções de engenharia é necessário registrar estas informações em um “databook”; 3) os **testes** ou comissionamento, que ocorrem no momento da entrega do componente ao usuário, e incluem submeter o material ao máximo de sua capacidade nominal (algumas vezes acima, como em testes hidrostáticos); e 4) a **operação**, durante toda a vida útil projetada.

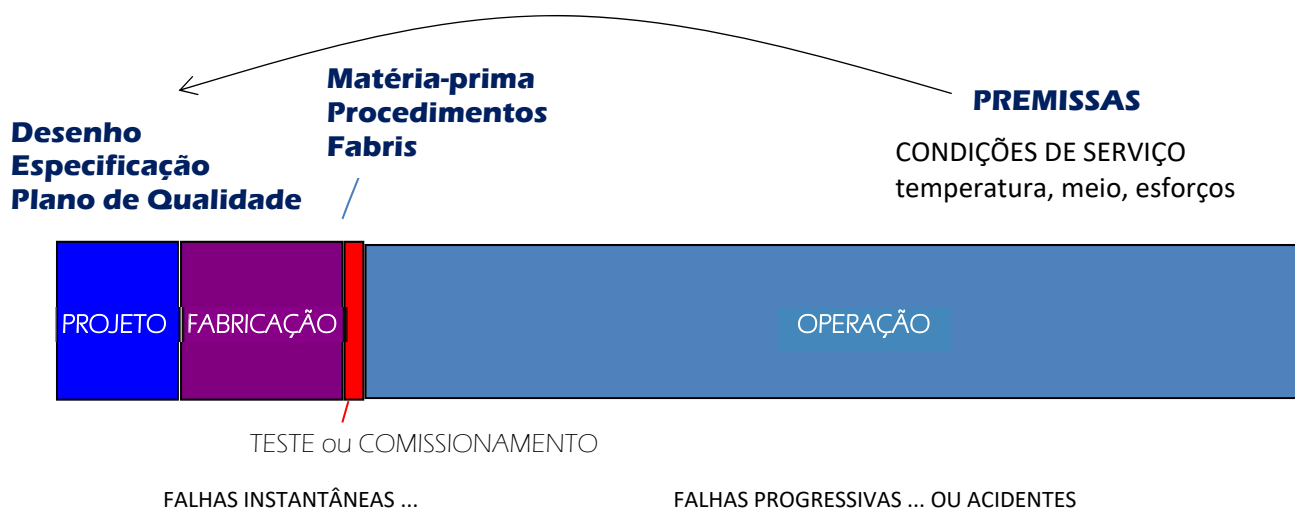


Figura 1 – Esquema que identifica as etapas da vida de um componente em engenharia (projeto, fabricação, teste e operação), mostrando que as premissas de projeto estão relacionadas aos requisitos de operação e que as falhas instantâneas tendem a ocorrer no início da vida e as progressivas após algum tempo de operação.

As **falhas instantâneas** ocorrem no momento em que o material excede sua capacidade por ter sido submetido a uma condição extrema, em geral associada a uma carga (muito alta ou de impacto) ou a uma temperatura específica (muito baixa ou muito alta). Este tipo de falha é mais comum durante a fabricação, durante os testes ou no início de operação, mas também pode acontecer após algum tempo em operação, em geral associada a uma não conformidade operacional (como um superaquecimento) ou a um acidente.

As **falhas progressivas** são detectadas quando o acúmulo de danos chega a um nível que impede o material de cumprir sua função, em geral após algum tempo de operação em meio ambiente corrosivo; ou que promova desgaste, ou que fragilize o material (hidrogênio por exemplo); ou ainda associado a um tipo de carregamento flutuante (que promova uma propagação subcrítica de trincas).

Conhecer o histórico de um componente, identificando o momento da falha e as condições registradas naquele momento, é importantíssimo na definição dos mecanismos de falha. E é importante separar o que é o **mecanismo de falha** do que é a **causa da falha**. Na análise metalúrgica é possível identificar o mecanismo de falha através da caracterização dos danos presentes no material [1], pois cada tipo de dano revela uma incapacidade do material de resistir a um tipo de solicitação, como será apresentado no próximo tópico. Para entender qual as causas da falha, ainda sob o ponto de vista metalúrgico, não bastam análises laboratoriais no material que falhou. É importante entender e avaliar o projeto, a construção e o uso do material em operação.

Basicamente um material falha por uma das seguintes causas, resumidas na figura 2:

- O **projeto** é inadequado, e isto inclui a má seleção e especificação do material para a aplicação.
- A **fabricação** foi inadequada, ou porque foi utilizada matéria-prima que não atende à especificação, ou porque foram utilizados processos fabris que não são adequados ao material, principalmente processos especiais que modificam as características metalúrgicas, como a soldagem, ou porque foram introduzidos defeitos não detectáveis no controle de qualidade.
- A **operação** ocorreu em condições não previstas em projeto, e isto inclui acidentes.

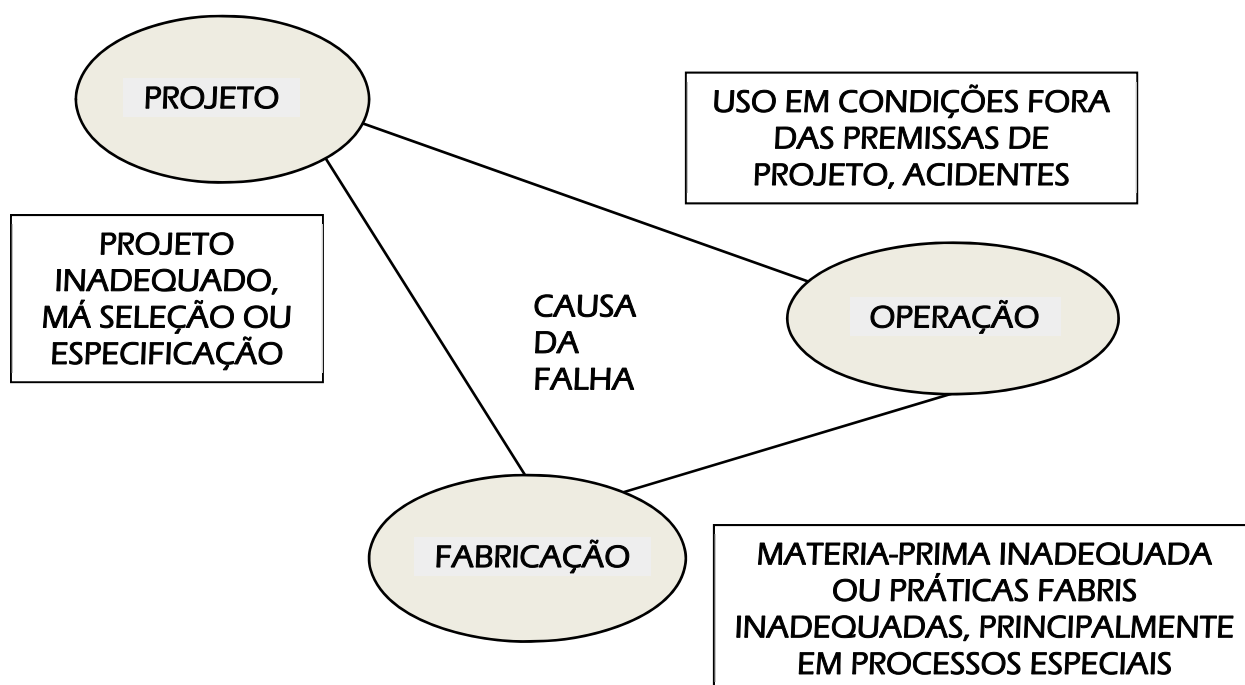


Figura 2 – Causas de ocorrência de uma falha, do ponto de vista metalúrgico.

ANÁLISE METALÚRGICA DE FALHA

A maior contribuição da análise metalúrgica da falha para a definição da causa raiz consiste, portanto, em identificar os MECANISMOS DE FALHA atuantes. Para isso a análise laboratorial é separada em duas fases. A **caracterização do material**, sempre necessária e que evidencia o que é o material, e a **caracterização dos danos**, que evidencia de que forma o material falhou.

A caracterização do material é normalmente realizada com base em análises químicas e microestruturais, que mostram qual o tipo de liga adotada e sua condição de fornecimento, tratamento térmico, além de como foi fabricada, entre outras informações. São realizados também ensaios mecânicos de tração, Charpy V, dureza, para definir as propriedades do material, sempre dependendo se a condição de uso exigiria a propriedade. O objetivo desta caracterização é responder se o material é o que deveria ser para atender aos requisitos do projeto. As informações sobre o material são objetivas e baseadas em resultados de ensaios padronizados.

A caracterização dos danos é normalmente realizada através de análises macroscópicas, fractográficas (quando existe fratura) e análises microestruturais, por microscopia ótica (MO) ou por microscopia eletrônica de varredura (MEV), nas regiões de danos buscando entender de que forma falhou e qual foi a propriedade exigida, que o material não tinha. Se o material corroeu, desgastou, sobrecarregou, trincou frágil, formou vazios, propagou um defeito de forma subcrítica, entre outras características tipicamente verificadas em falhas, é possível identificar qual o mecanismo de falha e associar a falta da propriedade a uma solicitação imposta.

Solicitações mecânicas exigem propriedades mecânicas. Uma tensão elevada exige que o material tenha alta resistência mecânica (em especial alta tensão limite de escoamento), esforços dinâmicos exigem tenacidade, esforços cíclicos exigem resistência à fadiga.

Temperaturas muito baixas exigem materiais com tenacidade.

Temperaturas muito elevadas exigem materiais resistentes ao calor.

Ambientes corrosivos exigem materiais protegidos, seja pela metalurgia ou por proteções aplicadas (revestimentos ou proteção catódica).

Condições de contato, com fluidos, partículas ou metais exigem materiais resistentes ao desgaste, principalmente quando existe movimento relativo.

Ambientes que geram hidrogênio exigem materiais resistentes à fragilização pelo hidrogênio.

Assim, ao identificar os tipos de danos e associá-los à falta da propriedade, é possível saber qual a solicitação foi imposta que o material não resistiu. E ao identificar estas características é possível avaliar se a causa foi um problema relacionado à etapa de projeto, à etapa de fabricação ou à etapa de operação.

A figura 3 apresenta um resumo dos mecanismos de falha e a quais solicitações estão associados.

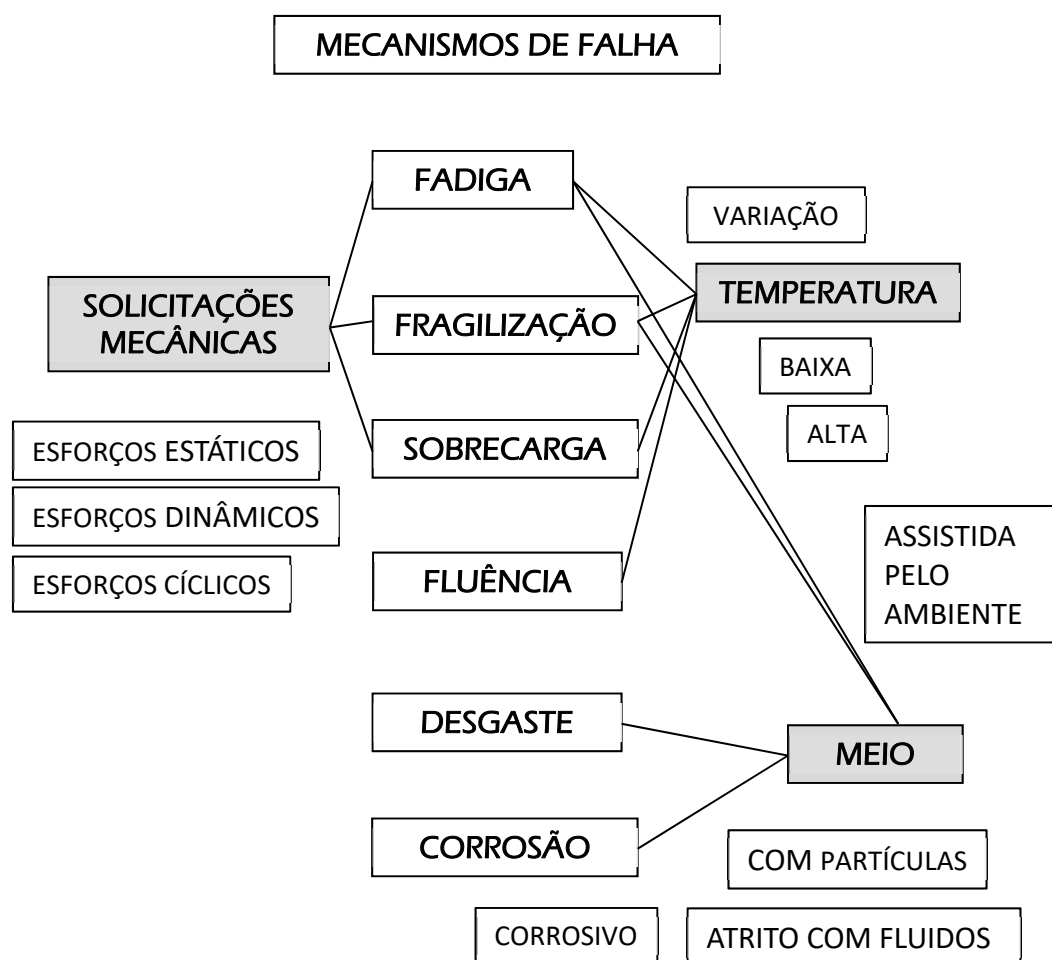


Figura 3 – Mecanismos de falha, associados às solicitações.

É muito importante separar danos que ocorreram antes da falha, danos que ocorreram durante a falha e danos que ocorreram depois da falha, para não tirar conclusões erradas. Por isso é tão importante preservar os materiais que falharam, evitando limpeza abrasiva ou cortes a quente, e realizar a análise o mais breve possível depois de ter falhado para evitar corrosão ou oxidação posteriores, que mascaram os resultados.

Alguns exemplos de caracterização dos danos, macroscópicos e microscópicos, estão apresentados nas figuras 4 a 7 e resumidos na tabela 1. Apesar dos mecanismos de falha estarem bem evidentes na caracterização dos danos (estrias de fadiga, trincas ramificadas típicas de corrosão sob tensão ou trincas intergranulares típicas de fragilização), a definição do mecanismo também depende do histórico de uso e dados de projeto, pois não dá para dizer que sofreu fadiga induzida por vibração se não tiver sido detectada vibração, assim como não dá para trincar por corrosão-sob-tensão se não existir ambiente que promova esta condição, nem para fragilizar se não tiverem condições propícias pelo ambiente (hidrogênio por exemplo) ou pela microestrutura (martensítica endurecida na solda, tanto para o trincamento a frio como para o reaquecimento).

É interessante observar que estes casos mostram falhas que aconteceram para níveis de tensão muito baixos (inferiores aos previstos em projeto) e uma das evidências mais interessantes está na figura 6, que mostra uma região de um tubulão de vapor que sofreu reparo e criou trincas a frio na solda, mas a propagação através da espessura de 60 mm somente ocorreu onde as trincas estavam abaixo da chapa defletora, expostas a meios alcalinos onde houve concentração de produtos do tratamento de água. Trincas que estavam acima da chapa se mostraram apenas superficiais e não propagaram, apesar de estarem na mesma posição da parede, obviamente submetidas ao mesmo nível de tensão macroscópica.

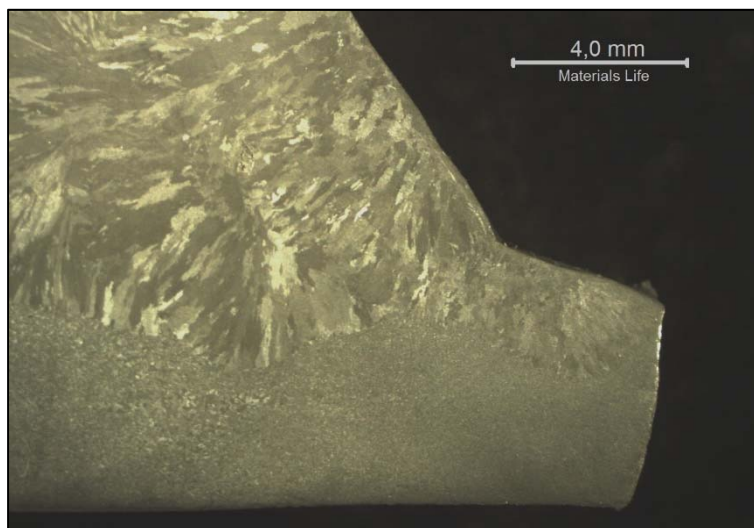
Tabela 1 – Casos [2-5] apresentados, com os danos, mecanismos de falha e causa provável.

Figura	Componente	Material	Danos macroscópicos	Danos microscópicos	Mecanismo de falha	Causa provável
4	Tubulação	Aço Inox AISI 304	Ruptura na margem da solda	Estrias de fadiga	Fadiga induzida por vibração	Operação fora das premissas de projeto
5	Parafuso	Aço Cr-Mo com elevada dureza	Ruptura na cabeça e trincas nos filetes	Trincas secundárias longitudinais, intergranulares	Fragilização pelo hidrogênio	Especificação de material inadequada
6	Tubulão de vapor	Aço C-Mn	Trincas na parede do tubulão	Trincas ramificadas e trincas intergranulares	Trincas a frio no reparo Corrosão sob tensão	Reparo inadequado e operação fora das premissas de projeto
7	Conector submarino	Superduplex	Trincas vazantes longitudinais	Trincas ramificadas	Corrosão sob tensão induzida por micro-organismos	Operação fora das premissas de projeto
8	Coletor de alta pressão	Aço C-Mo	Trincas restritas ao metal de solda	Trincas intergranulares	Trincas de Reaquecimento	Fabricação inadequada (tratamento térmico pós-soldagem)

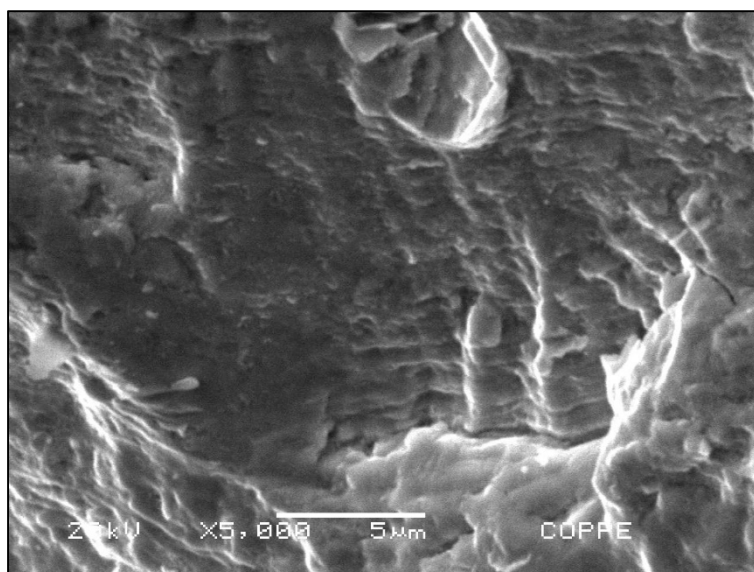
Como se pode verificar pelos exemplos, as informações sobre os danos dependem de onde foi realizada a análise e apesar destes resultados também serem bem objetivos, exigem experiência para identificar as posições de análise e de saber interpretar as características microestruturais do material.



A - Ramificação em tubulação, rompida na margem da solda.



B - Macrografia de uma seção perpendicular à solda, mostrando a fratura à direita. Ataque eletrolítico com ácido oxálico. MO.

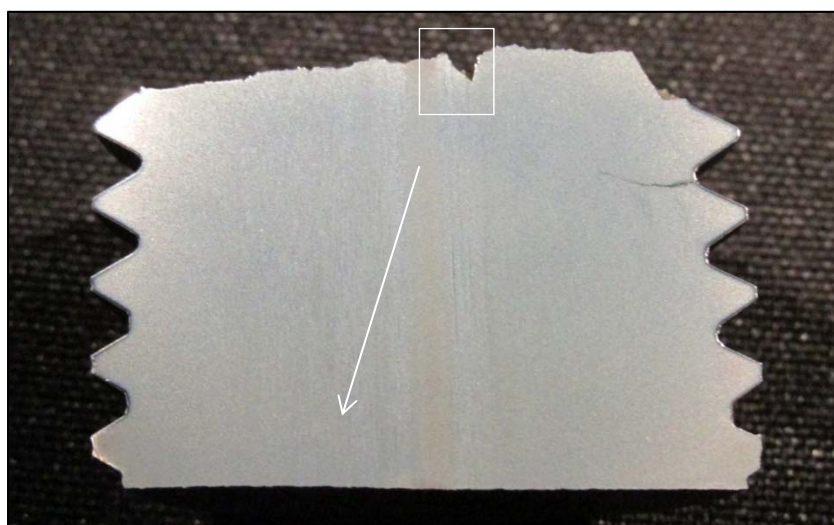


C – Estrias de fadiga na fratura. MEV.

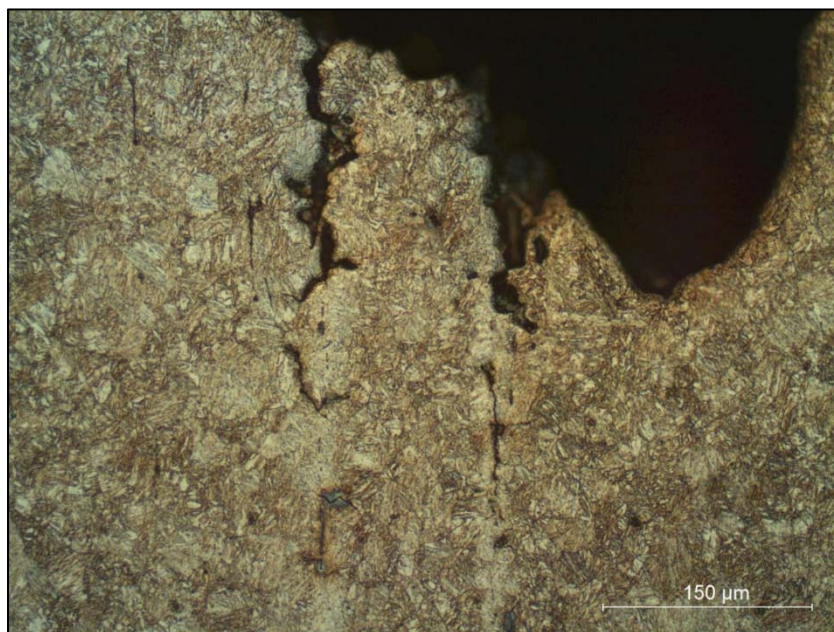
Figura 4 – Falha de uma ramificação em tubulação de aço inoxidável austenítico, induzida por vibração. [2]



A – Parafuso de alta resistência rompido em operação. Dois lados da fratura (cabeça à direita).

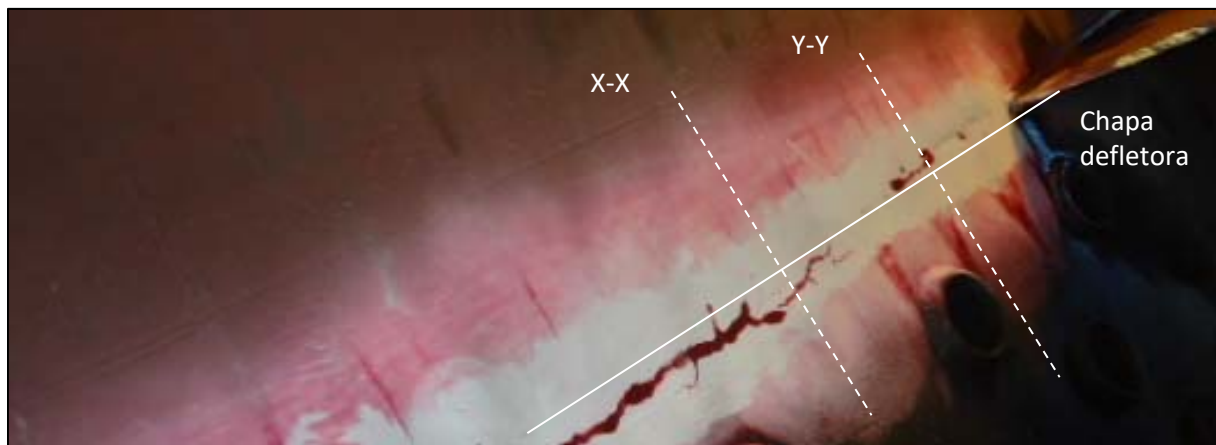


B – Macrografia de uma seção longitudinal. Fratura com trinca secundária, marcada. Macro. Nital.



C – Micrografia em detalhe, mostrando trincas secundárias longitudinais, intergranulares. Nital. MO.

Figura 5 – Falha de um parafuso submarino.



A - Trinca evidenciada por LP na parede do tubulão de vapor. Em X-X a trinca está abaixo de onde estava a chapa defletora (onde o produto do tratamento de água fica concentrado) e em Y-Y a trinca está acima.



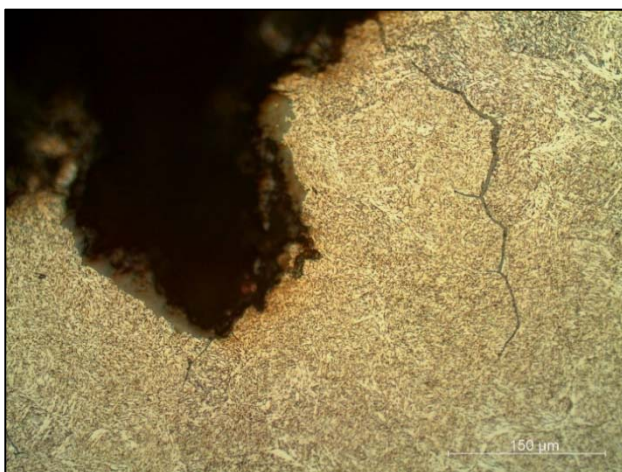
B - Macro. Nital.

Corte X-X mostrando trinca passante na espessura.

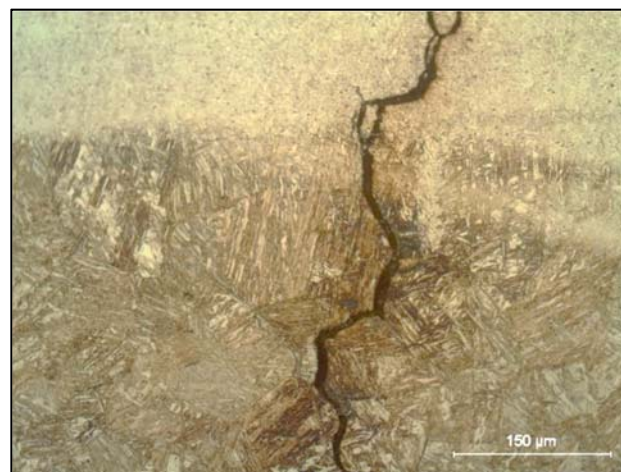


C - Macro. Nital.

Corte Y-Y mostrando trinca apenas na superfície.



D - Micrografia na superfície de B. corrosão sob tensão. E - Micrografia na superfície de C. trinca a frio [3]

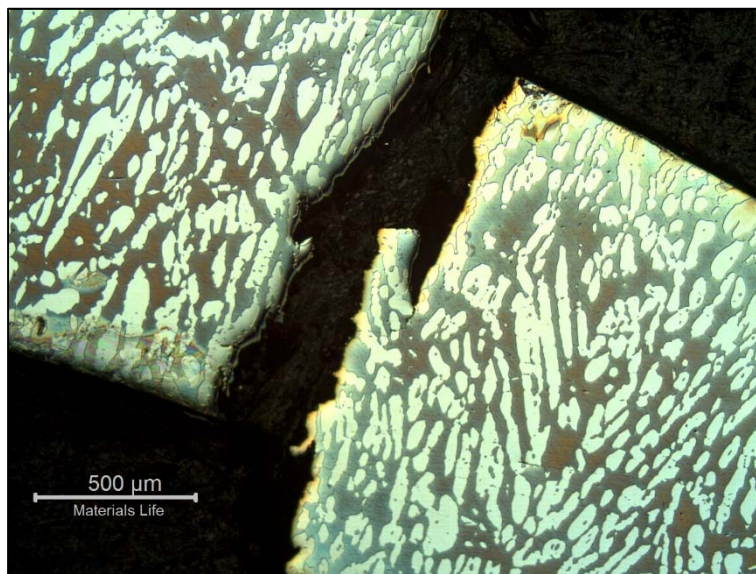


Nital. MO.

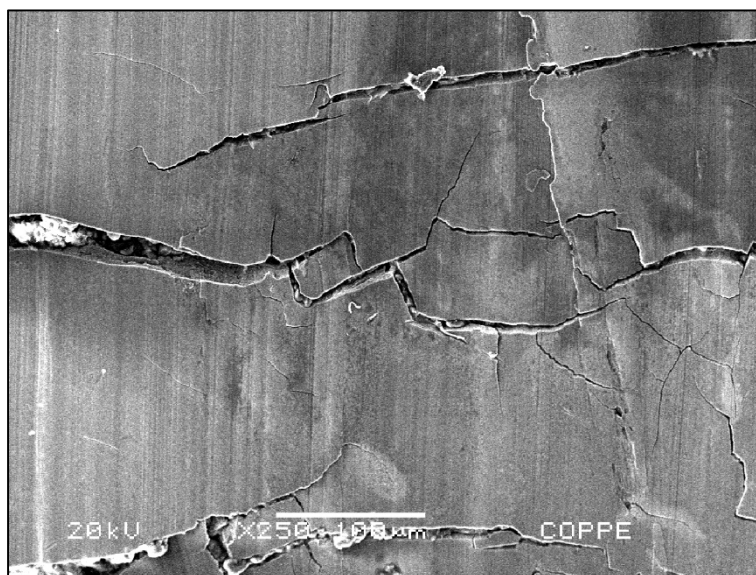
Figura 6 – Trincamento de um tubulão de vapor.



A – Superfície externa do conector submarino com trinca longitudinal, iniciada no interno.



B – Seção transversal mostrando trinca através da espessura. Ataque eletrolítico NaOH. MO.

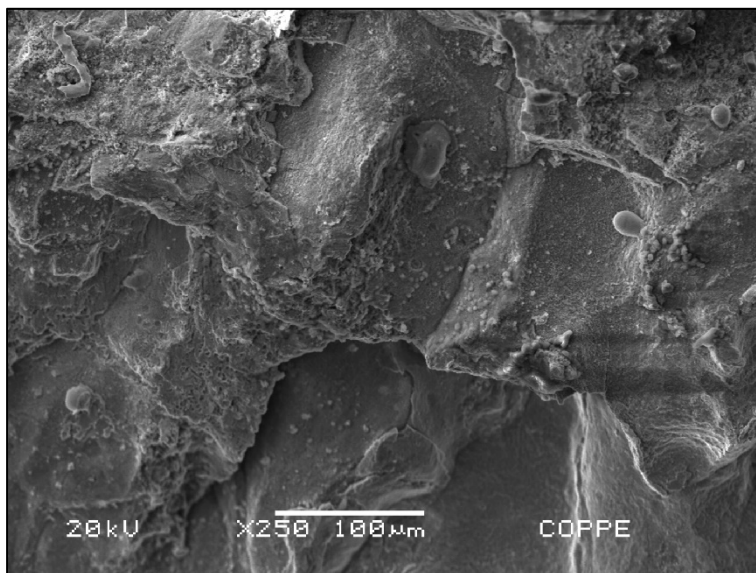


C – Superfície interna do conector mostrando corrosão sob tensão a partir do interno. MEV.

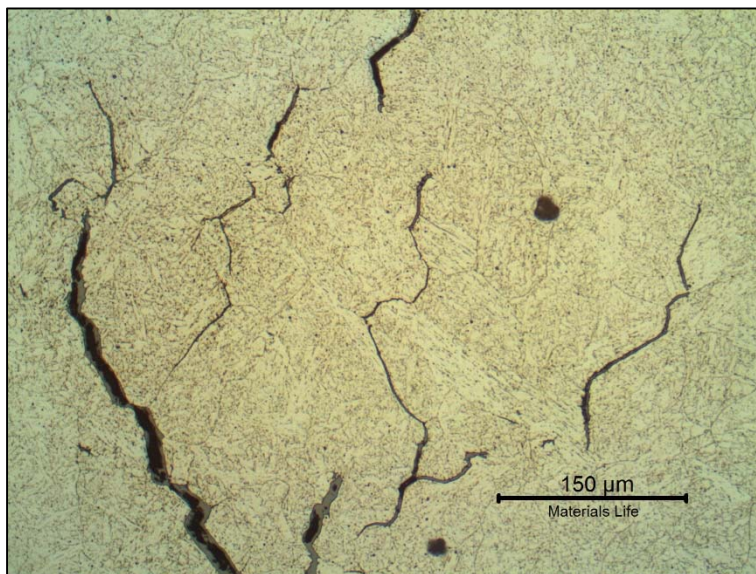
Figura 7 – Corrosão Microbiológica em conector submarino de aço inox Superduplex. [4]



A – trinca restrita à solda do coletor de alta pressão.



B – fratura intergranular de trecho retirado do superaquecedor. MEV.



C – trinca típica de reaquecimento de solda em material com tratamento pós soldagem inefetivo. Nital. MO.

Figura 8 – Trinca de reaquecimento em coletor de alta pressão de caldeira. [5]

COMENTÁRIOS FINAIS

A análise metalúrgica de uma falha permite determinar os mecanismos de falha, se forem retiradas amostras das regiões certas e estas forem corretamente preservadas. O material sempre “revela” o que sofreu, mas a interpretação destes mecanismos e a definição das causas da falha exigem muito mais do que ensaios e caracterizações metalúrgicas. Exigem conhecimento do projeto, muitas vezes avaliação do nível de tensões, exigem conhecer os métodos de fabricação utilizados, além de uma boa compreensão sobre a operação.

O estudo de falhas similares na literatura é fundamental para apoiar as análises, e neste trabalho foram utilizados diversos casos apresentados no banco de imagens do site www.materials.life.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASM HANDBOOK, “Failure Analysis and Prevention”; Volume 11; ASM INTERNATIONAL 1986.
- [2] Materials Life Database, “Vibration Induced Fatigue in 304SS”; www.materials.life ; ML00006 (Apr2017).
- [3] Materials Life Database, “Cold Cracks in CMn Steel Pressure Vessel ”; www.materials.life ; ML00008 (Apr2017).
- [4] Materials Life Database, “MIC of s Subsea Hydraulic Line”; www.materials.life ; ML00094 (Sep2017).
- [5] Materials Life Database, “Weld Metal Reheating Cracking of a CrMo Vessel”; www.materials.life ; ML00071 (Jun 2017).