

A ANÁLISE DE FALHAS COMO FERRAMENTA DE CONVERGÊNCIA DOS CONHECIMENTOS METALÚRGICOS: REVISÃO E EXEMPLOS DE CASOS¹

Willy Ank de Moraes ²
Leonardo Barbosa Godefroid ³
Luiz Cláudio Cândido ³

Resumo

Uma análise de falha torna-se necessário para identificar uma ocorrência de desempenho em um componente metálico de um mecanismo ou de uma estrutura. Durante esta análise o modo de falha deve ser determinado para que medidas corretivas apropriadas possam ser tomadas para tentar prevenir a recorrência futura desta falha. Entretanto existe uma infinita variedade de combinações de componentes, metais, tratamentos térmicos, aplicações e ambientes que influenciam a causa da falha. Ademais, existe uma série de testes disponíveis que podem ser realizados durante uma análise de falhas. A interpretação correta dos resultados irá oferecer um cenário real para a compreensão da falha e das medidas para evitá-la. O presente trabalho apresenta algumas considerações a respeito desta tarefa desafiadora, listando alguns exemplos de quando e quais testes foram preponderantes para descobrir as causas raiz para a falha.

Palavras-chave: Análise de falhas; MEV; Fratura; Fadiga.

¹ Contribuição técnica para o 60^o Congresso Anual da ABM - Seminário: Desenvolvimento, adequação e aplicação de produtos, Belo Horizonte, 25 a 28 de Julho de 2005.

² MSc., Eng^o, Téc., Diretor da Divisão Técnica de Ciência e Engenharia de Materiais Metálicos da ABM, Analista de Produto/Desenvolvimento de novo produto, Assistência Técnica, COSIPA; Prof. Departamento Eng^a Mecânica UNISANTA (willyank@unisanta.br), integrante do Grupo de Estudos sobre Fratura dos Materiais (GesFraM/DEMET/EM/UFOP)

³ DSc., MSc., Eng^o, Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (leonardo@em.ufop.br; candido@em.ufop.br), integrante do Grupo de Estudos sobre Fratura dos Materiais (GesFraM/DEMET/EM/UFOP).

1 INTRODUÇÃO

As principais razões para se conduzir uma análise de falha são a determinação e descrição dos fatores responsáveis para a falha do componente estrutural e/ou estrutura e, principalmente, quais são as ações a serem tomadas para evitar a ocorrência desta falha. Este estudo é motivado por diferentes interesses técnicos oriundos dos diversos grupos envolvidos. Uma análise de falha pode ser iniciada desde uma simples curiosidade profissional até como uma necessidade legal (forense) para a resolução de casos extremamente críticos e complexos de interesse público.

Uma análise de falha completa visa não só caracterizar a falha em si, mas, principalmente, permitir o estabelecimento de medidas para se evitar ou, ao menos, minimizar o seu ressurgimento. Seus resultados podem se tornar parte do conhecimento histórico técnico preexistente com grande potencial de influência sobre o processo e as operações de projeto e produção, conforme mostrado esquematicamente na Figura 1.

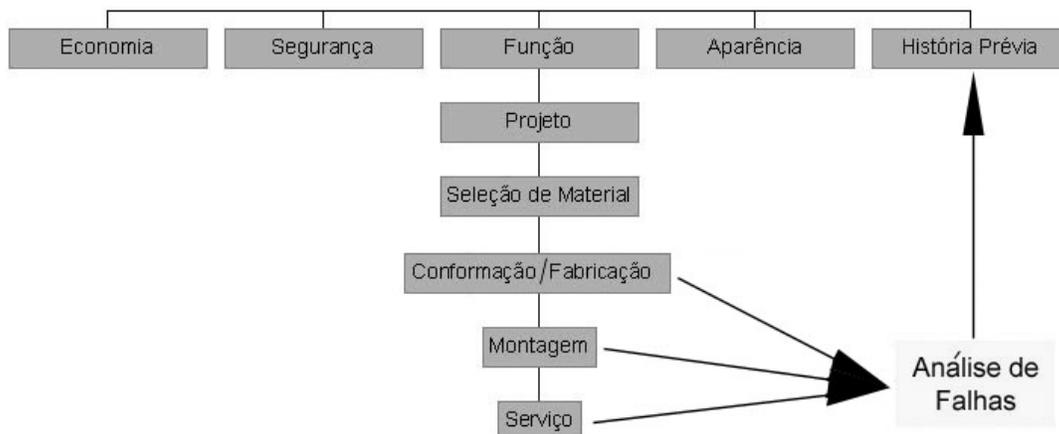


Figura 1: Interrelação entre análise de falha, projeto e produção de um componente, adaptado de [1].

As causas para a falha da maioria das estruturas/componentes geralmente estão relacionadas com as seguintes situações:

- negligência e/ou má conduta durante o projeto, a construção ou a operação da estrutura;
- aplicação de um novo projeto ou de um novo material, que vem a produzir um resultado inesperado e indesejável.

No primeiro caso, os procedimentos existentes são teoricamente suficientes para se evitar a falha. Porém, algumas vezes estes não são executados, devido a diversos fatores técnicos, humanos e econômicos. Fabricação mal conduzida, materiais inapropriados ou abaixo de especificações, e/ou erro de operação são exemplos nos quais tecnologias apropriadas, experiências e histórico estão disponíveis, mas não foram corretamente aplicados.

O segundo caso é mais desafiante, pois na criação de um novo projeto ou melhoria de um preexistente surgem novas situações ainda não totalmente conhecidas. Novos materiais podem oferecer tremendas vantagens, mas também problemas em potencial pelo desconhecimento de alguns aspectos obscuros de seu desempenho.

A análise de falha inicia-se antes de sua ocorrência: a história e o desempenho prévio do componente e/ou estrutura devem ser conhecidos e registrados. Posteriormente, executa-se uma seqüência de testes, para análise da referida falha. Estes testes visam detalhar os aspectos metalúrgicos do material analisado. Na Tabela 1 estão ilustradas, como exemplo, duas seqüências de ensaios/análises a serem executadas conforme sugerido por dois autores conhecidos: Colangelo/Heiser [1] e Wulpi [2]. Difícilmente um único teste ou uma combinação simples e única de testes irá oferecer a prova definitiva de todos os eventos de falha, normalmente alguns testes devem ser realizados e os resultados destes comparados para se formar o cenário da falha e indicar as medidas para evitá-la. Serão comentados sucintamente alguns dos testes que podem ser realizados e o que estes podem adicionar em termos da análise em si.

Tabela 1. Exemplos de procedimentos de análise de falha [1, 2].

Colangelo e Heiser (1987) [1]	Wulpi (1993) [2]
<p>I. Determinar história de utilização</p> <p>A. Evidência documental</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Certificados de teste 2. Dados de ensaios mecânicos 3. Especificações pertinentes 4. Correspondência 5. Entrevistas 6. Depoimentos e interrogatórios <p>B. Parâmetros de serviço</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Parâmetros operacionais de projeto 2. Condições de serviço atuais <ol style="list-style-type: none"> a. Registro da temperatura b. Condições ambientais c. Tensões de serviço <p>II. Limpeza</p> <p>III. Ensaios não destrutivos</p> <p>A. Análise macroscópica da fratura</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Presença de mudanças de coloração ou textura <ol style="list-style-type: none"> a. Coloração de revenido b. Oxidação c. Produtos de corrosão d. Contaminantes 2. Presença de características superficiais marcantes <ol style="list-style-type: none"> a. "Lábios" de cisalhamento b. Marcas de praia c. Marcas de sargento d. Rugosidade devido a deformação plástica e. Vazios e/ou inclusões f. Trincas secundárias 3. Direção de propagação 4. Origem da fratura <p>B. Detecção de defeitos superficiais e/ou subsuperficiais</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Partículas magnéticas 2. Líquidos penetrantes 3. Ultrassom <p>C. Medições da dureza</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Macroscópica 2. Microscópica <p>D. Análise Química das partes fraturadas</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Análise via úmido 2. Análise por plasma (espectroscopia) 3. Difração de raios-X, fluorescência 4. Microsonda eletrônica (EDS, WDS) <p>IV. Ensaios destrutivos</p> <p>A. Metalografia</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Macroscópica 2. Microscópica <ol style="list-style-type: none"> a. Estrutura b. Tamanho de grão c. "Limpeza" d. Microdureza dos constituintes <p>B. Ensaios Mecânicos</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Tração 2. Impacto 3. Tenacidade a fratura 4. Especiais (outros) <p>C. Ensaios de Corrosão</p> <p>D. Análise química (do componente)</p> <p>V. Análise de tensões</p> <p>VI. Armazenamento</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Coleta de dados e seleção de amostras. 2. Exame preliminares da parte falhada (exames visuais com armazenamento – fotografia). 3. Ensaios não destrutivos. 4. Ensaios mecânicos (incluindo dureza e tenacidade). 5. Seleção, identificação, preservação e/ou limpeza de amostras (para comparação com partes não fraturadas). 6. Exames macroscópicos, análise e documentação fotográfica (superfícies de fratura, trincas secundárias e outras características superficiais). 7. Observação microscópica (lupa, MEV) e análise. 8. Seleção e preparo de amostras metalográficas. 9. Exame e análise das amostras metalográficas. 10. Determinação do mecanismo de falha. 11. Análise química (total, local, produtos de corrosão, depósitos ou recobrimentos e microanálise). 12. Análise por mecânica da fratura. 13. Ensaios sob condições simuladas de serviço. 14. Análise de todas as evidências, formulação das conclusões e confecção de um relatório (incluindo as recomendações).

2 TÉCNICAS DE ANÁLISE

Algumas das diversas técnicas listadas na Tabela 1 foram discutidas neste trabalho, dando-se ênfase na associação do resultado obtido destes ensaios com o resultado final da análise de falhas.

2.1 Macrofractografia (Análise Visual)

O exame do aspecto visual da fratura é feito com a vista desarmada ou com pequenas ampliações (x 50 vezes), estando profundamente associado com o mecanismo de falha ocorrido e a história de utilização do componente e/ou estrutura. Sua análise permite inferir, por exemplo, o sistema de tensões que produziu a fratura, onde esta fratura foi iniciada, quanto tempo pode ter levado para se propagar, quais eram as condições de carregamento mecânico existente, entre outros tipos de informações.

Estes dados irão posteriormente auxiliar a compreensão metalúrgica da falha, auxiliando na solução final. O recolhimento de informações deve ser feito logo no início do processo de análise de falha, de preferência no local onde ocorreu esta falha. O fiel registro fotográfico do cenário da falha e das partes envolvidas é uma documentação praticamente obrigatória em qualquer análise de falha. Muitos detalhes que estão contidos na “cena da falha” podem conter informações primordiais para a sua elucidação, mesmo que não sejam inicialmente perceptíveis pelo analista. Na Figura 2, por exemplo, estão algumas fotos registrando a falha (2.c) de um suporte (2.b) de uma panela (2.a). A observação das fotos do suporte como montado oferecem uma série de informações quanto ao seu processo de montagem (notar o cordão de solda depositado e as regiões deformadas plasticamente).

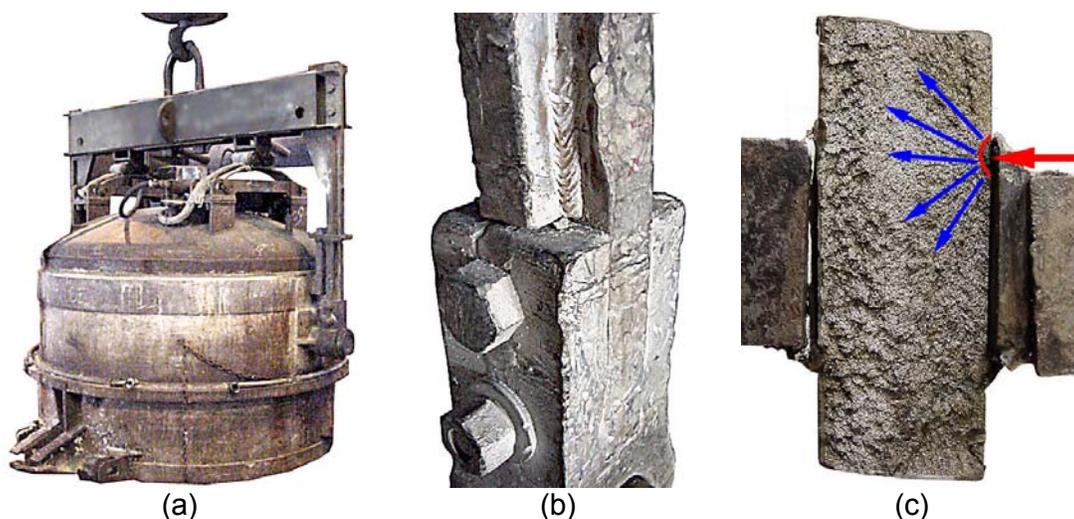


Figura 2. (a) Aspecto de uma panela, (b) de seu suporte e (c) da superfície de fratura frágil (vide seta) ocorrida em um suporte [3].

Uma vez registradas as condições iniciais de falha do componente e/ou estrutura é necessário fazer o estudo mais detalhado das partes falhadas (fraturadas), com o recolhimento de amostras para análise (ensaios). Destas amostras, uma análise mais detalhada do aspecto de sua fratura é realizado, inclusive com o auxílio de pequenas ampliações oferecidas por lupas com a associação do registro fotográfico. A Figura 3 ilustra como é prático o registro fotográfico, neste caso documentando a associação entre trincas de fadiga com mecanismos de corrosão em eixos de bombas.

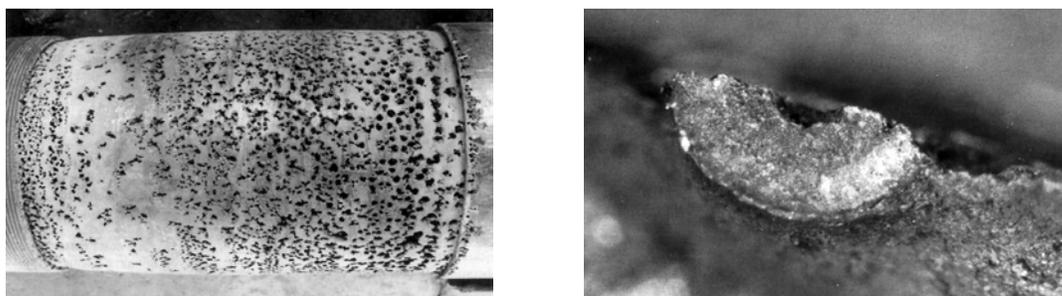


Figura 3. Eixo de uma bomba de água mostrando uma severa formação de “pits” de corrosão e o registro de uma trinca de fadiga iniciando-se em um destes “pits” [4].

A maioria das falhas estão associadas à fadiga pura ou à corrosão associada com a fadiga [5, 6]. Assim, a análise visual normalmente é executada para determinar

características superficiais de fadiga, tais como: marcas de praia, linhas divisórias de propagação de trincas (“ratched marks”), percentual de fratura por fadiga e direção de propagação da trinca. A análise da superfície de fratura por fadiga permite não apenas caracterizar este mecanismo de falha como também apontar o local onde esta se iniciou para orientar a amostragem e eventual associação com as condições locais do material falhado, especialmente para eixos, conforme ilustrado na Figura 4 [6].

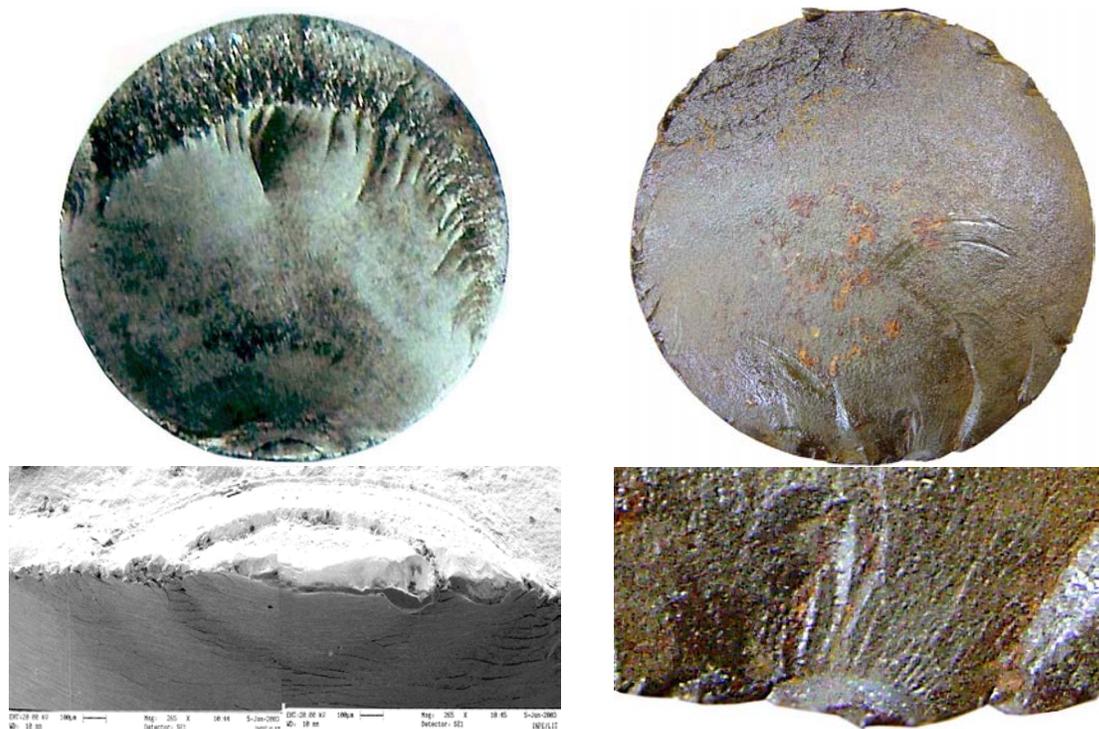


Figura 4. Eixos fraturados por fadiga, em baixo nível de carregamento mecânico. Em ambos os casos a região de nucleação da fadiga está na parte de baixo das fotos e um detalhe destas regiões está mostrado [6].

2.2 Microfractografia (Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV)

Cada tipo de fratura (dúctil, frágil, fadiga, corrosão, fluência, etc.) possui uma determinada morfologia a nível microestrutural que a individualiza, conforme ilustrado na Figura 5. Assim, para analisar e estudar os mecanismos de fratura nos materiais, mesmo que este não esteja tão bem caracterizado a nível macroscópico, torna-se necessário a utilização da microscopia eletrônica (especialmente varredura - MEV). A análise microscópica de superfície de fratura é uma técnica importante não apenas para a determinação do real mecanismo de falha, mas também para a sua documentação.

Muitos aparelhos de microscopia oferecem também a possibilidade de executar a análise química localizada no material sob observação (microanálise). Este ensaio oferece informações muito importantes, pois permite associar o tipo de inclusão, segregação ou partículas estranhas presentes ou diretamente associadas com a falha observada. Também permite inferir as condições de formação e evolução das trincas pela identificação e análise de eventuais produtos de corrosão ou contaminantes.

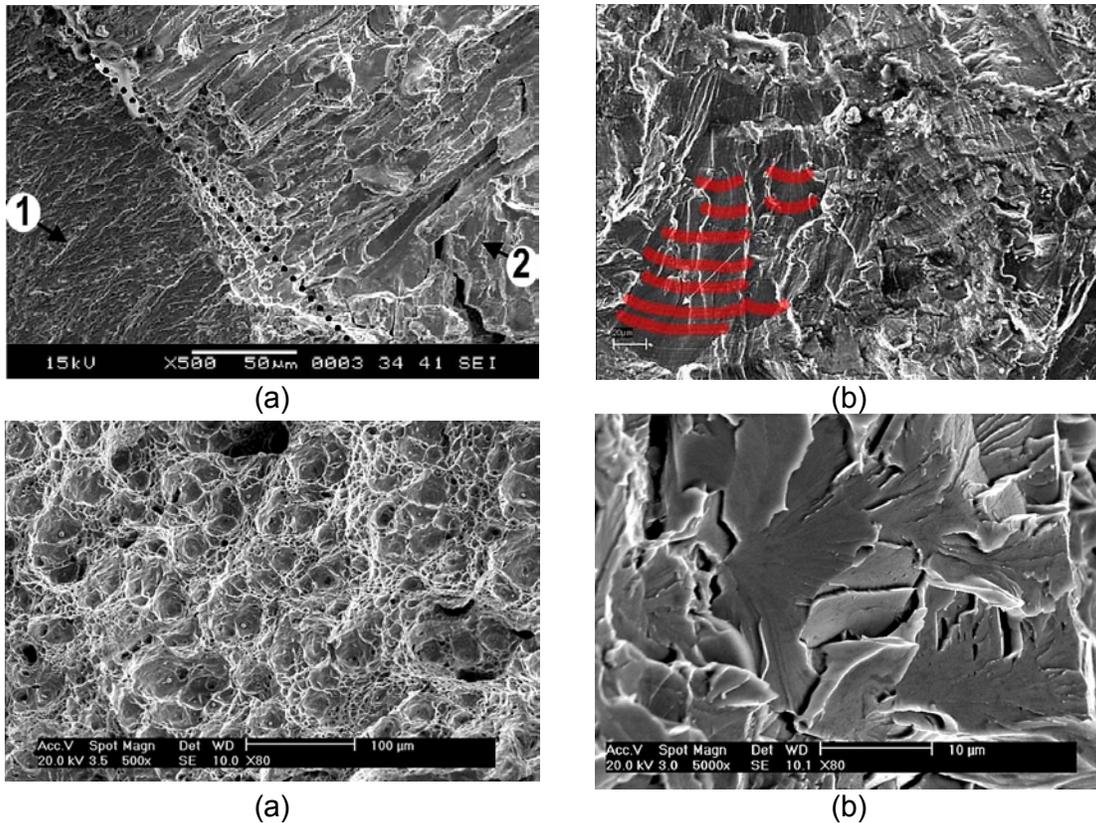


Figura 5. Microfractografias de (a) um CP apresentando uma região de fratura por fadiga (1) e por corrosão sob tensão (2) [6]; (b) um componente aeronáutico ilustrando a presença de características de propagação por fadiga em [7]; (c) e (d) um CP para medição da tenacidade de um aço microligado obtido por laminação controlada ilustrando regiões de fratura dúctil e frágil na superfície de fratura [8].

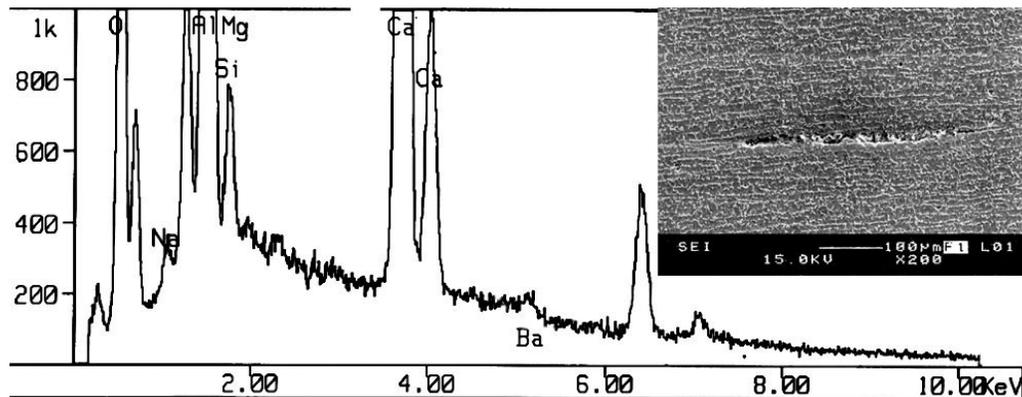


Figura 6. Microanálise química de uma descontinuidade detectada em um aço atestando a sua relação química com aditivos empregados na etapa de lingotamento (fluxantes) [9].

Infelizmente nem sempre a superfície de fratura encontra-se em um estado de conservação tal que possa ser facilmente observada pelo MEV. Uma possibilidade de fazer esta análise é recriando as condições de carregamento que geraram a falha e reproduzi-la em CP's laboratoriais, que poderão ser observados mais facilmente.

2.3 Metalografia (Microscopia Ótica)

Muitas vezes a falha é devida à conjunção de fatores externos, especialmente fadiga e corrosão, com uma estrutura não adequada à aplicação. Juntamente com os ensaios mecânicos, a metalografia oferece um cenário do desempenho do material e não é raro que algumas surpresas possam surgir na análise metalográfica, especialmente quando feita na região onde a falha ocorreu. Inclusões e precipitados grosseiros, associados à falha, podem ser diretamente observados sem ataque químico documentando-se a sua associação com a falha ocorrida.

Mas a principal contribuição que a metalografia oferece é a caracterização do tipo de estrutura presente e a associação desta com algum tratamento termomecânico, de produção ou acidental, que tenha sido preponderante para a ocorrência da falha, conforme ilustrado pela Figura 7. Cabe ao analista, ou a alguém designado para tal, fazer as devidas correlações entre a microestrutura, observada em amostras do componente falhado, com a composição química e com o histórico de fabricação do material. Com tais informações, a análise final da falha e suas medidas de contenção ficam facilitadas.



Figura 7. Metalografia da região de iniciação de trincas por fadiga de um dos eixos mostrado na figura 4: término de um depósito de solda (eletrodo revestido) associado com regiões tratadas termicamente e trincas [6].

2.4 Simulações (Físicas ou Computacionais)

As simulações (físicas ou computacionais) são muito úteis na etapa de projeto de uma estrutura ou componente, pois permitem antever possíveis falhas que ocorreriam em condições de carregamento ou degradação contínuos de uso. Estes ensaios são mais usuais na indústria aeroespacial e automobilística, conforme ilustrado na Figura 8.

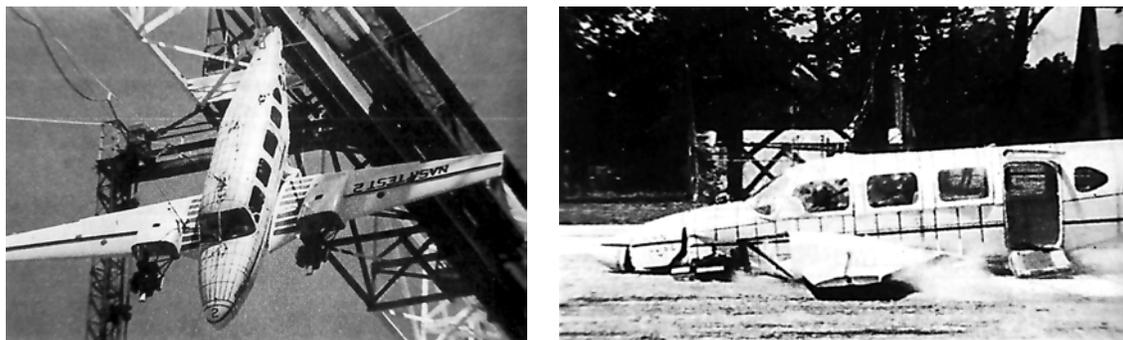


Figura 8. Teste de simulação de impacto em uma aeronave no centro de pesquisa Langley da Nasa [10].

Por outro lado, ensaios de simulação do carregamento mecânico podem se tornar necessários durante uma análise de falha, basicamente por duas razões: (1) algumas vezes não estão disponíveis partes em quantidade e/ou qualidade superficial suficientes para serem analisadas ou (2) quando se deseja um melhor nível de conhecimento da evolução do processo de falha. A Figura 9 ilustra um exemplo do segundo caso, nesta figura está ilustrado uma parte fraturada de um semi-reboque de um caminhão que fraturou por fadiga ocasionada por sobrecargas durante frenagens.

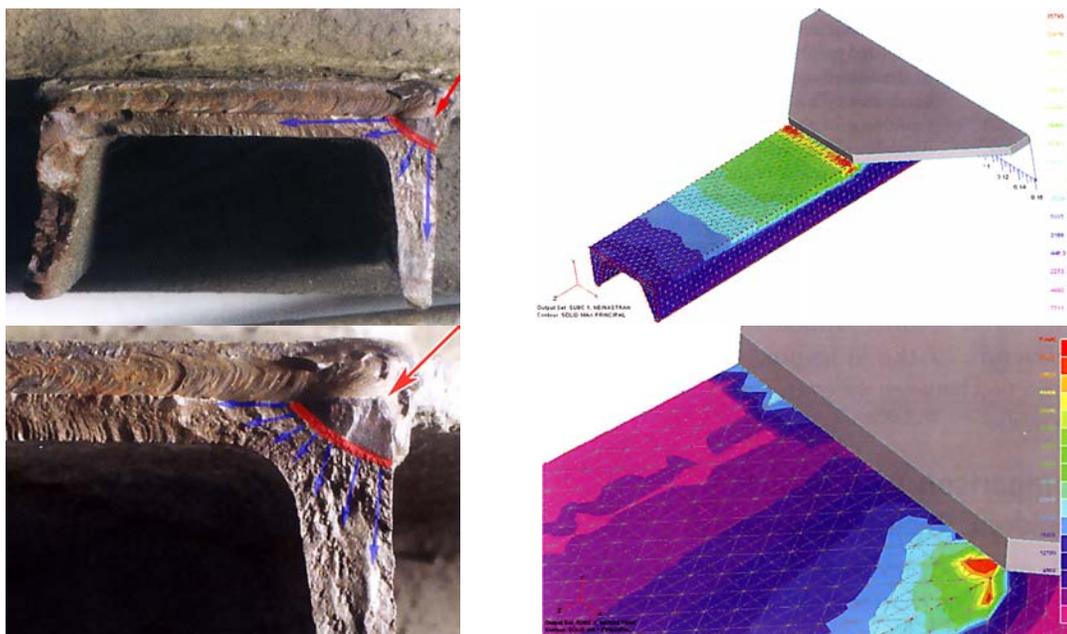


Figura 9. Fratura de uma viga de enrijecimento de um reboque ocorrida por fadiga em um ponto de concentração de tensão quando existe uma condição de carregamento heterogênea (durante freadas) [11].

2.5 Outros (Ensaio Destrutivo, Não Destrutivo, Análise Química)

Ensaio para a determinação da composição química e das propriedades mecânicas são geralmente indispensáveis para a correta caracterização do material utilizado na estrutura ou componente falhado. Os ensaios podem ser realizados tanto para verificar a correta especificação do material, determinando se não ocorreram eventuais trocas, ou se o material não teve as suas características alteradas devido a um tratamento ou operação qualquer de manutenção ou reparo, por exemplo.

No caso de juntas soldadas, ensaios de microdureza oferecem uma ótima maneira de caracterizar a qualidade da solda e assim quantificar a severidade desta descontinuidade metalúrgica. Os presentes autores verificaram que estruturas metálicas que falharam por fadiga iniciada em juntas soldadas, possuíam soldas com uma variação acima de $200\mu\text{HV}/\text{mm}$ na microdureza [6]. Variações de microdureza tão intensas refletem uma estrutura heterogênea que age como um concentrador de tensões metalúrgico, favorável à nucleação de trincas por fadiga. A figura 10 ilustra um exemplo de uma solda mal conduzida e que gerou uma fratura devido à grande variação de propriedades mecânicas/metalúrgicas. A variação de microdureza admissível para regiões superficiais endurecidas podem ser maiores, devido ao menor nível de sollicitação mecânica nestas regiões.

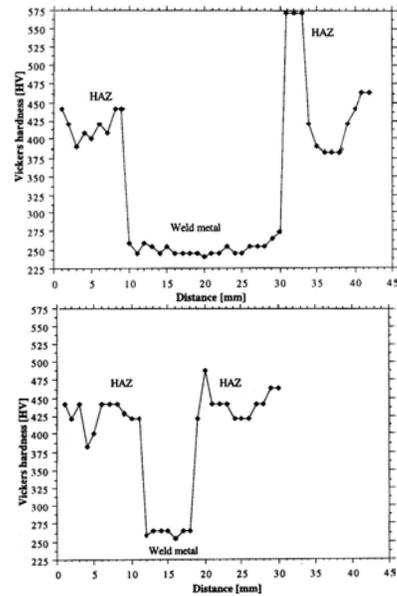
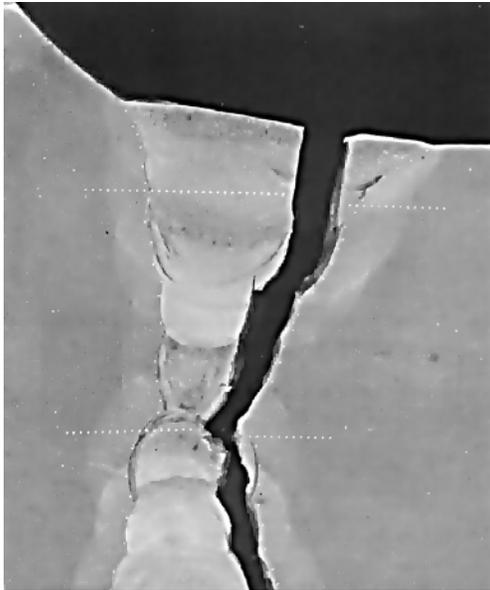


Figura 10. Macrografia e medições de microdureza (nas 2 linhas pontilhadas) de uma junta soldada de um garfo da suspensão de um caminhão [12].

3 CONCLUSÕES

Falhas são eventos que ocorrem devido as mais diversas origens, mas muitas associadas pela conciliação de condições mecânicas e metalúrgicas adversas. Diversas técnicas de análise e inspeção devem ser realizadas para se obter a causa primordial para a falha assim como para gerar as medidas de contenção. Diversos ensaios para avaliação das características do material podem ser empregados, mas a sua correta interpretação e análise depende de uma ampla gama de conhecimentos metalúrgicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 COLANGELO, V.J.; HEISER, F.A., **Analysis of Metallurgical Failures**, Wiley, 1987.
- 2 WULPI, D.J., **Understanding how components fail**. ASM International, Materials Park, 1993.
- 3 MORAIS, W.A.; CANDIDO, L.C.; **Análise de falha em um suporte de panela**. Relatório de análise de falha para cliente, Grupo de Estudos sobre Fratura de Materiais, DEMET/EM/UFOP, agosto de 2001.
- 4 BERNDT, F.; BENNEKOM, A.; Pump shaft failures – a compendium of case studies. **Engineering Failure Analysis**, v.8, n.2, pp.135-144, 2001.
- 5 LANCASTER, J.; **Handbook of structural welding**. Abington Publishing, 1997.
- 6 GODEFROID, L.B.; CANDIDO, L.C.C.; MORAIS, W.A.; **Análise de Falhas**. ABM, abril, 2005.
- 7 LOURENÇO, N.J. et. al. Análise de falha em cubo de roda de uma aeronave learjet. **60º Congresso Anual da ABM**, 2005.
- 8 SILVA, M.C.; et. al. Efeito de delaminações sobre curvas j-r do aço API 5I X80 produzido por laminação controlada – parte I: investigação experimental. **60º Congresso Anual da ABM**, 2005.
- 9 MORAIS, W.A.; CANDIDO, L.C.; **Avaliação de desempenho de material para tubos ERW**. Relatório interno para cliente, Cosipa, 2005.
- 10 BROWN, S.; **Forensic Engineering**. ISI Publications Inc., 1995.
- 11 STEVENSON, M.E. et. al.; Failure analysis in a vehicle accident reconstruction. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, ASM. v.4, n.2, pp.49-55, 2004.
- 12 [12] – FIGUEIREDO, M.V.; et. al.; Fracture analysis of forks of a heavy duty lift truck. **Engineering Failure Analysis**, v. 8, n. 5, pp. 411-421, 2001.

DEVELOPMENT AN ENAMELING HOT ROLLED STEEL FOR WATER HEATERS⁴

*Herbert Christian Borges⁵
Willy Ank de Morais⁶
Claudio Pereira Diogo⁷
Lara Chrystinne Paes Ret⁸
Claudio Coelho da Silva⁹*

Abstract

To identify a problem that has occurred in a metal component of a mechanism or structure a failure analysis becomes necessary. During a failure analysis the mode of failure will be determinate and appropriate corrective measures may then be taken to try to prevent similar future failures. However, there is an infinite variety of types of parts, metals, treatments conditions, types of loading, applications, environments, and combinations of all of these. Furthermore, there are numerous tests available to perform during a failure analysis. The correct interpretation of the results will give a truly scenario for failure understanding. This work presents some considerations about this endeavor, listing some examples with when and what tests were preponderant to discover failure root cause.

Key-words: Failure analysis; SEM; Fracture; Fatigue.

⁴ *Contribuição técnica para o 60º Congresso Anual da ABM - Seminário: Desenvolvimento, adequação e aplicação de produtos, Belo Horizonte, 25 a 28 de Julho de 2005.*

⁵ *Eng^o, Analista de Produto/Desenvolvimento de novo produto, Assistência Técnica, COSIPA (herbertborge@cosipa.com.br).*

⁶ *MSc., Eng^o, Téc., Analista de Produto/Desenvolvimento de novo produto, Assistência Técnica, COSIPA; Prof. Departamento Eng^a Mecânica UNISANTA (willymorais@cosipa.com.br ou willyank@unisanta.br).*

⁷ *Téc., Assistente de Produto, Assistência Técnica, COSIPA (claudiopereira@cosipa.com.br).*

⁸ *Eng^a, Analista de Operação, Suporte Técnico da Aciaria, COSIPA (lararet@cosipa.com.br).*

⁹ *Téc., Assistente de Qualidade, PAINCO – SP (coelho@painco.com.br).*