

# ANÁLISE DE FALHAS

## Acidentes e incidentes motivaram avanços científicos e tecnológicos na área da mecânica da fratura

**ABSTRACT FAILURE ANALYSIS HAS BEEN AN IMPORTANT TOOL TO IMPROVE PROCESSES AND PRODUCTS. SEVERAL ACCIDENTS AND INCIDENTS HAVE BEEN ACTING AS DRIVING FORCE FOR SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT ALONG THE YEARS. THIS PAPER IS A BRIEF SUMMARY ABOUT CASES IN FAILURE ANALYSIS.**

**José Benedito Marcomini**  
jmarcomini@usp.br

**Carlos Antonio Reis Pereira Baptista**  
carlos.baptista@usp.br

Escola de Engenharia  
de Lorena - EEL | USP

Os primeiros estudos na área de falhas que se tem notícia foram realizados por Leonardo da Vinci (1452-1519) [1]. Ele também foi pioneiro no desenvolvimento do processo de laminação e realizou os primeiros estudos de falha em metais, considerando a influência do comprimento de arames na resistência à fratura. Concluiu que a probabilidade de um arame metálico apresentar trincas era diretamente proporcional ao seu comprimento. A literatura aponta que em 1672 Newton considerou superfícies de fratura, porém não há detalhes sobre este trabalho [2]. O engenheiro de minas Wilhelm August Julius Albert (1787-1846) testou correntes de guindastes carregando e descarregando-as, ou seja, um ensaio rudimentar de fadiga [3]. A análise de um acidente de trem próximo à Versaillies em 1842 concluiu que o mesmo havia sido causado pela fadiga do eixo frontal da locomotiva. Naquela época não existia o conceito de “fadiga” como conhecemos hoje. O emprego inicial do termo para indicar a causa de uma falha fazia analogia a “cansaço”. Se-

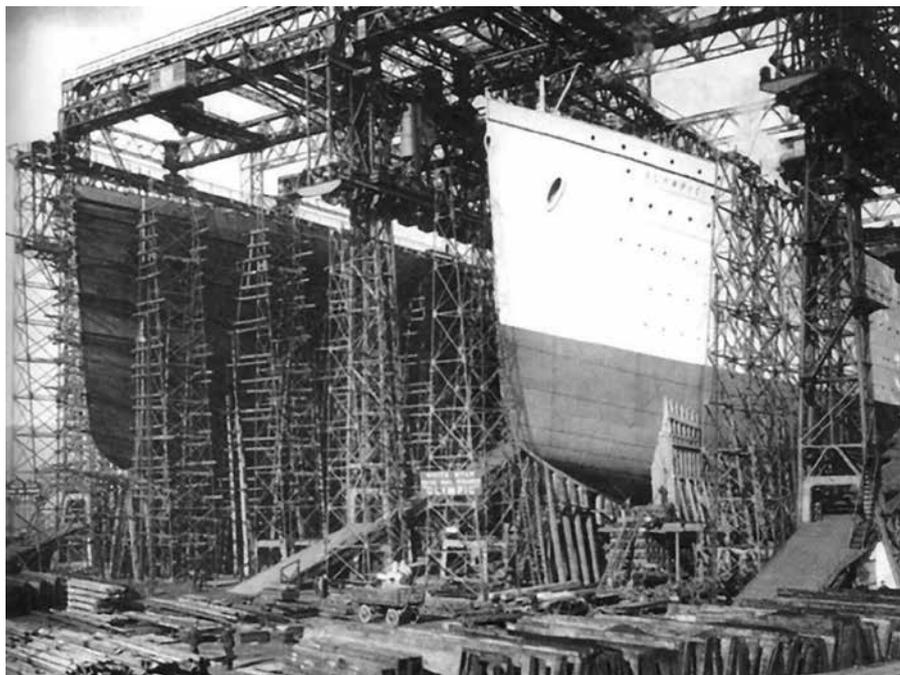
gundo Schütz (1996), o termo “fadiga” foi usado pela primeira vez na literatura pelo inglês Braithwaite em 1854. August Wöhler desenvolveu estudos mais científicos em fadiga entre 1852 e 1869 [3].

Dentre todos os casos de falhas através dos tempos, o mais comentado é o acidente com o navio Titanic, descrito brevemente a seguir.

### TITANIC

Um dos casos mais célebres de falhas foi o naufrágio do navio Titanic (**figura 1**), em 14 de abril de 1912, com mais de 1.500 vítimas [4]. A análise de falhas deste caso iniciou-se com a descoberta dos destroços do navio e a retirada de algumas partes para estudo, em 1991, e concluída em 2008. Um dos pesquisadores que participaram desta análise foi o Dr. Tim Foecke, do National Institute of Standards and Technology (NIST). A Dra. Jennifer Hooper McCarty desenvolveu sua tese de Ph.D (Johns Hopkins University) utilizando como tema a análise de falhas do Titanic. Ambos são autores do livro “What Really Sank The Titanic” (2008) [4].

Figura 1 | Construção do Titanic. Fonte: [4]



Muitas foram as teorias para explicar o afundamento da maior embarcação já construída pelo homem, até então. A teoria mais comentada era a da fragilidade do aço devido ao “alto” teor de enxofre (0,069%) para um aço comparável ao ASTM A 36. Além disso, foi detectada a presença de sulfetos na superfície de fratura de corpos-de-prova de impacto, usinados a partir de pedaços de chapa retirados do casco do navio (figura 2).

Os ensaios para determinação da temperatura de transição frágil-dúctil também demonstraram que o aço do Titanic apresentava comportamento frágil em temperaturas similares às da água (~ - 2°C) na noite fatídica do acidente, quando o navio colidiu com um iceberg (figura 3).

A primeira conclusão apresentada no livro [4] é que a teoria do aço frágil estava errada: a amostra do casco retirada para o ensaio de impacto, em 1991, era de uma região já fraturada em três pontos, tratando-se, portanto, de uma chapa particularmente frágil. Na opinião dos

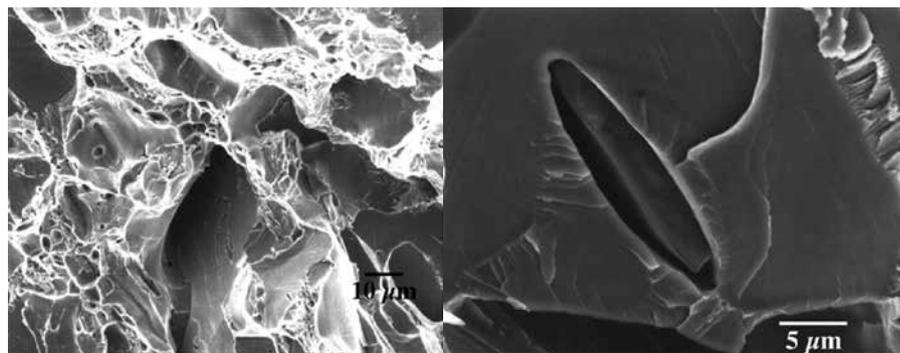
autores, o ensaio de impacto (Charpy) não seria o ideal para a análise da tenacidade do aço utilizado, pois as condições seriam muito severas comparadas àquelas da colisão com o Iceberg. O Dr. Tim Foecke realizou ensaios melhor controlados e em condições apropriadas com outras partes retiradas do casco do navio, cujos resultados ficaram muito próximos aos resultados dos aços utilizados atualmente para o mesmo fim e que apresentam tenacidade à fratura satisfatória em “águas

geladas”. A conclusão final do livro indica que ocorreu uma combinação de fatores que levaram à falha dos rebites (figura 4) como “a natureza do impacto não usual” e a presença de grande quantidade de silicatos em sua estrutura (figura 5).

O acidente com o Titanic fez com que se intensificassem os estudos para o desenvolvimento de dispositivos como o sonar e, conseqüentemente, o ultrassom. O evento provocou também um avanço na mecânica de fratura, ferramenta muito poderosa na análise e prevenção de falhas. Em 1913, Charles E. Inglis estudou a distribuição de tensões em torno de um furo elíptico central, em uma chapa infinita, solicitado em tração. Em 1920 surgem os fundamentos da Mecânica da Fratura, por Alan A. Griffith [1].

Durante a Segunda Guerra Mundial, os navios cargueiros Liberty também foram alvo de falhas catastróficas. O estaleiro precisava reduzir o tempo de fabricação dos navios para poder repô-los em maior quantidade aos que eram afundados pelos submarinos alemães no Atlântico Norte. A grande redução neste tempo se deu por meio do uso intensivo de junções soldadas, que além de aumentar a temperatura de transição, deixou a região da solda como um “caminho” preferencial para a fratura. Foram fabri-

Figura 2 | Imagens de microscopia eletrônica de varredura da superfície de fratura de um corpo-de-prova de ensaio de impacto a 0°C extraído de chapas do Titanic. Sulfeto de manganês e planos de clivagem. Fonte: [4]



cados cerca de 2700 navios, dos quais 400 apresentaram falhas, sendo que em 20 ocorreram falhas catastróficas. Em 1943, o navio tanque S.S. Schenectady (série Liberty) sofreu fratura catastrófica no porto (figura 6) [1]. Estas falhas levaram ao desenvolvimento de critérios baseados no ensaio de impacto.

No Brasil, em 1936, Hubertus Colpaert, chefe do então Laboratório de Metalografia Microscópica do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), foi um pioneiro na análise de falhas, estudando fraturas de eixos ferroviários por fadiga [5]. No período de março a maio de 1944 foi realizado pelo Prof. Robert Franklin Mehl, na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, um curso de extensão e aperfeiçoamento para engenheiros metalurgistas, intitulado “Metalurgia do Ferro e do Aço” [6]. Em sua aula inaugural, o Prof. Mehl afirma:

“O engenheiro metalurgista deve ser uma combinação de um verdadeiro engenheiro e de um verdadeiro cientista. Se não o for, nunca poderá ser verdadeiramente eficiente.”

Pode-se estender essa afirmação no que tange ao perfil do atual engenheiro de materiais e, ainda, no caso do especialista em análise de falhas, adicionar a estas características o perfil investigativo que o profissional deve apresentar no desenvolvimento de uma análise de falha, a começar pelo garimpo do verdadeiro histórico da falha.

Atualmente, a análise de falhas encontra-se inserida dentro de diversos cenários, desde a ciência forense até dentro da cadeia produtiva, apresentando for-

Figura 4 | Rebite do casco. Fonte: [4]



Figura 3 | Determinação da curva de transição frágil-dúctil. Adaptado de [4]

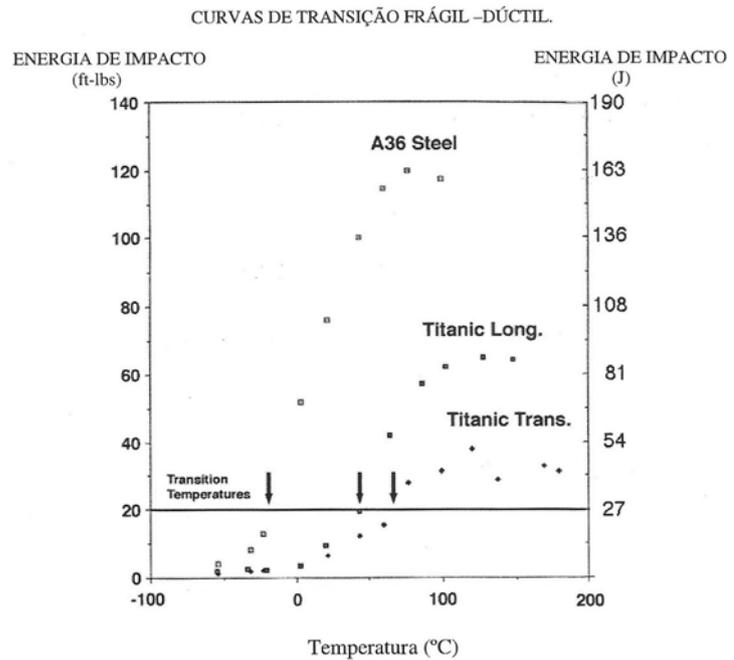


Figura 5 | Distribuição de silicatos no rebite. Fonte: [4]

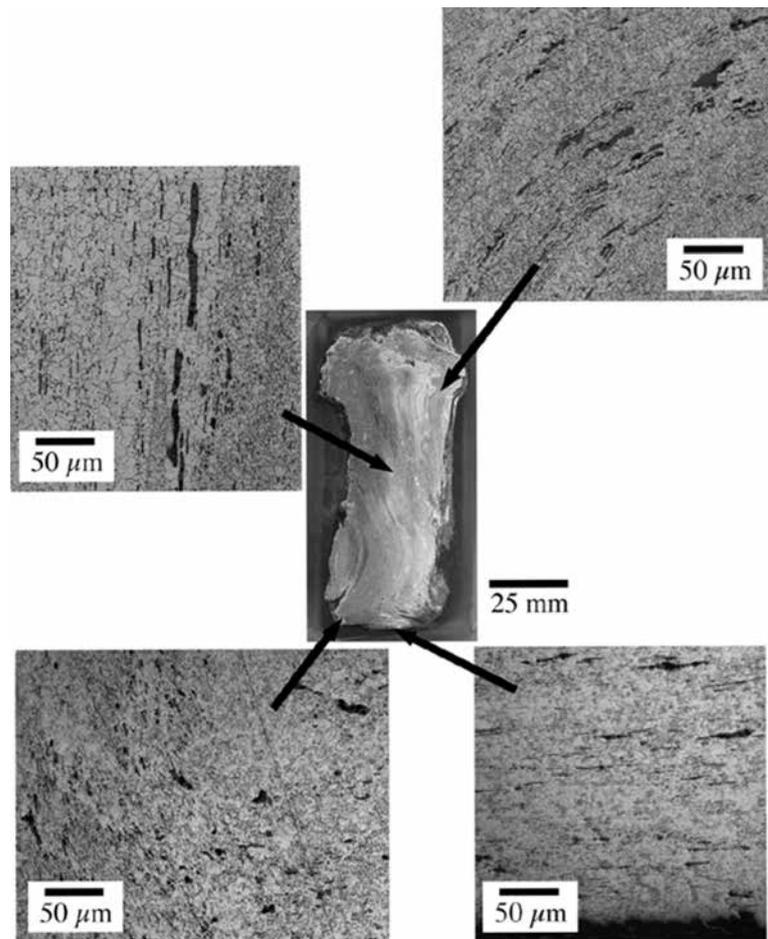


Figura 6 I Navio S.S. Schenectady, da série Liberty. Fonte: [1]



tes relações com os sistemas de qualidade nos processos de melhoria contínua, como por exemplo FMEA, *six sigma*, *Lean Manufacturing*. Uma análise de falhas que logre êxito em desvendar a causa raiz da falha pode ser uma grande fonte de melhoria de processos com redução de custos. Historicamente, na década de 1950, alguns processos e produtos foram desenvolvidos graças à análise de falhas. A desgaseificação foi incluída no processo de fabricação do aço, depois de falhas catastróficas como a de um rotor de turbina a vapor de um gerador de 165MW, operando a 3600 rpm, causando a destruição da usina de Ridgeland, Chicago, (1954) [6]. Causa: fragilização por hidrogênio.

Entre 1953 e 1954, três jatos *Comet*, da britânica *De Havilland Aircraft Company*, caíram e a análise de falhas demonstrou que a fratura da fuselagem ocorreu devido à compressão e descompressão, causando trincas de fadiga. Elas foram nucleadas em pontos de concentração de tensão, próximo às extremidades das escotilhas retangulares [1]. Talvez essa tenha sido uma oportunidade para o desenvolvimento da *Boeing* e outras empresas aéreas.

O fenômeno da fratura ganhou tanta importância na década de 1950 que, em abril de 1959, a Academia nacional de Ciência e o Conselho Nacional de Pesquisas dos Estados Unidos organizaram e dirigiram uma conferência internacional sobre “mecanismos atômicos de fratura”. Alguns dos maiores cientistas de materiais da época estavam envolvidos, como: Cohen (MIT), Cotrell (Cambridge-UK), Petch (Leeds-UK), Zener (Westinghouse Laboratory-USA), Honeycombe (Sheffield-UK), Irwin (U.S. Naval R. Laboratory) e Orowan (MIT). A ideia era que nos dois primeiros dias os cientistas convidados apresentassem seus trabalhos e nos dias subsequentes a teoria envolvida seria discutida pelo comitê organizador com o objetivo de estudar diretrizes para este campo de pesquisa [7].

Em 1986 um acidente deixou o mundo em choque, com a morte de sete tripulantes, incluindo uma professora, que seria a primeira civil a ser enviada ao espaço. O ônibus espacial *Challenger* explodiu 73 segundos após o lançamento, em sua décima missão. A análise da falha mostrou que a temperatura na hora e local do lançamento (~ 2°C) contribuiu para fragili-

zar um anel de vedação na parte inferior de um dos foguetes permitindo o contato entre as chamas e o combustível.

Nos últimos anos ainda se tem notícia de diversos acidentes aeroespaciais, bem como nas áreas petroquímica, nuclear e civil, sendo que estes são frequentemente estudados. Mesmo áreas de alta tecnologia estão sujeitas a falhas inesperadas, como no acidente com Ayrton Senna na fórmula 1, em 1994, causado, ao que tudo indica, pela fratura por fadiga de uma emenda soldada da barra de direção.

Até os dias de hoje existem diversos estudos na área de mecânica de fratura e análise de falhas com modelos cada vez mais sofisticados. As superfícies de fratura são analisadas por modernas técnicas, similares à tomografia computadorizada e existem até estudos que relacionam sua topografia a dimensões fractais. A mecânica de fratura tem sido estudada em corpos-de-prova microscópicos, e modelos atômicos de deformação, nucleação e propagação de trincas têm sido desenvolvidos. A principal forma de minimizar as falhas é por meio do estudo de casos que permitem que sejam realizadas ações preventivas. ■

## REFERÊNCIAS

- [1] Maneschy, J.E., Miranda, C.A.J., *Mecânica da Fratura na Indústria Nuclear*, Eletrobras – Eletro nuclear, Rio de Janeiro, 2014.
- [2] Cahn, R.W., *Physical Metallurgy*, 2a. Ed, Elsevier, pp-01-31, 1970.
- [3] Suresh, S., *Fatigue of Materials*, Cambridge University Press, 1998.
- [4] McCarty, J.H., Foecke, *What Really Sank The Titanic*, T.Citadel Press Book, NY, 2008.
- [5] Cescon, T., Azevedo, C.R.F., *Metalografia e Análise de Falhas*, ABM, São Paulo, 2006.
- [6] Costa e Silva, A.L.V, Mei, P.R., *Aços e Ligas Especiais*, 2ª.ed., Edgard-Blücher-Villares Metals, 2006;
- [7] *Proceedings of an International Conference on the atomic mechanism of fracture held in Swampscott, Massachusetts, April 12-16, 1959.*