

Análise de falhas - um dever do IPT

*Failure Analysis - a duty of IPT*Hamilton Lelis Ito^{a*}, Jonas de Carvalho Gomes^a

Resumo

Desde o início dos anos 1900, tempo em que o IPT adquiriu o seu primeiro microscópio óptico para metalografia, a análise de falhas tem sido um dever que o IPT nunca deixou de cumprir. O termo análise de falhas tem um significado amplo, o objetivo agora, entretanto, é restringir o significado às análises realizadas visando à determinação das causas de fraturas ou trincas em componentes mecânicos e estruturas. Casos relacionados com perda da estabilidade de estruturas devido às deformações, ao desgaste e à corrosão generalizada, que também constituem falhas, não serão tratados neste artigo. Os engenheiros, normalmente, tentam projetar máquinas, motores e todo tipo de componentes mecânicos e estruturas para serem à prova de falhas. Para isso, a seleção do material, o processo de fabricação, a montagem e as recomendações de manutenção são cuidadosamente especificadas. A obediência a essas especificações, normalmente, previne falhas. Contudo, se um ou mais dos critérios especificados não for obedecido a possibilidade de ocorrência de falha aumenta. Além disso, há situações em que mesmo que todas as especificações tenham sido obedecidas, conforme prescritas, uma peça pode falhar e desencadear um acidente. Este artigo apresenta alguns casos de análise de falhas realizadas pelo IPT e as tendências para o futuro de aplicar técnicas de monitoramento a componentes mecânicos e estruturas, capazes de alertar possíveis falhas antes de elas ocorrerem.

Abstract

Since the early 1900's, the time when IPT acquired its first optical microscope for metallography, failure analysis has been a duty whose accomplishments have never stopped. The term "failure analysis" has a broad meaning, but the intent now is to restrict this meaning to the analyses performed on fractured or cracked mechanical components and structures intended to determine their causes. Cases related to loss of stability of structures due to deformation, wear and general corrosion that are also considered failures will not be treated in this article. Engineers normally try to design machines, engines and

^a Laboratório de Corrosão e Proteção, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

*E-mail: hlito@ipt.br

Palavras-chave:

fratura, fadiga, sobrecarga, equilíbrio líquido/gás, calço hidráulico.

Keywords:

failure; fracture; fatigue; overloading, liquid/gas equilibrium, hydraulic block.

all sorts of mechanical components and structures to be failure proof. For that material selection, manufacturing processes, assembling and maintenance recommendations are carefully specified. The appliance to these specifications normally prevents failures. However, if one or more of the items specified above is not obeyed, the probability of failure increases. Furthermore, there are situations in which, even though all the specifications are followed by the book, a part may fail and an accident ensue. Some selected failure analysis performed by IPT are presented in this paper. The trends for the future are to apply monitoring techniques to mechanical components and structures, capable of alerting possible failures before they occur.

1 Introdução

Desde 1907, quando o IPT adquiriu seu primeiro microscópio metalográfico, a análise de falhas tem sido um dever do qual o IPT nunca se esquivou. O termo análise de falhas tem um significado amplo, mas aqui ele será restrito às análises realizadas em componentes mecânicos e estruturas fraturados ou trincados com o objetivo de determinar as causas das falhas. Os engenheiros, normalmente, se empenham em projetar máquinas, motores e todo o tipo de componentes mecânicos e estruturas, para serem à prova de falhas durante o seu período de vida esperado. Para tanto, o cálculo de tensões, a seleção de materiais, os processos de manufatura, montagem e recomendações de manutenção são, cuidadosamente, especificados conforme normas e critérios de projeto que são revistos, continuamente. Quando ocorrem falhas não é incomum que melhorias em novas edições de normas, códigos de construção e guias de operação e de manutenção ocorram como resultados das análises de falhas. A obediência a essas regras não apenas proporciona uma operação mais segura, mas, normalmente, evita falhas. Contudo, se um ou mais dos critérios especificados não for obedecido, a possibilidade de falha aumenta.

Há situações em que, mesmo que todas as especificações e recomendações tenham sido obedecidas conforme a prescrição, podem ocorrer falhas e resultar em acidentes. Algumas vezes, o projeto está correto, mas durante a montagem ou a construção são adotadas algumas simplificações ou, por exemplo, alguma ação mal dirigida é tomada por trabalhadores sem treinamento apropriado, o que pode introduzir defeitos tais como: abertura de arco em estruturas ou peças rotativas, desalinhamento na montagem, desobediência ao desenho na manufatura e outros, ameaçando o desempenho do equipamento.

Problemas como esses não aparecem, necessariamente, na partida ou nas primeiras horas de operação, mas após um período maior de funcionamento do equipamento em regime permanente. Outras vezes, um pequeno incidente pode causar um dano, visualmente, imperceptível, como uma depressão sobre uma superfície, originalmente, uniforme ou um mini ou micro dobramento em uma peça, originalmente, reta sujeita a uma tensão pulsante de tração, por exemplo. Esse tipo de dano muda tensões locais de modo que o componente que estava projetado, apropriadamente, para resistir à carga de operação fica susceptível a desenvolver uma trinca de fadiga, mesmo trabalhando de acordo com o carregamento esperado.

Algumas vezes, efeitos inesperados do ambiente podem se tornar um grande problema. Um dano na vedação de uma bomba que cause um pequeno vazamento pode levar um eixo a sofrer corrosão por pite, por exemplo. O pite pode se tornar um concentrador de tensão capaz de iniciar uma trinca de corrosão sob tensão ou de corrosão fadiga.

Desalinhamentos em eixos, originalmente alinhados, causados por pequenos movimentos do solo podem provocar deslocamentos na fundação de equipamentos pesados, como redutores acoplados a motores capazes de introduzir cargas de flexão nos eixos não previstas no projeto. Se os eixos forem projetados para resistir a um torque severo (quando a carga mais importante é a de torção) e a uma flexão desprezível, pode ocorrer fratura em consequência de flexão rotativa devido ao desalinhamento. Nesses casos, o desalinhamento impõe um momento fletor não previsto no projeto. Muitas vezes, o cuidado apropriado com o projeto da fundação e o uso de acoplamentos elásticos entre o eixo do motor e o eixo da caixa de redução podem resolver o problema.

Equipamentos para trabalho em alta temperatura que, às vezes, sofrem aumento local de temperatura devido à deficiência na transmissão de calor através das paredes dos tubos, podem sofrer superaquecimento local, cuja consequência pode ser a falha por fluência. Equipamentos projetados para trabalhar continuamente, mas usados intermitentemente, podem falhar com o número de horas muito inferior ao previsto em projeto porque serão mais propensos à fadiga térmica.

Não é incomum peças de aço temperado e revenido, que são zincadas para proteção contra a corrosão, sofrerem trincamento induzido por hidrogênio. A camada de zinco realmente protege o aço da corrosão generalizada, atraindo para si a reação anódica, mas ao mesmo tempo, a reação catódica sobre o ferro gera hidrogênio que, sendo absorvido pelo aço, pode provocar o trincamento induzido por hidrogênio nas regiões submetidas a tensões de tração.

Há muitas outras situações similares a essas apresentadas, anteriormente e seria impossível listar completamente todos os eventos capazes de desencadear falhas.

Felizmente, há soluções para o controle da fratura, o que significa que, se não for possível corrigir todos os problemas que possam levar um componente à falha, é possível tomar ações para evitá-la. Manutenções preventiva e preditiva, avaliação não destrutiva, tolerância ao dano e adequação ao uso são recursos, normalmente, usados para evitar a fratura. O uso de sensores de temperatura, vibração, deformação e tensão podem prover um monitoramento contínuo de elementos mecânicos críticos, produzindo dados capazes de indicar se algo de errado está acontecendo, antes da falha acontecer. Para componentes trincados, é possível controlar o avanço da trinca antes dela atingir um tamanho crítico, utilizando um monitoramento contínuo por meio de emissão acústica.

Como se pode ver, atualmente, há recursos técnicos capazes de reduzir o risco de falha a quase zero. Eles são mais ou menos aplicados em função das possíveis consequências da falha. Se a fratura não ameaça a segurança humana e ambiental e/ou não implica em perdas econômicas

significativas, ações corretivas como a substituição de um parafuso quebrado, por exemplo, pode ser suficiente. Outras vezes, a falha de um único parafuso pode ser o início de um enorme desastre, o que significa que cada caso deve ser avaliado individualmente.

Desde a sua fundação, o IPT analisou milhares de fraturas dos mais diferentes tipos de componentes mecânicos. Em 1912, Hippolyto Gustavo Pujol Jr., o engenheiro responsável pela aquisição e operação dos primeiros equipamentos para ensaios mecânicos e análise microestrutural, publicou um artigo sobre metalografia microscópica e análise térmica (PUJOL, 1912) que serviu de base para o curso sobre esses assuntos que ele ministrou na Escola Politécnica de São Paulo. A consolidação da capacidade do IPT para analisar falhas ocorreu após Hubertus Colpaert assumir a administração da Seção de Metalografia, em 1928. Em seu livro sobre metalografia Colpaert (1951) apresentou diversos exemplos de peças fraturadas analisadas pelo IPT.

Durante a primeira metade do século 20, no Brasil, estradas de ferro cruzavam o estado de São Paulo e aquelas companhias costumavam solicitar o auxílio do IPT quando ocorriam falhas em componentes da estrada de ferro ou de trens. De meados dos anos 1950 até os anos 1960, após a morte de Colpaert, Alberto Albuquerque Arantes assumiu a responsabilidade pela realização das análises de falha no IPT. Seu extenso conhecimento sobre materiais e sobre mecânica deu a ele recursos para não apenas avaliar as propriedades dos materiais, mas também para analisar as cargas responsáveis pelas fraturas.

Durante esse período, pode-se destacar o papel de Arantes analisando falhas de componentes automotivos que estavam sendo nacionalizados pela recente indústria automobilística que se implantava no Brasil, propondo mudanças em materiais e processos de fabricação a fim de obter as propriedades desejadas do componente e, em alguns casos, excedê-las. Ainda nos anos de 1960, Paulo Sérgio Carvalho Pereira da Silva iniciou sua carreira como engenheiro no IPT e logo assumiu a herança deixada por Colpaert e Arantes (ITO, 2007). Mais tarde, Paulo Sérgio e Tibério Cescon, ex-estagiário do IPT, orientado por Colpaert, foram responsáveis pela formação de uma nova geração de especialistas entre os quais o autor principal deste artigo, que se orgulha de ter participado.

Atualmente, é possível dizer que, ao longo de sua existência, o IPT realizou milhares de análises de falhas de pequenas peças como agulhas hipodérmicas a grandes como virabrequins de motores estacionários de usinas termoeletricas, de pequenos vasos de pressão como botijões de GLP domésticos a imensos vasos de pressão da indústria petroquímica. Os clientes do IPT, normalmente, são empresas privadas, estatais e entidades de governo e, algumas vezes, pessoas físicas. Atualmente, o IPT realiza análises de falha de diferentes tipos de equipamentos e estruturas para todo o país e para o exterior, quando solicitado.

Devido à relação de confiança estabelecida entre o IPT e seu cliente, as informações contidas nos relatórios do IPT são confidenciais e não podem ser divulgadas para o público. As exceções ocorrem quando o cliente autoriza o IPT, por escrito, a divulgar o conteúdo desses relatórios

técnicos, normalmente, em artigos publicados sobre o assunto. Isso não significa que os resultados de estudos solicitados pelo Ministério Público e pelo Poder Judiciário não se tornem públicos, uma vez que, nesses casos, os relatórios farão parte dos processos que podem ser consultados por pessoas interessadas.

Este artigo objetiva apresentar exemplos de casos de análise de falhas realizados pelo IPT sem, entretanto, expor qualquer cliente. Nesse sentido, muitas informações sobre as investigações, incluindo: procedimentos, dados, cálculos e o próprio cliente, não serão apresentadas.

Os primeiros casos analisados pelo IPT eram, na sua maioria, relacionados a peças contendo defeitos, como trilhos e rodas de trem apresentando defeitos internos ou superficiais, solda inapropriada em peças temperadas e revenidas e, assim por diante. É importante lembrar que, naquele tempo, o único ensaio não destrutivo disponível era a inspeção visual. A radiografia, partículas magnéticas, correntes de Foucault, ensaio por ultrassom e outros ensaios não destrutivos, que hoje asseguram a sanidade de peças e estruturas, ainda não tinham sido desenvolvidos ou não estavam, facilmente, disponíveis.

A análise química e os ensaios mecânicos eram usados em controle de qualidade, mas eles eram incapazes de determinar se uma peça apresentava defeito ou não. A metalografia podia, e ainda pode, determinar defeitos internos como rechupes e poros em fundidos e defeitos de superfície como dobras de forjamento e laminação, mas uma vez que a metalografia é destrutiva, ela não poderia ser aplicada a peças que seriam colocadas em serviço.

Por outro lado, a metalografia era e, ainda é, um dos recursos mais poderosos na análise de falhas. No passado, muitas falhas atribuídas à qualidade do material ou do processamento podiam ser, facilmente, identificadas pela metalografia, o que ainda é possível nos dias de hoje.

A aplicação da microscopia eletrônica de varredura, que começou a ser utilizada na análise de falhas em torno de 1960, no IPT nos anos 1970, causou uma revolução porque ela não apenas tornou possível determinar os micromecanismos de fratura, mas também pode proporcionar a análise química localizada de precipitados, inclusões e produtos de corrosão ou oxidação, quando equipada com EDS e WDS. Outras técnicas como difração de raios X, espectroscopia Auger e microscopia eletrônica de transmissão também podem ser utilizadas na análise de falhas, mas a solução da maioria dos casos não as requer.

Atualmente, muitas indústrias aplicam regras severas de controle de qualidade, na produção em massa de diversas peças usadas em diferentes aplicações, reduzindo muito a possibilidade de falhas. Contudo, isso não se aplica a peças grandes ou estruturas que, na maioria das vezes, são produzidas em pequenas quantidades e, de vez em quando, são únicas. Nesses casos, além das propriedades do material, a avaliação da qualidade é aplicada individualmente, a cada peça ou estrutura.

2 Estudos de caso

É impossível elaborar uma amostra de estudos de casos de análise de falhas abrangendo toda sorte de materiais, estruturas e componentes mecânicos analisados pelo IPT. Os estudos de caso que serão apresentados neste artigo não são, necessariamente, os mais importantes, mas foram escolhidos porque são ícones relevantes para a história desse tipo de análise, uma vez que um dos autores fez parte das primeiras equipes que a realizaram. A escolha sobre o que apresentar não foi fácil, porque ao longo do seu período de existência, o IPT analisou falhas para diferentes tipos de indústria.

A seguir, é apresentada uma lista ilustrativa de alguns ramos da indústria para os quais o IPT tem realizado análise de falhas:

- Implementos agrícolas;
- Transporte aéreo;
- Automobilístico;
- Cimento;
- Químico;
- Construção civil;
- Energia elétrica;
- Alimentos;
- Metalúrgico;
- Mineração;
- Oleo e gás;
- Petroquímico;
- Celulose e papel;
- Ferrovia;
- Siderurgia; e
- Açúcar e álcool.

2.1 Estudos de caso relacionados a ferrovias e trens

2.1.1 Trincamento longitudinal de um trilho devido a tensões residuais

Como mencionado, anteriormente, as ferrovias foram as primeiras empresas a solicitar análises de falha ao IPT. Há tantos casos que seria impossível enumerá-los e apresentá-los em um único artigo. As fraturas por fadiga de trilhos, iniciada em *flakes* de hidrogênio (olho de peixe) e a fratura frágil de rodas, iniciada em trincas superficiais, causada pelo aquecimento localizado devido ao atrito, quando a roda travada pela frenagem escorrega sobre o trilho, costumavam ocorrer, frequentemente, no passado.

Um trincamento longitudinal surpreendente ao longo da alma de um trilho durante a montagem na via, causado por tensões residuais, precisa ser divulgado para se tornar inesquecível (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1981a). A **Figura 1** mostra um trilho temperado, localmente, no boleto que trincou durante a sua montagem na via. O trilho estava sendo cortado, transversalmente, quando subitamente trincou, longitudinalmente, ao longo da alma, em consequência de tensões residuais. Os detalhes (A) e (B) da **Figura 1** mostram o deslocamento de, aproximadamente, 600 mm, entre as faces opostas da trinca na região do corte.

As setas no detalhe (C) apontam para o centro de curvatura adquirido pelo boleto e pelo patim após o trincamento. O deslocamento entre as faces opostas da trinca e a curvatura adquirida pelo boleto e pelo patim ocorreram em consequência do alívio das tensões residuais, provavelmente, introduzidas no tratamento térmico de endurecimento do boleto e no endireitamento a frio posterior a esse. O detalhe (D) apresenta a macrografia de uma seção transversal do trilho mostrando a profundidade da têmpera localizada na região do boleto.

2.1.2 Trilho fraturado devido ao hidrogênio absorvido durante o processo de fabricação do aço

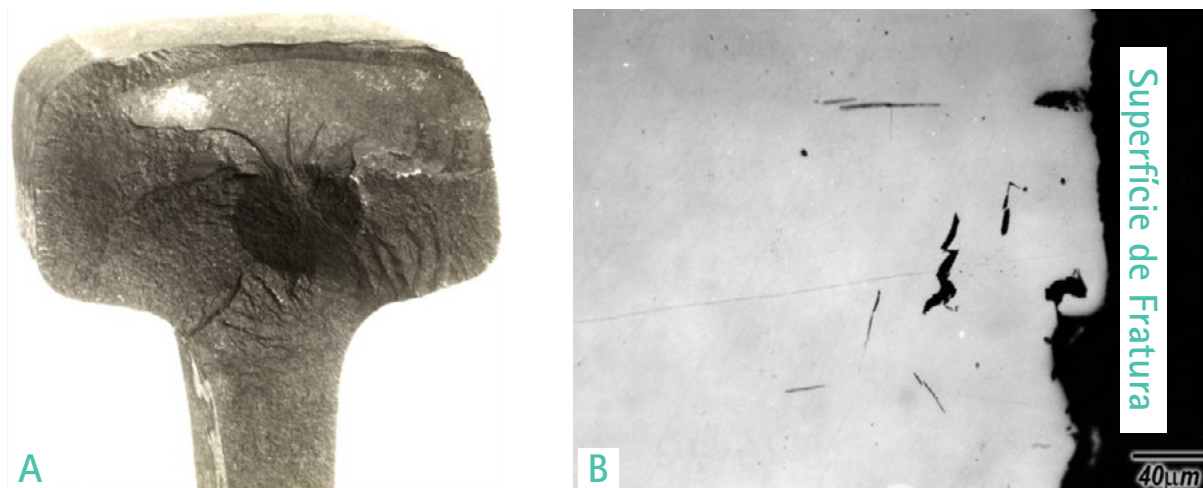
A **Figura 2** mostra a fratura transversal de um trilho, ocorrida em consequência da fragilização pelo hidrogênio devido à degaseificação deficiente durante o processamento do aço (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1981b). A análise metalográfica de uma seção perpendicular à região escura de formato, aproximadamente, elíptico no centro do boleto do trilho, conhecida como "olho de peixe" (AMERICAN SOCIETY FOR METALS HANDBOOK COMMITTEE, 1975; POLUSHKIN, 1956), observada na **Figura 2 (A)**, apresentou *flakes* de hidrogênio mostrados na **Figura 2 (B)**. A carga vertical alternada aplicada ao trilho devido ao trânsito normal de trens causou a propagação de fadiga dentro do boleto, a partir da região do "olho de peixe". A fratura ocorreu quando a trinca atingiu o tamanho crítico.

Figura 1 – Aspecto de um trilho trincado, longitudinalmente, ao longo da alma durante o corte da seção transversal. (A) e (B) Observe o deslocamento ocorrido após o trincamento do trilho. A região que estava sendo cortada está envolvida pelo círculo azul. (C) Sob esse ângulo de visão é possível observar a curvatura ocorrida do lado do boleto e do lado do patim do trilho, cujos centros de curvatura apontam para sentidos opostos. (D) Aspecto da macroestrutura de uma seção transversal do trilho mostrando região tratada, termicamente, do boleto.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1981a)

Figura 2 – Aspecto de um trilho fraturado, transversalmente, em consequência de fragilização por hidrogênio. (A) A área circular no bolete do trilho, conhecida como "olho de peixe", ocorre quando o hidrogênio dissolvido no aço no estado líquido não é apropriadamente eliminado durante o refino do aço. (B) Essa micrografia, obtida de uma seção passando pela região do "olho de peixe", apresenta trincas internas conhecidas como *flakes* de hidrogênio.

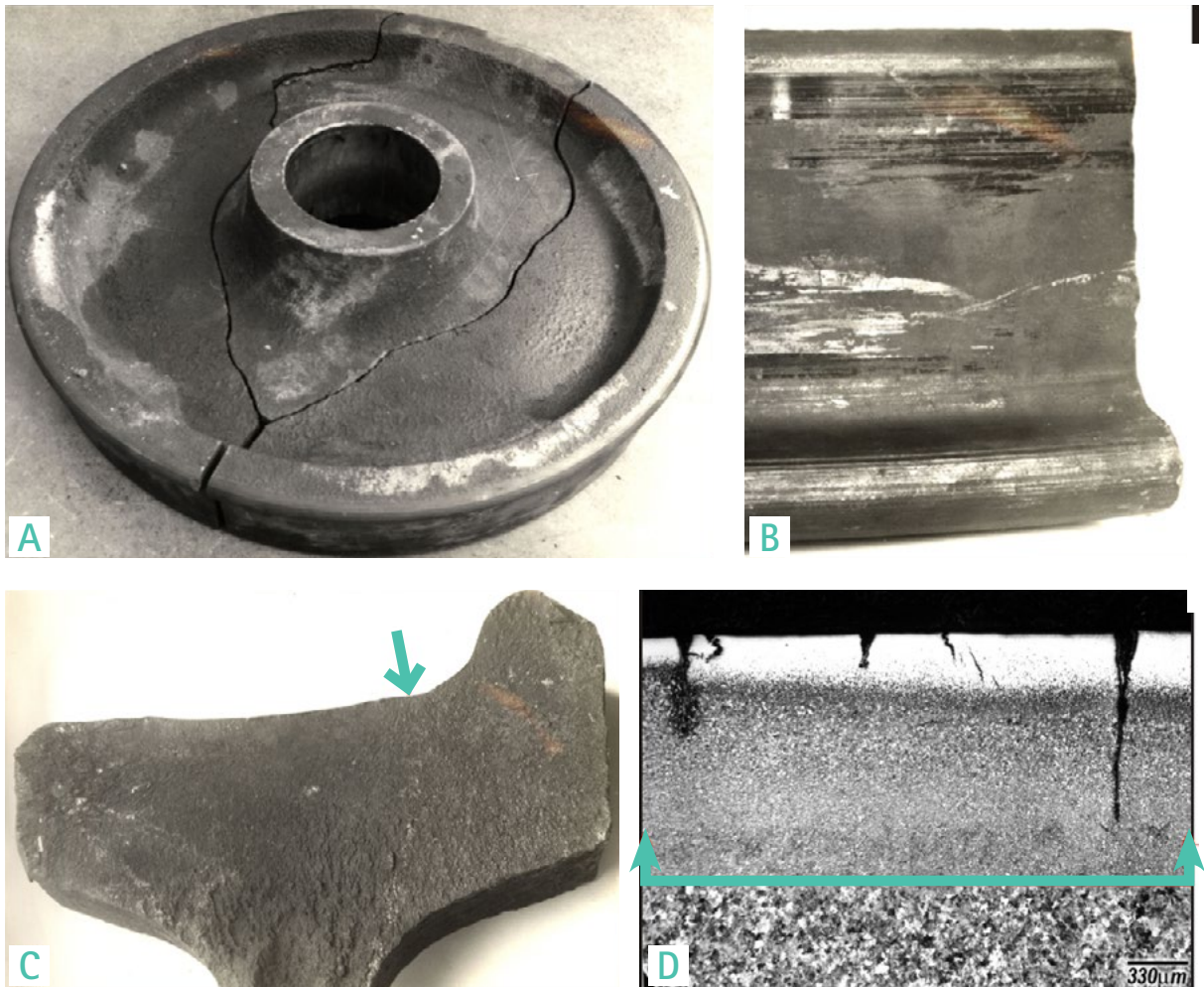


Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológica (1981b)

2.1.3 Fratura de uma roda devido a trincas térmicas na superfície de rolamento

A **Figura 3** apresenta uma roda de trem fraturada em consequência de trincas térmicas na superfície de rolamento (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1981c). O travamento da roda ocorrido durante a frenagem fez com que a roda deslizasse sobre o trilho. A camada branca observada na **Figura 3 (D)** é constituída de martensita não revenida causada pelo aumento de temperatura proveniente do calor gerado pelo atrito entre as superfícies da roda e do trilho. O aquecimento aumentou a temperatura da superfície da roda até o campo austenítico. O resfriamento brusco causado pela drenagem de calor da superfície de rolamento para o corpo da roda causou o trincamento. A fratura se iniciou em uma dessas trincas.

Figura 3 – (A) Aspecto geral da roda fraturada. A fratura iniciou-se na superfície de rolamento, propagou-se ao longo do aro e bifurcou em torno do cubo. (B) Pode-se observar riscamento na superfície de rolamento da roda. (C) Aspecto da superfície de fratura. A seta aponta para a região de início da fratura. (D) Microestrutura de uma seção normal à superfície de fratura. As trincas iniciadas na superfície da roda devido ao choque térmico propagaram-se em consequência de fadiga térmica e/ou fadiga termomecânica. Acima da linha azul, encontra-se a zona afetada pelo calor produzido pelo atrito entre a roda e o trilho. Abaixo da linha azul, o material apresenta microestrutura regular para uma roda, constituída de perlita. Ataque: Nital.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1981c)

2.1.4 Fratura de uma roda devido a uma marca de identificação muito aguda

A **Figura 4 (A)** apresenta uma roda de trem fraturada em consequência de um defeito de fabricação (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1980). A concentração de tensões causada pela marca de identificação muito aguda, observada na **Figura 4 (B)**, proporcionou condições para iniciação de uma trinca de fadiga. Quando a trinca de fadiga, evidenciada pelas marcas de praia observadas na **Figura 4 (C)**, atingiu o tamanho crítico, a roda a sofreu uma fratura brusca.

Figura 4 – (A) Vista geral de uma roda fraturada. Pode-se observar que o cubo se destacou da roda. Aspecto da lateral do aro (friso) onde os números e letras de identificação foram puncionados. Pode-se observar que a fratura passa através de uma das marcas de identificação. (C) A área delineada pelo círculo em azul mostra marcas de praia de fadiga avançando a partir da extremidade da marca de identificação. Marcas radiais típicas de fratura frágil propagaram-se a partir da área de fadiga.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1980)

2.1.5 Trincamento de uma junta soldada de topo de trilho devido a causas múltiplas

A **Figura 5** mostra uma junta soldada de topo de trilho trincada em serviço e removida da via antes de fraturar (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS, 1990). A **Figura 5 (A)** mostra o aspecto da junta após ensaio com líquido penetrante. Pode ser visto que a trinca apresenta um padrão quase simétrico em relação à solda, em que uma trinca longitudinal bifurca em ambas as extremidades. A **Figura 5 (B)** mostra o aspecto da superfície exposta da trinca após o trilho ter sido, apropriadamente, cortado.

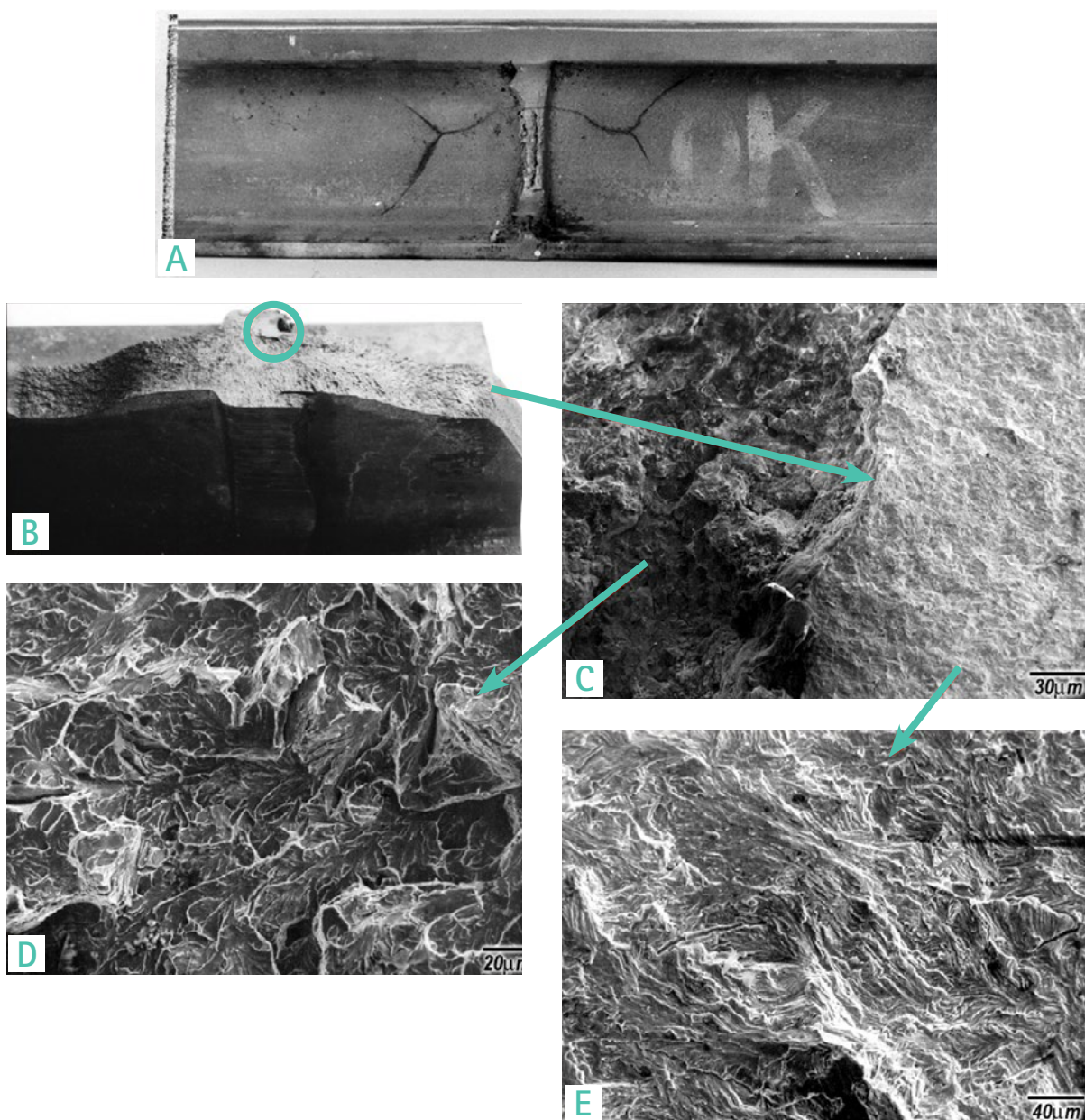
A região demarcada pelo círculo apresenta um defeito na rebarba da solda que desencadeou o processo de falha. Inicialmente, uma pequena trinca de fadiga iniciada no defeito tornou-se instável e sofreu uma propagação longitudinal brusca. As tensões responsáveis por essa etapa foram devidas à combinação da tensão causada pela componente lateral da carga aplicada pela roda sobre o trilho e da tensão residual devido à falta ou ineficiência de alívio de tensões após a soldagem.

A propagação da trinca longitudinal parou quando o alívio de tensões causado pelo seu próprio avanço fez com que tensão responsável por esse baixasse a ponto de interromper a propagação. Depois dessa etapa, o trilho ficou menos rígido permitindo o desenvolvimento de quatro trincas de fadiga, duas de cada lado. A **Figura 5 (C)** mostra a intersecção entre a trinca longitudinal e uma das duas trincas de fadiga que propagaram em direções a, aproximadamente, 45° da trinca longitudinal. A partir da **Figura 5 (C)** duas setas apontam para duas fotos de imagens de elétrons secundários, obtidas em um microscópio eletrônico de varredura.

A **Figura 5 (D)** apresenta o aspecto microfractográfico da superfície da trinca longitudinal que mostra clivagem e a **Figura 5 (E)** apresenta o aspecto microfractográfico da trinca inclinada que mostra estrias de fadiga. O processo completo pode ser descrito como a iniciação de uma pequena trinca de fadiga em um defeito de solda, causada pela combinação da tensão provocada pela carga lateral do trilho e da tensão residual proveniente da solda, que cresceu até atingir o K_{Ic} do material, gerando a trinca longitudinal. A trinca longitudinal parou devido ao alívio da tensão residual causado pelo seu próprio avanço. Após isso, o momento de torção devido à componente lateral da carga aplicada pelas rodas no trilho causou duas trincas de fadiga iniciadas em cada uma das extremidades da trinca longitudinal.

Esse é um caso em que não ocorreu nenhum acidente porque a trinca foi detectada em uma inspeção por ultrassom da via antes do trilho fraturar. A solução para o problema requereu um melhor controle de qualidade da solda, no sentido de evitar ou remover defeitos, o alívio de tensões após a soldagem, para reduzir a possibilidade de trincamento e, a inspeção periódica da via por ensaios não destrutivos, para detectar eventual ocorrência de trincamento em serviço.

Figure 5 – (A) Vista geral da junta soldada. As trincas foram reveladas por líquido penetrante. (B) Aspecto da superfície exposta da trinca horizontal e de uma trinca inclinada. A região marcada pelo círculo indica um defeito de solda e, em torno dele, uma pequena área uniforme e plana de fadiga. As marcas de sargento observadas na superfície da trinca longitudinal apontam para a região da solda. (C) Essa fotografia tirada com pequeno aumento em microscópio eletrônico de varredura mostra a aresta entre a trinca longitudinal e a trinca inclinada inferior direita. (D) imagem de elétrons secundários da superfície da trinca longitudinal mostrando clivagem. (E) imagem de elétrons secundários da superfície da trinca inclinada mostrando estrias de fadiga.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1990)

2.2 Casos relacionados com equipamentos siderúrgicos

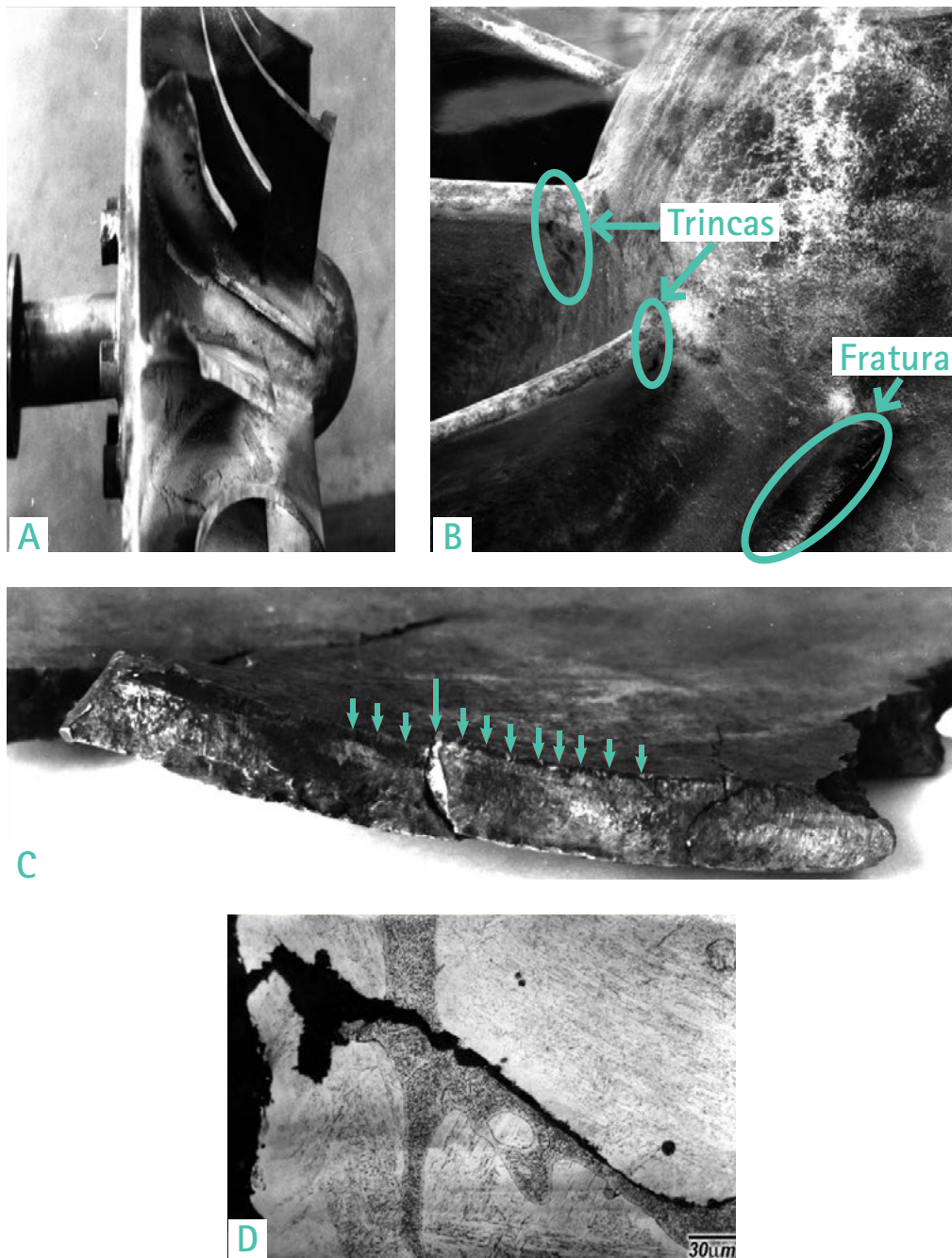
2.2.1 Corrosão fadiga em um rotor do primeiro estágio de um turbo compressor de fábrica de oxigênio

O rotor do primeiro estágio de um compressor da fábrica de oxigênio de uma companhia siderúrgica, que teve suas pás fraturadas, trabalhava em ambiente severo devido à poluição (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1979). O rotor foi fabricado de aço CB-7Cu, a versão fundida do aço inoxidável endurecível por precipitação 17-4-PH. A **Figura 6 (A)** mostra o aspecto geral do rotor e na **Figura 6 (B)** podem ser observadas duas trincas detectadas por líquido penetrante na base das pás, ao lado da pá fraturada. A **Figura 6 (C)** mostra, na superfície de fratura da pá destacada do rotor, degraus típicos de trincas de fadiga iniciadas em regiões de concentração de tensões. A **Figura 6 (D)** mostra a micrografia de uma seção tomada por meio de uma trinca iniciada em um pite de corrosão na superfície da pá.

A análise por WDS realizada no produto de corrosão realizada em microsonda eletrônica JEOL modelo JXA-50A revelou a presença dos elementos oxigênio (O), enxofre (S) e Cloro (Cl) dentro do pite. A análise de uma suspensão aquosa preparada com 5 % do resíduo sólido removido do interior da carcaça do rotor resultou em um pH 2,7 e concentração de cloreto e sulfato de 0,07 % e 50,2 %, respectivamente. A usina siderúrgica se situava próxima ao oceano, o ar apresentava alta concentração de SO₂ e, antes de ser comprimido, o ar era apenas filtrado a seco.

A umidade e o sal proveniente da maresia, associados ao SO₂ gerado no alto forno e na coqueria, proporcionaram a condensação de uma solução corrosiva dentro da câmara de compressão, durante o processo. Uma vez que a corrosão por pite é favorecida pela exposição do aço à água contaminada estagnada, é provável que esta tenha ocorrido em períodos em que o compressor estivesse desligado. Os pites resultantes se tornaram concentradores de tensão responsáveis por diversos pontos de iniciação de fadiga indicados pelos degraus na superfície de fratura apresentada na **Figura 6 (C)**.

Figura 6 – (A) Vista geral do rotor mostrando pás fraturadas; (B) Duas trincas detectadas por meio do ensaio de líquido penetrante em pás fraturadas. (C) Aspecto visual da superfície de fratura. As setas apontam para degraus na superfície de fratura típicos de fadiga iniciada em pontos de concentração de tensões. O degrau indicado pela seta mais longa indica uma região onde duas frentes de propagação de fadiga se juntaram. (D) Aspecto microestrutura de uma seção que cruza uma trinca, mostrando uma trinca se propagando a partir de um pite de corrosão.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1979)

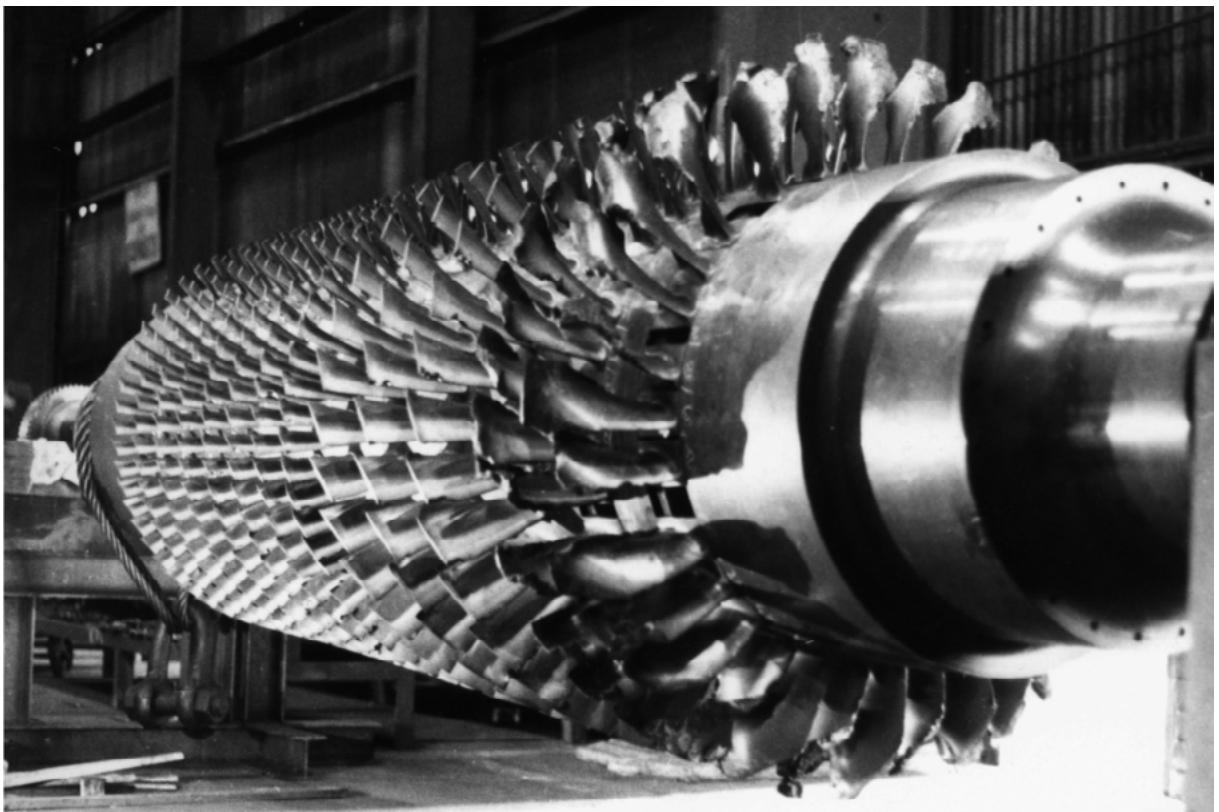
2.2.2 Fratura das palhetas de um compressor axial que alimentava coppers

A fratura de algumas palhetas de aço similar ao AISI 310 do rotor de um compressor axial quase causou o congelamento de um alto forno (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1991a). O compressor era usado para alimentar os coppers que preaquecem o ar que alimenta as ventaneiras do alto forno.

A companhia siderúrgica possuía apenas dois compressores axiais para o serviço e o outro que estava programado para manutenção não poderia parar antes de o compressor falhado ser consertado ou substituído. Se o acidente do primeiro compressor ocorresse logo após a parada do segundo compressor, o suprimento de ar para o alto forno seria interrompido condenando-o ao congelamento.

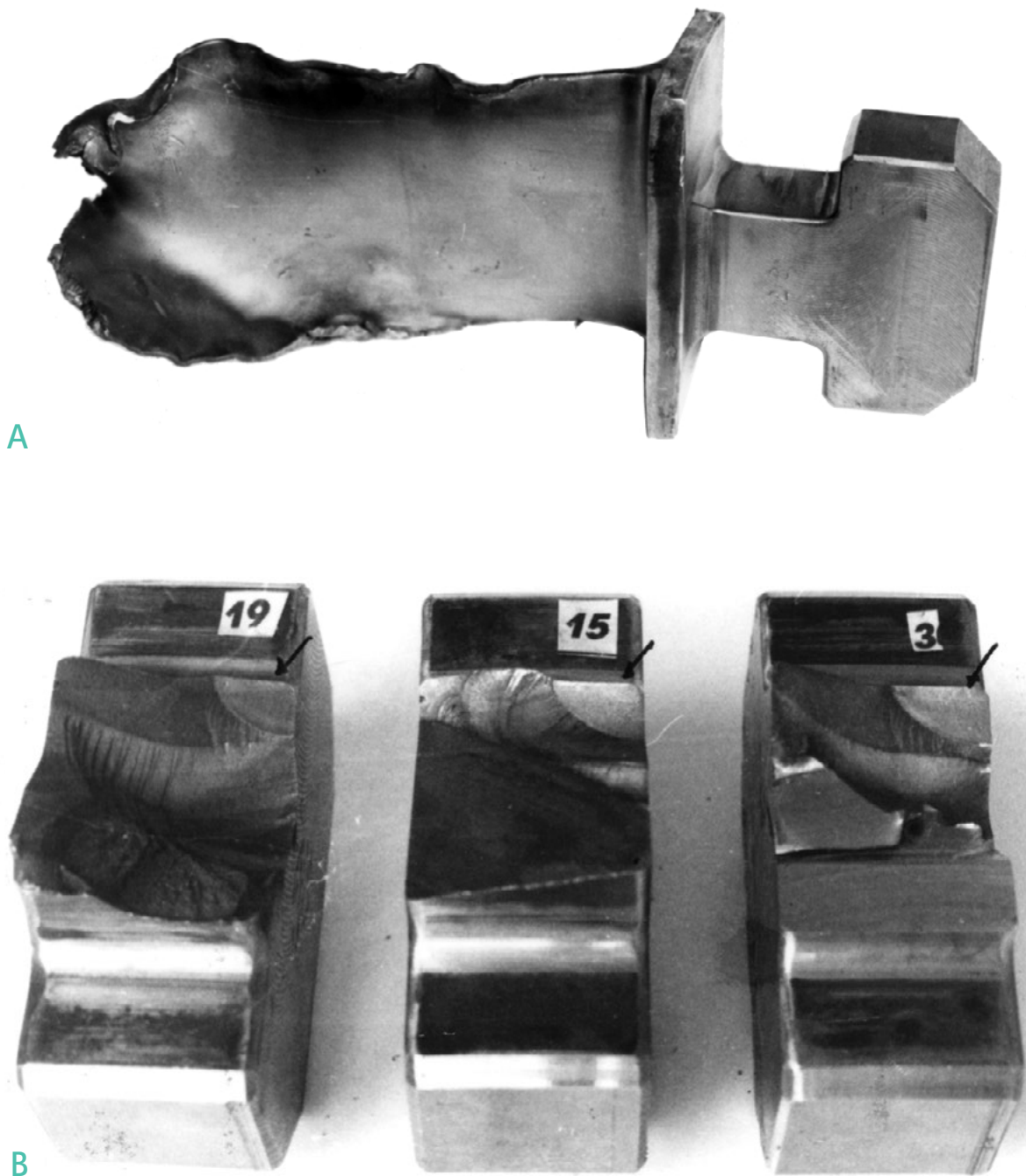
A **Figura 7** mostra o aspecto geral do rotor do compressor após a falha. Seis palhetas sofreram fratura, três do primeiro estágio e três do segundo estágio de compressão. Os pedaços das palhetas destacadas atingiram outras palhetas danificando não apenas aquelas fixas ao rotor, mas também, as palhetas estacionárias fixadas à carcaça do compressor. A **Figura 8** mostra o aspecto típico da fratura ocorrida nas palhetas.

Figura 7 – Aspecto geral do rotor do compressor axial que sofreu falha.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1991a)

Figura 8 – (A) Aspecto de uma palheta do primeiro estágio do compressor danificada devido ao impacto contra palhetas fraturadas. (B) Aspecto da superfície de fratura de três palhetas apresentando padrão similar A setas apontam para a fratura de três palhetas iniciadas próximo à aresta formada pela intersecção entre as superfícies do pescoço e da fratura.

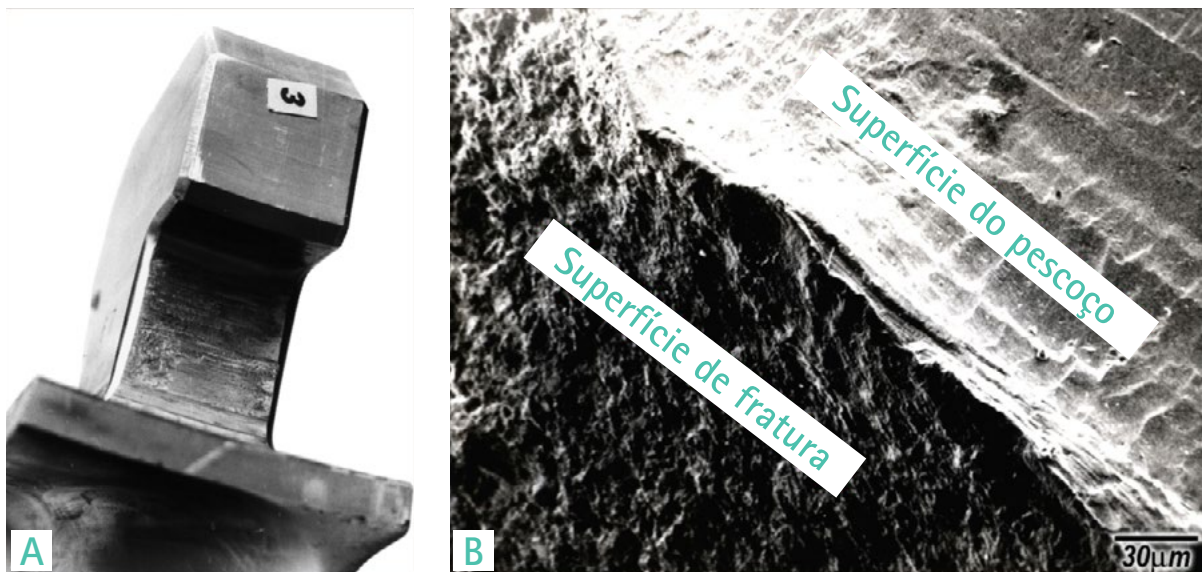


Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1991a)

O exame das superfícies de fratura apresentadas na **Figura 8** mostra que essas ocorreram em consequência de fadiga. A **Figura 9 (A)** mostra o aspecto típico da superfície do pescoço das palhetas que estava em contato com o entalhe de montagem do eixo do rotor. A superfície do pescoço estava danificada por *fretting* causado por micromovimentos entre a palheta e o eixo devido à vibração ocorrida em serviço. O mesmo dano foi observado na superfície do pescoço de todas as palhetas dos estágios I e II. A **Figura 9 (B)** mostra a imagem de elétrons secundários típica da intersecção entre a superfície do pescoço da palheta e a superfície de fratura. O dano causado pelo atrito sobre a superfície da palheta é observado.

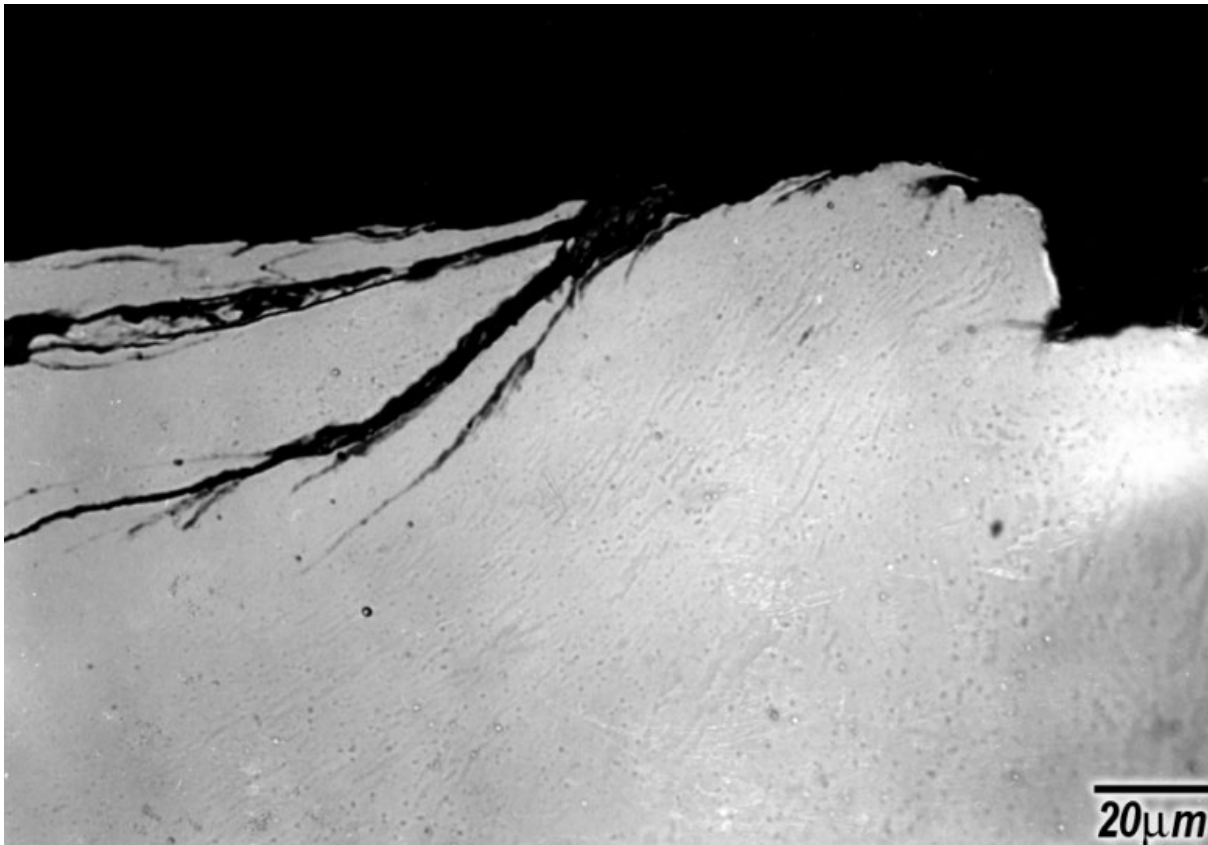
As dobras de deformação, mostradas na **Figura 10**, foram observadas em uma seção perpendicular à aresta entre as superfícies de fratura e da palheta mostrada na **Figura 9**. Essas dobras de deformação foram causadas pelo *fretting*.

Figure 9 – (A) Aspecto da superfície do pescoço de uma palheta mostrando riscamento causado pelo atrito contra a superfície do rasgo do eixo. (B) Imagem de elétrons secundários de microscópio eletrônico de varredura na região de intersecção entre a superfície de fratura e a superfície do pescoço, mostrando danos causados pelo atrito sobre a superfície do pescoço.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1991a).

Figura 10 – Aspecto de uma seção observada por microscopia óptica perpendicular à aresta entre as superfícies de fratura e do pescoço da palheta apresentada na Figura 9 (B), mostrando dobras de deformação na superfície do pescoço. Sem ataque.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1991a)

A principal causa da fratura foi o vão muito pequeno entre o pescoço da palheta e o rasgo na superfície do eixo, que permitiu o contato entre as superfícies e, conseqüentemente, o fretting. A tensão responsável pela fadiga foi devido à vibração combinada com a tensão causada pela carga radial produzida pela força centrífuga sobre as palhetas estimada em cerca de 40 % do limite de escoamento do material (520 MPa), para a palhetas do estágio I do compressor.

2.3 Um exemplo de ruptura de recipientes para gases liquefeitos

Muitos gases sob pressão estão em equilíbrio nos estados líquido/gás à temperatura ambiente. Nesses casos, o volume do recipiente é preenchido com uma massa de produto, parcialmente, nos estados líquido e gasoso. Uma vez que há gás e líquido dentro do recipiente, a pressão interna é a pressão de vapor da substância para a temperatura em que ela é mantida. Nessa condição (volume constante), o aumento de temperatura aumenta o volume da fração de líquido da substância e a redução de temperatura a reduz.

Se o recipiente for sobrecarregado, é possível que todo o seu volume seja preenchido com líquido. Pode-se encontrar em manuais de termodinâmica que a compressibilidade dos diversos líquidos é muito menor do que a compressibilidade dos gases. Se o recipiente for totalmente preenchido com líquido, sua expansão, devido ao aquecimento, causará um aumento de tensão muito maior do que se estivesse preenchido com líquido em equilíbrio com gás à mesma temperatura.

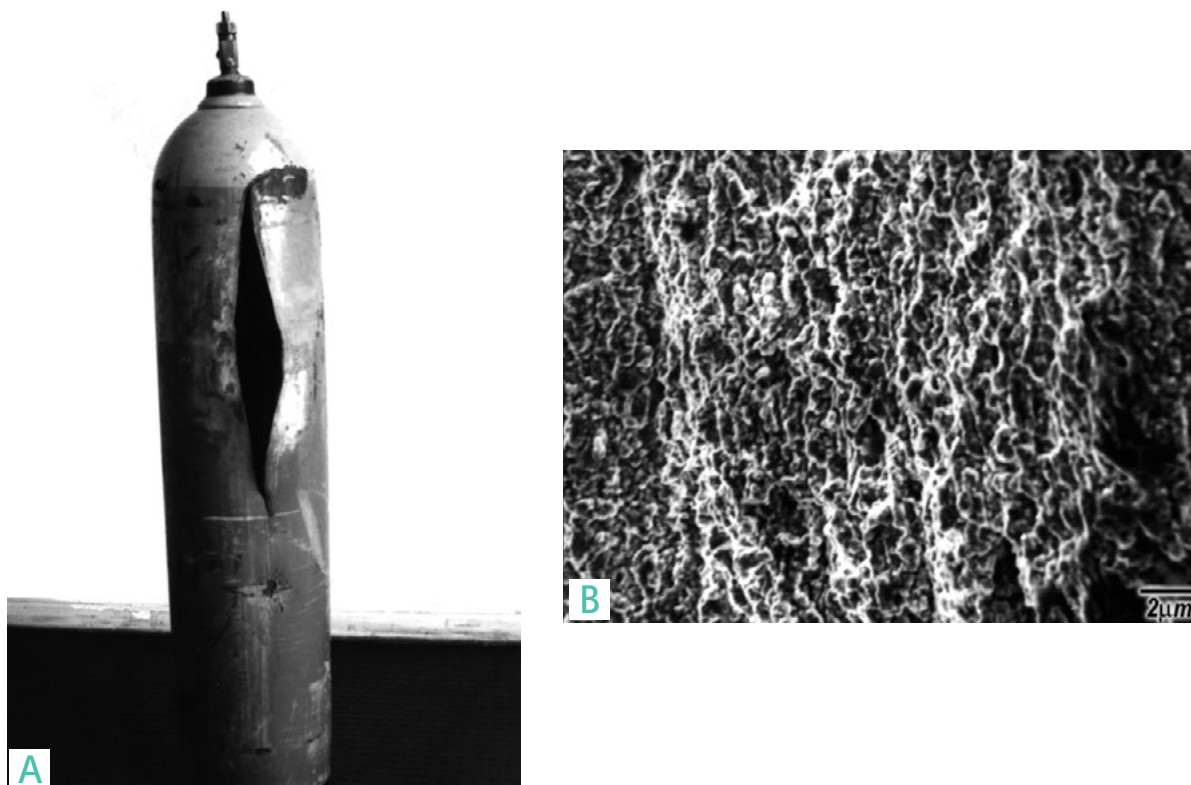
Normalmente, para evitar sobrepessão, o recipiente é equipado com válvulas de segurança. Há diferentes tipos de válvulas de segurança, as limitadas por pressão e as limitadas por temperatura. As válvulas que abrem acima de uma pressão definida podem ser, simplesmente, discos de ruptura fabricados de materiais com espessura e resistência definida, que uma vez rompidos liberam todo o gás do interior do recipiente.

Outro tipo de válvula de segurança limitada por pressão é provida de uma mola que a mantém fechada até que a força oposta de abertura devido à pressão interna supere a força de fechamento aplicada pela mola. Uma vez aberta, a válvula alivia a pressão excessiva e se fecha. Há também, entre outros tipos, válvulas controladas por temperatura fabricadas com ligas de baixo ponto de fusão que se fundem ao atingi-lo, liberando todo o gás.

A **Figura 11 (A)** apresenta um cilindro para gás cloro que, após ser exposto ao sol durante um dia de verão sobre a caçamba de um caminhão, sofreu uma ruptura súbita (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1991b).

A inalação do gás por uma pessoa que estava perto do cilindro a levou à morte. A análise do material não revelou qualquer problema na qualidade do cilindro e a fratura se apresentou 100 % dúctil, conforme pode ser observado pela deformação macroscópica mostrada na **Figura 11 (A)** e, microscopicamente, pelos alvéolos revelados na imagem de elétrons secundários apresentada na **Figura 11 (B)**.

Figura 11 – (A) Aspecto do cilindro após a ruptura. Pode se observar que a ruptura foi acompanhada de deformação plástica macroscópica. (B) Imagem de elétrons secundários da superfície de fratura observada em um microscópio eletrônico de varredura. A fratura é constituída apenas de alvéolos.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1991b)

O volume do cilindro era de 50 litros e poderia ser preenchido com até 68 kg de gás cloro. O cloro é uma substância que, como o GLP e o CO_2 sob pressão, pode ser mantido liquefeito na temperatura ambiente. À temperatura constante, a pressão é mantida constante enquanto houver líquido e gás, simultaneamente, dentro do recipiente. O problema ocorreu porque o cilindro estava sobrecarregado levando-o a ficar, totalmente, preenchido com cloro no estado líquido, apesar de estar equipado apenas com uma válvula de segurança fusível que se abriria apenas quando a temperatura atingisse 70 °C.

Devido ao cilindro estar muito cheio, ele atingiu a pressão de ruptura muito antes que temperatura de fusão da válvula fosse atingida. Cálculos no relatório demonstraram que uma sobrecarga de 5 kg de cloro seria suficiente para levar o material do cilindro ao limite de escoamento ao atingir 30 °C. Outros cilindros do mesmo lote foram encontrados com mais 5 kg de sobrecarga suportando a admissão de que o cilindro falhado foi sobrecarregado. A fratura dúctil, a obediência do material às especificações e a ausência de defeitos de fabricação no cilindro indicam que a qualidade do material não poderia ser responsabilizada pela falha.

O uso de uma válvula de segurança inapropriada, a sobrecarga durante o enchimento do cilindro e o calor causado pela exposição ao sol, causaram a ruptura do cilindro. A simples obediência à carga limite e a estocagem apropriada do cilindro de cloro evitariam o acidente.

2.4 Casos relacionados a novos processamentos de materiais

2.4.1 Fratura de uma barra de aço para protensão de concreto

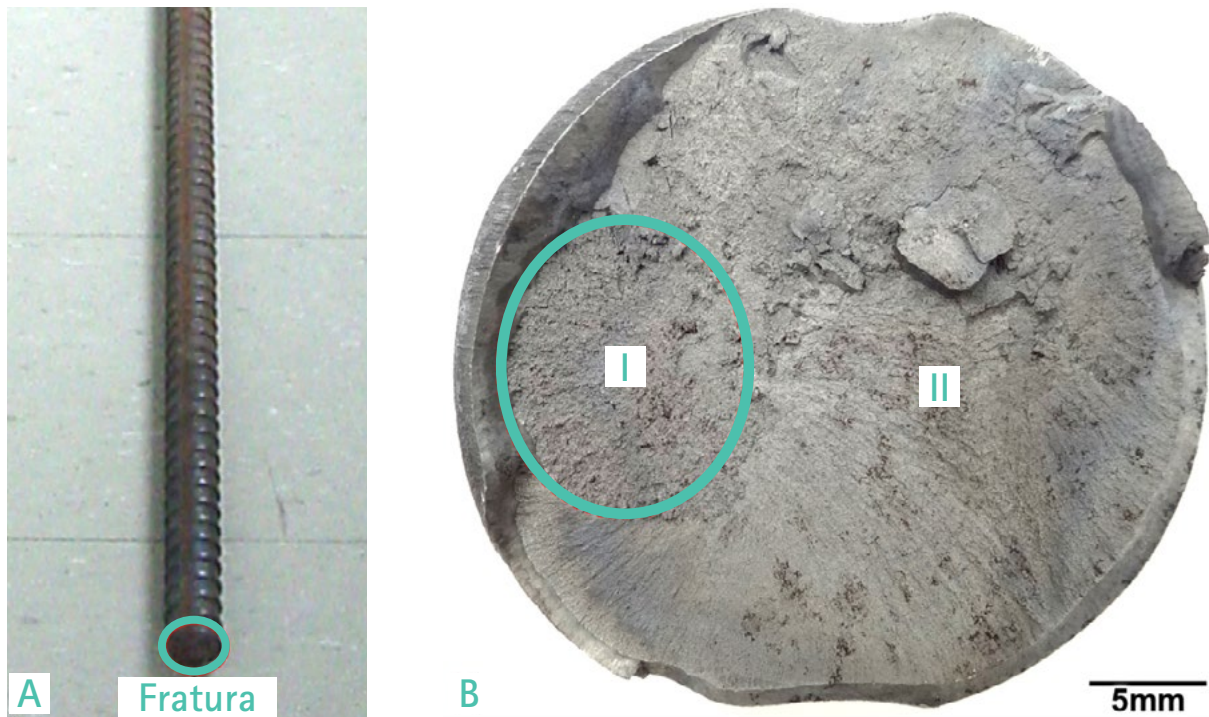
Os processos de fabricação de aço tem se desenvolvido de tal modo que, atualmente, é raro encontrar aços que não obedeçam à composição química especificada. As melhorias nos processos de refino do aço levaram os teores de impurezas como enxofre e fósforo a níveis de, pelo menos, uma ordem de grandeza abaixo do mínimo especificado há muito tempo atrás pelas normas, que continuam válidos até hoje.

No passado, quando fora da especificação, tais impurezas costumavam ser responsáveis pelo baixo desempenho desses materiais. Contudo, há algumas situações em que uma porcentagem muito baixa de enxofre pode se tornar um problema. O enxofre muito baixo pode fazer com que o aço temperado e revenido se torne susceptível a desenvolver um defeito denominado "olho de peixe", devido à ação de baixos níveis de hidrogênio, considerados seguros no passado. Foi descoberto que algum enxofre pode ser útil para proteger o aço contra o hidrogênio (FRUEHAN, 1997). Dependendo da aplicação é possível que seja necessário estabelecer não apenas o teor máximo, mas também o teor mínimo de enxofre.

A **Figura 12 (A)** mostra um vergalhão temperado e revenido usado para protensão de concreto que fraturou devido ao hidrogênio (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2014). A composição química do material obedeceu à especificada pela ISO 6934-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1991), mas o teor de enxofre era de 0,006 %, ou uma ordem de grandeza menor do que o máximo estabelecido (0,040 %). A superfície de fratura mostrada na **Figura 12 (B)** apresenta uma área quase circular, a partir da qual a fratura se propagou.

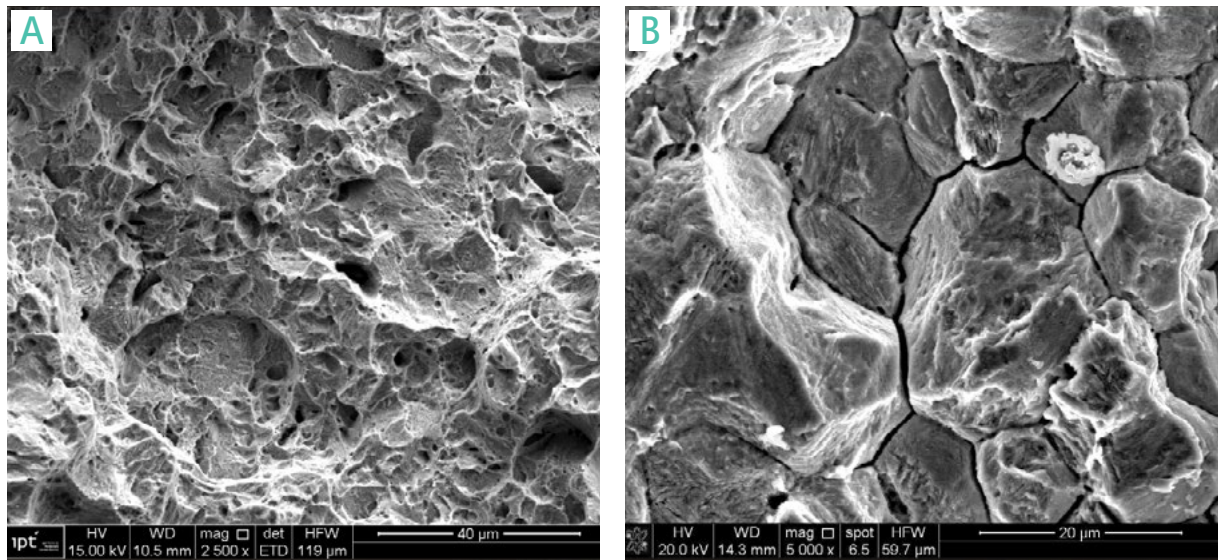
A **Figura 13** mostra imagens de elétrons secundários das regiões I (iniciação da fratura) e II (propagação da fratura) indicadas na **Figura 12 (B)**. A **Figura 13 (A)** mostra que o aspecto da fratura na região I é intergranular com trincas secundárias, típicas de fragilização por hidrogênio. A **Figura 13 (B)** mostra o aspecto da região II da superfície de fratura, constituída de uma mistura de clivagem e alvéolos conhecida como quase clivagem.

Figura 12 – (A) Vergalhão para concreto protendido fraturado. (B) Aspecto da superfície de fratura. A área envolvida pelo círculo do lado esquerdo da superfície de fratura define um "olho de peixe" devido à fragilização por hidrogênio.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2014)

Figura 13 – (A) Aspecto da superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura na região I da Figura 12 (B). Fratura intergranular e trincas intergranulares secundárias. (B) Aspecto da superfície de fratura observada por microscopia eletrônica de varredura a região II da Figura 12 (B). Mistura de clivagem e alvéolos – quase clivagem.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2014)

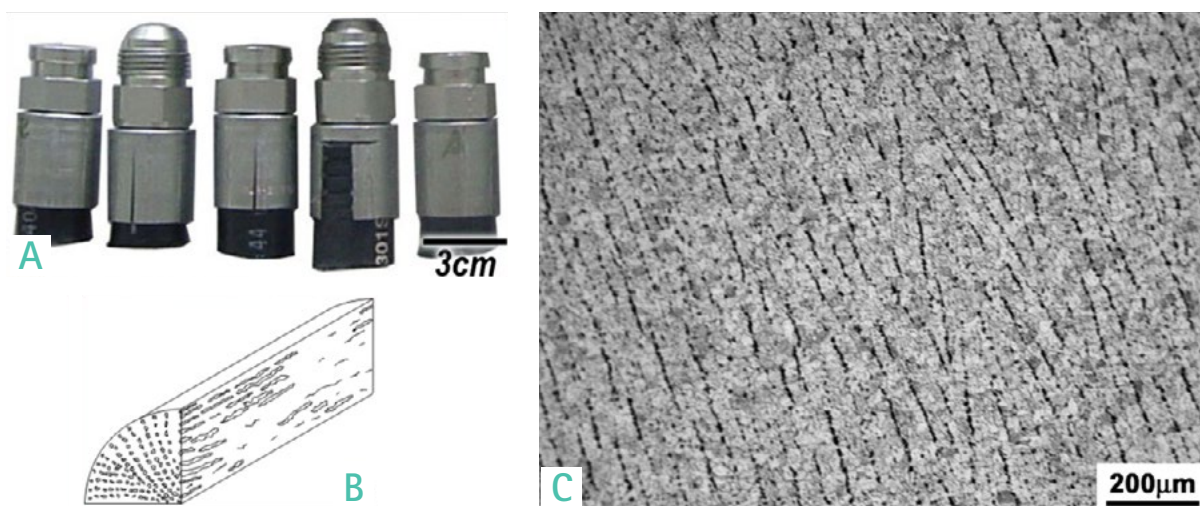
2.4.2 Trincamento de acoplamentos para mangueira de alta pressão

A **Figura 14** mostra outro exemplo de material que teve suas propriedades implícitas reduzidas por um novo processo (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2009). As peças observadas eram acoplamentos para mangueiras de alta pressão. O processo usual de fabricação desses acoplamentos era usiná-los a partir de barras de aço resulfurado. A operação de montagem por meio da cravação do acoplamento costumava ser realizada por um longo tempo sem muitos eventos de trincamento.

Quando o fabricante dos acoplamentos começou utilizar barras de aço resulfurado laminadas a quente a partir de barras obtidas por lingotamento contínuo, o trincamento durante a cravação desses na mangueira começou a se tornar epidêmico. A causa foi a baixa porcentagem de redução de espessura durante a laminação utilizada no novo processo de fabricação do aço que não era alta o suficiente para eliminar a orientação radial das inclusões geradas na solidificação, conforme mostrado na **Figura 14 (B)**.

As barras laminadas passaram em todos os ensaios estabelecidos pelas normas há muito tempo. Contudo, o novo processo de fabricação do aço não apenas causou grãos colunares com crescimento no sentido radial, orientando as inclusões ao longo dos seus contornos, como também não foi capaz de quebrar a orientação das inclusões na direção radial, porque a redução de espessura durante a laminação não era alta o suficiente para isso. A orientação das inclusões nas barras produzidas pelo processo anterior era, predominantemente, longitudinal, ao passo que no novo processo eram também orientadas no sentido radial reduzindo a ductilidade do material na direção perpendicular à radial (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2009).

Figura 14 - (a) Vista geral de alguns acoplamentos. Observe trincas longitudinais em dois deles. (b) Esquema mostrando a orientação das inclusões de sulfeto nas direções, longitudinal e transversal da barra de aço lingotada, continuamente e, laminada a quente (c) Micrografia mostrando a orientação na direção radial observada na seção transversal do acoplamento.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2009)

Outras situações em que atalhos ou mudanças nos processos tradicionais foram responsáveis por falhas têm sido analisadas pela equipe de análise de falhas do IPT. Casos envolvendo materiais que não tiveram a microestrutura, propriamente, homogênea devido à combinação deficiente entre o tratamento térmico e o trabalho a quente não são incomuns. Também não é incomum ter eixos ou outras peças móveis que fraturam devido à fadiga iniciada em defeitos internos relacionados com o lingotamento contínuo de chapas e barras que não sofreram trabalho mecânico suficiente após a fundição.

Os processos clássicos de fabricar chapas, barras e forjados são de alto consumo de energia porque blocos e placas espessas de aço obtidas na usina requerem muito trabalho a quente e

reaquecimento durante as operações de laminação e forjamento. Por mais de meio século, a fundição de lingotes, tarugos e placas tem sido substituída pelo lingotamento contínuo, que não apenas reduz o custo, mas também aumenta a produtividade na fabricação de aço, requerendo muito menos energia nos processos subsequentes de forjamento e laminação.

Placas, barras e tarugos obtidos por lingotamento contínuo não requerem muito trabalho mecânico para atingir o tamanho desejado. Contudo, o extenso trabalho mecânico e reaquecimento requerido nos processos anteriores pode promover uma melhor homogeneização da microestrutura do material do que a obtida por meio do trabalho a quente realizado sobre de placas, barras e tarugos fundidos continuamente.

Devido à menor redução de espessura na laminação e forjamento de placas e barras fundidas, continuamente, a manufatura de alguns produtos usando esse tipo de material pode se tornar mais complicada. O fabricante compra aços que obedecem às especificações estabelecidas por norma há muito tempo. Contudo, os aços produzidos no passado eram processados de tal modo que algumas propriedades implícitas, como resistência ao dobramento ou ao impacto, proporcionadas pelo processo antigo eram superiores às mesmas propriedades de materiais produzidos de acordo com os novos processos.

Uma vez que os materiais produzidos conforme os novos processos atendem as propriedades estabelecidas pela norma (mas não, necessariamente, as propriedades implícitas) o fabricante que usa o aço pagará o ônus da inovação no processo de fabricação do aço, muitas vezes, sendo levado a mudar o processo de manufatura ou o material.

A conclusão é que as técnicas de novos processamentos vieram para ficar. Contudo, para algumas aplicações há, ainda, espaço para materiais processados da forma clássica, principalmente, para aqueles casos em que o custo do material seja desprezível quando comparado com o custo de uma falha.

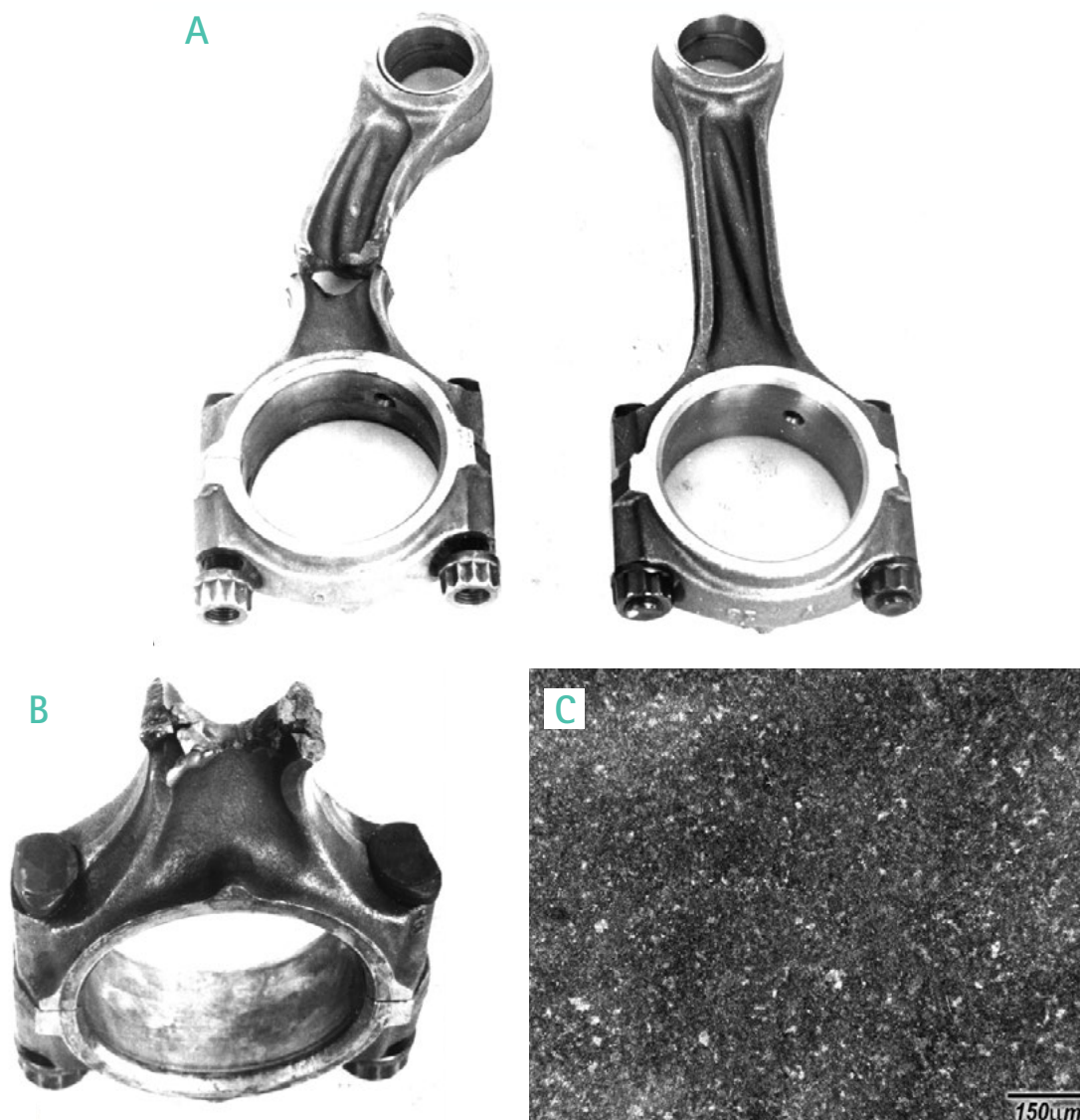
2.5 Poderia ter acontecido com você

Dirigir em áreas com enchente pode trazer um problema, para o qual, muitos motoristas não estão conscientes. A melhor recomendação seria: não tente atravessar uma área inundada, se você tiver escolha. Algumas pessoas tentam atravessar áreas inundadas pisando no acelerador para evitar que o motor morra. Muitas vezes isso funciona, mas se o nível da água estiver alto o suficiente para atingir a admissão de ar, a água será sugada, preenchendo o cilindro do motor e causando um calço hidráulico. O que significa que quando a água estiver no interior do cilindro, o pistão, ao invés de comprimir uma mistura de ar e combustível irá comprimir água líquida. A compressão de líquido impõe uma severa carga de compressão à biela levando-a a flambagem.

A **Figura 15 (A)** mostra duas bielas, à esquerda uma que fraturou após flambar devido a um calço hidráulico e à direita uma biela nova (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1996). A superfície de

fratura mostrada na **Figura 15 (B)** estava muito danificada para ser analisada por MEV. O material apresentou uma microestrutura constituída de martensita revenida, conforme pode-se observar na **Figura 15 (C)** e dureza de 250 HB que atendeu à especificação.

Figura 15 – (A) Aspecto de duas bielas de caminhonete. À esquerda uma que fraturou após flambar devido a um calço hidráulico, à esquerda uma biela nova. As superfícies de fraturam não se ajustam perfeitamente porque após a fratura o motor continuou funcionando danificando-as. (B) Vista da superfície de fratura. (C) A microestrutura do material era constituída de martensita revenida.



Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1996)

Para evitar o calço hidráulico ou a parada do motor, veículos projetados para cruzar cursos de água (normalmente, SUV's e caminhonetes), além de tração nas quatro rodas, têm o filtro de ar e a extremidade de saída dos gases de escapamento, posicionados no topo do veículo.

3 Considerações Finais

Como mencionado anteriormente, apenas poucos exemplos de análises de falhas realizadas pelo IPT foram apresentados neste artigo. Muito a ser dito a respeito de equipamentos e componentes mecânicos que sofreram falha não foi mencionado aqui. Estudos de caso sobre caldeiras, eixos, parafusos, engrenagens, vasos de pressão, fornos, compressores, tanques e uma inúmera quantidade de componentes mecânicos e estruturas foram realizados e seria necessária a publicação de vários artigos como este, ou talvez um livro inteiro, para retratar um dos papéis do IPT no desenvolvimento tecnológico do Brasil.

Alguém poderia dizer que a análise de falhas não seria necessária se o processamento dos materiais e o controle de qualidade fossem perfeitos, bem como o projeto, a manufatura e a construção. Contudo, a história tem demonstrado que apesar de todas as melhorias no processamento dos materiais e no controle de qualidade, algumas vezes falhas podem ocorrer em consequência, exatamente, de algum tipo de inovação.

A análise por elementos finitos é um poderoso recurso em projeto, mas algumas vezes os projetistas cometem erros, negligenciando importantes *inputs* no programa. Outras vezes, o projeto é perfeito, mas falhas podem ocorrer devido à manufatura e à construção.

Muito deve ser feito a fim de prevenir falhas. Controle de qualidade, manutenções preventiva e preditiva, inspeção periódica e monitoramento permanente por meio de instrumentação apropriada são metodologias capazes de levar a ocorrência de falhas a um número desprezível.

Na maioria dos casos de falhas, alguém falhou em um, ou mais, dos requisitos citados, mostrando o efeito da ação humana para provocar ou prevenir falhas. Isso demonstra a importância de políticas afirmativas de educação continuada, não apenas melhorando a capacidade técnica, mas também as fazendo atentas e aptas a assumir suas responsabilidades, porque um elo fraco apenas é suficiente para quebrar uma corrente.

4 Agradecimentos

Aos meus mentores Paulo Sérgio Carvalho Pereira da Silva e Tibério Cescon (*in memoriam*) por me mostrarem como identificar o que importa e o que não importa em análise de falhas, sempre trilhando um caminho baseado na ética. Ao IPT, onde eu construí a minha experiência profissional, por oportunizar a produção deste artigo. A Vanessa Yumi Nagayassu Ferrari por me produzir cópias digitais de fotografias de relatórios antigos.

5 Referências

AMERICAN SOCIETY FOR METALS HANDBOOK COMMITTEE. **Metals Handbook**. 8th. ed. Metals Park, OH: ASM, 1975. v. 10, p. 61.

COLPAERT, H. **Metalografia macrográfica e micrográfica dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: IPT, 1951. (Boletim 40).

FRUEHAN, R. J. A review of hydrogen flaking and its prevention. **Iron & Steelmaker**, v. 24, n. 8, p. 61-69, Aug. 1997.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 15.505**. São Paulo: IPT, 1981a.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 15.935**. São Paulo: IPT, 1981b.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 15.622**. São Paulo: IPT, 1981c.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 13.968**. São Paulo: IPT, 1980.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 28.484**. São Paulo: IPT, 1990.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 12 559**. São Paulo: IPT, 1979.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 29.564**. São Paulo: IPT, 1991a.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 28.941**. São Paulo: IPT, 1991b.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 138.657-205**. São Paulo: IPT, 2014.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 108.180-205**. São Paulo: IPT, 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Relatório Técnico Confidencial do IPT nº 33.898**. São Paulo: IPT, 1996.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6934-1**: Steel for the prestressing of concrete – General requirements. Geneve: ISO, 1991.

ITO, H. L. Metalografia – 100 anos no Brasil. **Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v. 63, p. 573-78, nov. 2007.

POLUSHKIN, E. P. **Defects and failures of metals – their origin and elimination**. Amsterdam: Elsevier, 1956. p. 177-189.

PUJOL, H. G. Noções elementares de metallographia microscopica e analyse thermica. **Revista Polytechnica**, São Paulo, n. 39-40, out./nov. 1912.

DOI 10.34033/2526-5830-v3n11-95

