

PRÁTICAS RECOMENDADAS

Análise de Falha em Equipamentos Estáticos e
Tubulações Pertencentes a Instalações Industriais

PRe-002-2016

ANÁLISE DE FALHA EM EQUIPAMENTOS ESTÁTICOS E TUBULAÇÕES PERTENCENTES A INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS

Sumário

1	Objetivo	1
2	Referências normativas	1
3	Termos e definições	1
4	Propósitos de uma análise de falha	5
4.1	Conceito	5
4.2	Análise de falha interna	4
4.3	Análise de falha de segunda parte	4
5	Etapas da análise de falha	6
6	Etapa I: Preliminar	7
7	Etapa II: Base de dados	8
7.1	Atividades envolvidas	8
7.2	Entrevista com os envolvidos	9
7.3	Levantamento documental	9
7.4	Revisão do projeto mecânico	8
7.5	Inspeção visual	10
7.6	Inspeção não-destrutiva	9
7.7	Coleta de amostras	10
7.8	Exames em laboratório	11
7.9	Análise mecânica dos danos ou defeitos	12
8	Etapa III: Interpretação	13
8.1	Método	14
8.2	Mecanismo de dano	14
8.3	Causas	15
8.4	Relatório conclusivo	12
9	Recomendações	16
10	Advertência	16
	Referências bibliográficas complementares	17
	Anexo A (informativo): Caso comentado	17

1 Objetivo

1.1 Esta Prática Recomendada estabelece conceitos e preconiza boas práticas destinadas à consecução dos objetivos específicos atribuídos a uma análise de falha.

1.2 Este documento é aplicável a equipamentos estáticos como caldeiras, vasos de pressão, trocadores de calor, tanques e tubulações em operação nas indústrias de geração elétrica, petróleo, petroquímica, celulose e papel, açúcar e álcool, alimentos e outras, podendo seus princípios ser eventualmente aplicados a partes específicas de outros equipamentos estáticos ou dinâmicos.

1.3 Esta Prática Recomendada se destina principalmente a apoiar não especialistas em análise de falha que tenham por missão decidir sobre a execução de serviço dessa natureza, de acompanhar as diversas etapas do seu desenvolvimento, de diligenciar atividades de apoio e de fazer uso dos resultados obtidos.

2 Referências normativas

Os documentos relacionados a seguir são indispensáveis à aplicação desta Prática Recomendada. Para referências datadas, aplicam-se somente as edições citadas. Para referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes do referido documento (incluindo emendas).

API RP 571, *Damage mechanisms affecting fixed equipment in the refining industry.*

API 579-1/ASME FFS-1, *Fitness for service.*

ASTM A370, *Test methods and definitions for mechanical testing of steel products.*

3 Termos e definições

Para os efeitos deste documento, aplicam-se os seguintes termos e definições.

3.1

segurança

condição do equipamento ou tubulação que permanece operando sem ameaçar de modo relevante a integridade física e a saúde de pessoas e o meio ambiente

3.2

funcionalidade

condição do equipamento ou tubulação que cumpre as funções a que se destina, independente de atender ao requisito de segurança

3.3

adequação ao uso

condição do equipamento ou tubulação cuja operação atende às exigências de segurança e funcionalidade

3.4

risco

produto da probabilidade de ocorrência de uma falha (POF) por sua consequência estimada (COF)

3.4.1

probabilidade de falha (POF)

qualifica ou quantifica a probabilidade da ocorrência de falha em um equipamento ou tubulação

3.4.2

consequência de falha (COF)

qualifica ou quantifica a extensão das perdas que uma eventual falha pode causar em termos de:

- (I) integridade física de circunstantes;
- (II) danos ao meio ambiente;
- (III) adequação ao uso de equipamentos vizinhos;
- (IV) prejuízos econômicos em recuperação e substituição;
- (V) perda de produção;
- (VI) transgressões à legislação vigente e perda de certificações; e
- (VII) danos à imagem da empresa proprietária.

3.5

falha

evento que determina a imediata inadequação ao uso de um equipamento ou tubulação

3.5.1

causas concorrentes

causas que prestam de modo serial, ou paralelo, alguma contribuição para a manifestação da falha, seja elevando a probabilidade de ocorrência, seja intensificando as consequências, mas não suficientes por si mesmas para o comprometimento da adequação ao uso

3.5.2

causa raiz

causa suficiente que, por si mesma, determina o comprometimento da adequação ao uso, independentemente da eventual contribuição de causas concorrentes

3.6

dano

manifestação que se instala em um equipamento ou tubulação cuja progressão ao longo do tempo pode chegar a comprometer sua adequação ao uso

EXEMPLOS (I) perda de espessura;
(II) uma trinca;
(III) fragilização do material decorrente de reação metalúrgica.

3.6.1

mecanismo de dano

processo de natureza física, química, metalúrgica ou mecânica que promove o dano ou a acumulação do dano em equipamento ou tubulação

3.7

defeito

dano acumulado que alcança intensidade capaz de expor a operação de um equipamento ou tubulação a um risco inaceitável

3.8

não conformidade

característica apresentada por um equipamento ou tubulação em desacordo com o Código de Projeto que rege sua construção

EXEMPLOS (I) espessura de parede abaixo da espessura mínima de projeto;
(II) descontinuidades além dos limites de aceitação estabelecidos;
(III) material não previsto no Código de Projeto ou distinto daquele que foi adotado no dimensionamento

3.9

comprometimento

característica original ou adquirida do equipamento, tubulação ou sistema que tem a adequação ao uso significativamente ameaçada

3.10

avaliação de integridade

serviço de engenharia empreendido em certo momento da vida operacional de um equipamento ou tubulação destinado a cumprir pelo menos um dos seguintes objetivos:

- (I) verificar se permanece atendida a adequação ao uso;
- (II) estimar a vida remanescente ou garantir uma fração da vida remanescente durante a qual o risco permaneça aceitável; e
- (III) definir eventuais intervenções corretivas ou preventivas de manutenção capazes de aperfeiçoar a adequação ao uso.

3.11

vida operacional

tempo de serviço cumprido até determinado momento por um equipamento ou tubulação a contar do início de sua produção comercial. A vida operacional exclui o tempo aplicado no comissionamento durante o período pré-comercial. Salvo esclarecimento específico, inclui o tempo decorrido durante as interrupções da operação causadas por paradas de manutenção, ou outro qualquer motivo

3.11.1

vida útil

tempo de serviço a ser cumprido por um equipamento ou tubulação entre o início de sua produção comercial e a perda da adequação ao uso. A vida útil pode ser estendida mediante intervenções de manutenção, desde que estas sejam viáveis economicamente

3.11.2

vida remanescente

tempo de serviço que resta a um equipamento ou tubulação antes do esgotamento da vida útil

3.11.3

vida de referência

hipótese de projeto assumida no dimensionamento daqueles equipamentos ou tubulações para os quais se pressupõe a vida útil limitada por ação de certo mecanismo de dano. Exemplos de mecanismos de dano considerados no projeto de equipamentos ou tubulações para a definição da vida de referência são corrosão e fluência

4 Propósitos de uma análise de falha

4.1 Conceito

Análise de falha é o serviço de engenharia que coleta, analisa e interpreta informações de modo a esclarecer, dentre outras questões, as causas para o comprometimento da adequação ao uso de um equipamento ou tubulação que resulte de defeito ou de falha ocorrida. Pode ainda, em sentido mais amplo, definir reparos e ações de natureza preventiva.

Avaliação de integridade é um serviço de engenharia que pode abordar questões semelhantes à análise de falha, entretanto, tais serviços não devem ser confundidos. Análise de falha se aplica a um equipamento ou tubulação cuja adequação ao uso já se encontra comprometida. Avaliação de integridade tem como primeiro propósito verificar se certo equipamento ou tubulação permanece adequado ao uso.

4.2 Análise de falha interna

Análise de falha interna é aquela conduzida pelo proprietário do equipamento ou tubulação cuja adequação ao uso se encontra comprometida em decorrência de defeito ou de falha.

Podem ser atribuídos a uma análise de falha interna, todos ou alguns, dos seguintes objetivos:

- (I) identificação da causa raiz e das causas concorrentes;
- (II) definição dos reparos necessários para reconstituir a adequação ao uso;
- (III) verificar se os mecanismos de dano associados à causa raiz e às causas concorrentes se manifestam em outros equipamentos e tubulações do mesmo sistema;
- (IV) definir medidas preventivas capazes de mitigar o risco associado à repetição de falha assemelhada.

4.3 Análise de falha de segunda parte

Análise de falha de segunda parte é aquela em que o patrocinador é uma entidade distinta do proprietário do equipamento ou tubulação exposto ao comprometimento da adequação ao uso em razão de defeito, ou de falha. São exemplos típicos:

- (I) certa empresa executa uma análise de falha em produto por ela projetado, fabricado ou fornecido de modo a orientar suas ações junto ao proprietário;
- (II) uma seguradora contrata uma análise de falha para subsidiar o enquadramento do sinistro nas condições estabelecidas na apólice de seguro;
- (III) um perito nomeado em certa causa cível executa por si ou demanda a terceiros uma análise de falha para levantar elementos que instruem seu laudo.

São objetivos possíveis na análise de falha de segunda parte:

- (I) identificação da causa raiz e das causas concorrentes;
- (II) caracterização de responsabilidades;
- (III) determinação das perdas materiais decorrentes da falha;
- (IV) atendimento a regulamentação de segurança.

5 Etapas da análise de falha

5.1 As circunstâncias que envolvem as análises de falha variam caso a caso, de tal modo que raramente serviços dessa natureza são conduzidos do mesmo modo.

5.2 A Figura 1 organiza sob forma de fluxograma as atividades unitárias que podem fazer parte de um serviço de análise de falha. Em linhas gerais, elas podem ser agrupadas em três etapas:

- (I) preliminar;
- (II) coleção de evidências;
- (III) interpretação.

5.3 A boa prática recomenda que as atividades que sucedem à etapa I, preliminar, sejam desenvolvidas com a interveniência do responsável técnico. No entanto, a dinâmica dos processos que sucedem uma falha frequentemente se sobrepõe às atividades previstas na Figura 1.

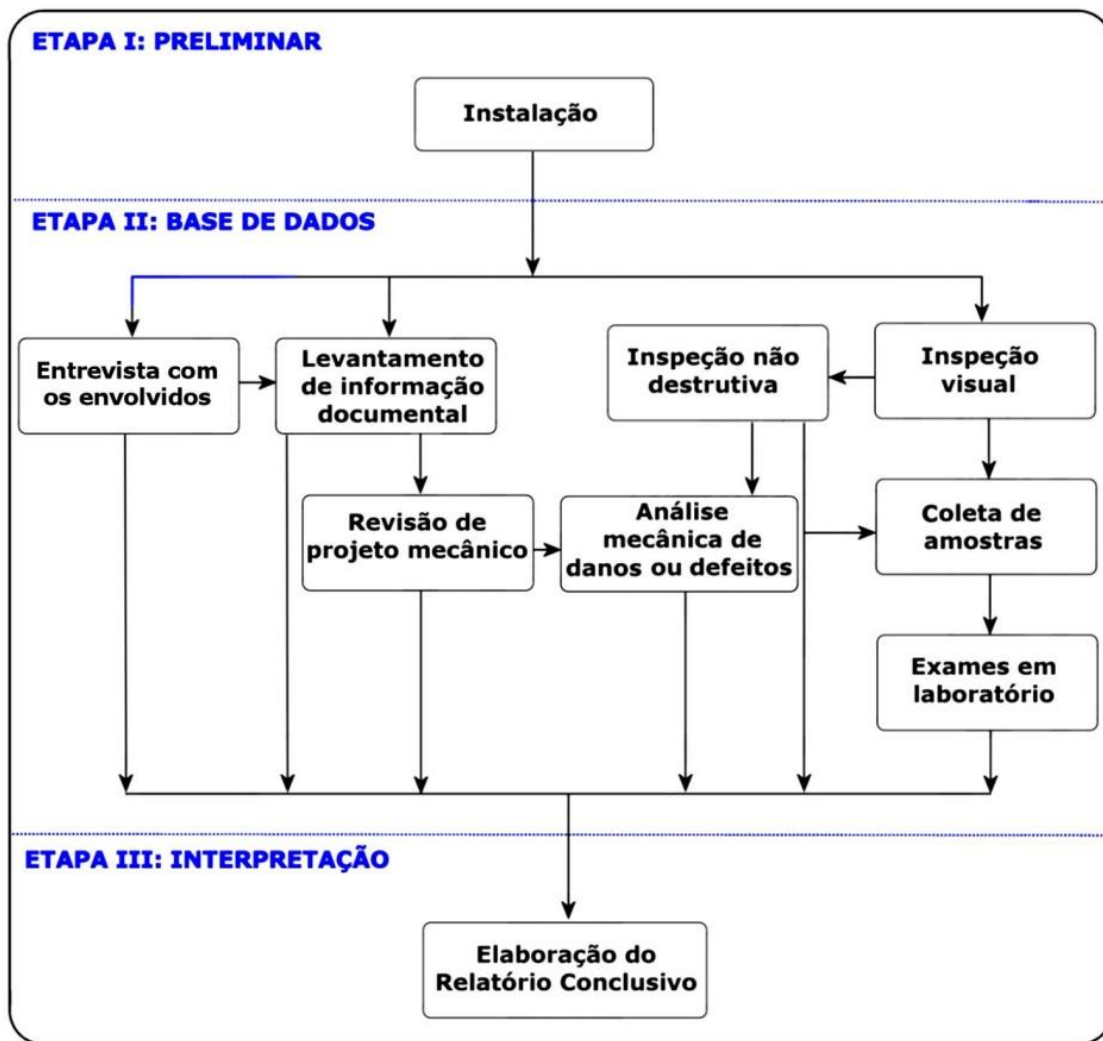


Figura 1 - Conjunto de atividades correlacionadas que em geral engloba as demandas de um serviço de análise de falha

5.4 Após uma falha, é razoável que a prioridade seja o retorno à operação com segurança no menor tempo possível. Assim é possível que uma análise de falha interna inicie já com as ações de manutenção corretiva em andamento ou mesmo concluídas, o que pode dificultar o levantamento das evidências.

5.5 Em se tratando de análise de falha de segunda parte, onde o patrocinador é uma empresa seguradora, a apólice do seguro normalmente determina a intervenção da seguradora antes de qualquer alteração no cenário da falha. Entretanto, nas perícias judiciais tem-se circunstância oposta, a análise de falha pode ter início em meses ou anos após a ocorrência, nem sempre com a adequada preservação de evidências físicas representativas da causa raiz.

5.6 O fluxograma da Figura 1 serve de orientação para o planejamento de uma análise de falha, uma vez consideradas suas condicionantes específicas. O planejamento detalhado de determinada análise de falha requer que seu responsável técnico reúna certo conhecimento a respeito. Assim é comum que esse detalhamento seja construído à medida que o serviço progrida.

6 Etapa I: Preliminar

6.1 Considera-se como ponto de partida ou de instalação de uma análise de falha a decisão gerencial por empreendê-la. Frequentemente tal decisão é tomada por não especialistas em análise de falha. Cabem nesse momento decisões sobre:

- (I) a abrangência requerida diante dos objetivos assinalados em 4.2 ou 4.3;
- (II) a nomeação do responsável técnico ou contratação de empresa especializada para a execução do serviço.

A abrangência de uma análise de falha pode ser alterada se o avanço do serviço assim o justificar.

O responsável técnico pode pertencer ao quadro de funcionários do proprietário ou do patrocinador. Pode também ser um especialista independente ou um engenheiro designado pela empresa especializada para liderar a equipe de colaboradores encarregada do serviço.

Convém que o proprietário ou o patrocinador mobilize recursos para que o responsável técnico tenha acesso ao sítio da ocorrência antes que evidências relevantes sejam comprometidas por intervenções de manutenção corretiva de aplicação indispensável ou demais circunstâncias.

6.2 A análise de uma falha ocorrida em instalação industrial complexa pode assumir caráter multidisciplinar que demande o concurso de distintos especialistas e o consequente compartilhamento da responsabilidade técnica, ainda que mantida uma liderança individual pelo conjunto do serviço. Raramente as atividades requeridas para garantir a conclusividade de uma análise de falha podem ser quantificadas *a priori*. Essa é uma questão comercial a ser considerada quando da contratação de um serviço dessa natureza.

7 Etapa II: Base de dados

7.1 Atividades envolvidas

De acordo com a Figura 1, a etapa II compreende uma ou mais das seguintes atividades:

- (I) entrevistas com os envolvidos;
- (II) levantamento documental;
- (III) revisão do projeto mecânico;
- (IV) inspeção visual;
- (V) coleta de amostras;
- (VI) exames em laboratório;
- (VII) inspeção não destrutiva;
- (VIII) análise mecânica dos danos ou defeitos.

As informações requeridas por uma análise de falha são de natureza distinta, assim como são as atividades empreendidas para reuni-las.

Nem toda a análise de falha necessita um conjunto amplo de informações para cumprir seus objetivos. Em determinadas análises de falha, algumas informações, ainda que desejáveis, não são acessíveis e as atividades correspondentes resultam dispensadas. Desse modo, um serviço de análise de falha compreende a execução do conjunto de atividades dentre aquelas previstas na Figura 1 que seja necessário e suficiente para cumprir os objetivos estabelecidos, desde que observadas eventuais limitações de acesso à informação impostas pelas circunstâncias. Salvo no caso de atividades que guardam uma relação serial entre si, a Figura 1 não estabelece ordem cronológica para as atividades.

A base de dados registra as informações colhidas durante a análise de falha. Ela deve ser construída progressivamente à medida que as informações são obtidas segundo um padrão estabelecido pelo responsável técnico. Esse padrão deve garantir a qualquer tempo a integridade e a rastreabilidade do conteúdo da base de dados. Nem todas as informações integradas à base de dados chegam a ser utilizadas no relatório conclusivo, mas toda a informação agregada à base de dados deve ser preservada de igual modo.

A base de dados é um valor pertencente ao proprietário ou patrocinador, que dele poderá fazer uso caso decida visitar por si, ou por terceira parte, qualquer aspecto relativo ao caso. Razões para a visita são diversas. A visita pode ser motivada por uma nova falha ou defeito de características semelhantes que ocorra anos após o evento tratado na base de dados. Outro exemplo de visita se trata de demanda judicial, quando o segurado questiona decisão da seguradora baseada na análise de falha executada durante a regulação de um sinistro.

Cabe ao responsável técnico manter o processo de aquisição de informações sob constante análise de engenharia. Cada informação deve ser verificada quanto à consistência, cabendo estabelecer as medidas corretivas, caso necessárias. O registro de cada informação na base de dados deve ser acompanhado. A repercussão de cada evidência recém adquirida sobre as atividades de coleta de informações em andamento deve ser considerada. Assim, por exemplo, o resultado de determinado exame em laboratório pode estabelecer a demanda por exames adicionais. O resultado de uma inspeção não destrutiva pode indicar o interesse por uma análise mecânica aplicada a certa manifestação de dano, e por diante.

7.2 Entrevistas com os envolvidos

Trata-se de atividade inerente ao responsável técnico e cabe ao proprietário ou patrocinador providenciar os meios necessários.

Entende-se por envolvido quem tiver testemunhado presencialmente a qualquer tempo fatos relacionados à falha ou defeito.

As entrevistas devem ser conduzidas com o objetivo de se definir o modo de manifestação e a sequência de desenvolvimento da falha, seu local de ocorrência, a extensão de seus efeitos e possíveis locais análogos propensos a falhas ou danos similares, por exemplo. Não se exclui o interesse por quaisquer outras circunstâncias que, na visão dos entrevistados, possam ter concorrido, ainda que indiretamente, para a falha.

Informações orais incorrem em subjetividade. Quem oferece a informação nem sempre detém conhecimento completo a respeito no momento da entrevista e quem ouve pode não interpretar ou registrar adequadamente aquilo que foi enunciado. Não obstante, informações orais são de grande importância, às vezes até mesmo decisivas, para a identificação da causa raiz de uma falha. Elas podem indicar aspectos de interesse para o levantamento documental e para a inspeção visual.

Entende-se também como uma das formas de entrevista a submissão pelo responsável técnico de questões escritas a interlocutores que lhe sejam indicados. Nesse caso, as respostas igualmente por escrito podem ser tratadas como documentos formais.

7.3 Levantamento documental

Os documentos de interesse são, tipicamente:

- (I) desenhos de fabricação;
- (II) especificações destinadas à fabricação e montagem;
- (III) memórias de cálculo;
- (IV) registros históricos das inspeções já realizadas;
- (V) registros históricos das intervenções de manutenção;
- (VI) projetos e registros de modificações e de grandes reparos, se realizados;
- (VII) registros históricos de operação e de processo, com ênfase em alterações introduzidas ao longo do tempo.

A produção de revisão bibliográfica pode ser necessária para fundamentar a interpretação das evidências. Normas e demais documentos técnicos destinados à interpretação das informações que não forem disponibilizados pelo proprietário ou patrocinador devem ser adquiridos pelo responsável técnico, cabendo o ressarcimento.

7.4 Revisão do projeto mecânico

A revisão do projeto mecânico se destina a atender dois objetivos:

- (I) familiarizar o responsável técnico com as opções adotadas pelo projetista dentro das alternativas permitidas pelo Código de Projeto aplicável;
- (II) verificar a aderência do projeto àquilo que a norma específica do produto determina. Se identificada uma não conformidade no projeto, ela deve ser investigada no que se refere à repercussão sobre a falha ou defeito sob análise.

A revisão do projeto mecânico deve considerar a edição do Código de Projeto que rege a construção do equipamento ou tubulação. A conformidade do projeto deve ser referida a esse documento. Entretanto, os Códigos de Projeto evoluem. Algumas dessas modernizações se destinam a atender requisitos de segurança mais rigorosos estabelecidos pelas exigências crescentes da sociedade. Modernizações dessa natureza que interfiram na análise de falha em pauta devem ser devidamente consideradas pelo responsável técnico, ainda que não caracterizem inconformidade.

Esta atividade inclui a verificação de aderência do equipamento ou tubulação às normas de segurança, acaso existentes, estabelecidas na legislação nacional e que têm precedência hierárquica sobre outras normas e requisitos.

7.5 Inspeção visual

Via de regra, a inspeção visual é o ensaio mais importante dentre as técnicas não destrutivas, servindo de base para o aprofundamento da análise.

Essa atividade deve ser executada preferencialmente pelo responsável técnico. Seus objetivos são:

- (I) familiarizar o responsável técnico com o cenário da análise de falha e seu entorno;
- (II) produzir um arquivo fotográfico que registre aspectos gerais, assim como detalhes que possam mais adiante apoiar a interpretação das evidências.

Normalmente a inspeção visual é acompanhada por representantes do proprietário conhecedores da instalação. Essa é uma oportunidade para cumprir ao menos uma etapa das entrevistas com os envolvidos. Deve ser registrada a nomenclatura praticada no local para descrever equipamentos ou tubulações, operações e processos, assim como os padrões de identificação e de orientação utilizados nos documentos internos do proprietário. Essas referências devem ser tanto quanto possível empregadas no relatório conclusivo.

A escolha dos objetos para documentação fotográfica é subjetiva e essa razão justifica a importância da atuação direta do responsável técnico. Entretanto, pode ocorrer que a janela de tempo disponível para a inspeção visual anteceda a nomeação do responsável técnico prevista na etapa I. Nesse caso é conveniente que a inspeção visual seja executada por um profissional de equipamentos experiente e que a documentação seja fornecida ao responsável técnico devidamente legendada. As legendas devem ser elaboradas respeitando à rastreabilidade das informações destinadas a fazer parte da base de dados.

7.6 Inspeção não destrutiva

Ensaio não destrutivo aplicados a equipamentos ou tubulações podem fazer parte da análise de falha, cujo objetivo, dentre aqueles referidos na Seção 4, se estenda além identificação da causa raiz e das causas concorrentes. Podem também servir de orientação para a coleta de amostras destinadas a exames em laboratório mediante a seleção de regiões que contenham danos mais adequados ao propósito em vista.

Um plano de inspeção não destrutiva, se integrado a uma análise de falha, deve ser detalhado pelo responsável técnico para execução a seu próprio cargo ou repassado para o proprietário ou a terceira parte a ordem do proprietário. Os métodos de ensaio não destrutivo, as regiões de aplicação dos mesmos e os critérios para registro rastreável dos resultados devem fazer parte desse detalhamento.

Os ensaios não destrutivos devem ser executados por técnicos devidamente qualificados mediante aplicação do Código ASME BPVC Sec. V ou outro documento similar igualmente reconhecido. Os relatórios produzidos devem ser aprovados pelo responsável técnico no que se refere à aderência aos requisitos estabelecidos no plano de inspeção não destrutiva.

Cabe ter em conta que o responsável por um ensaio não destrutivo é qualificado para executá-lo, mas não necessariamente qualificado para opinar sobre o significado dos seus resultados no que se refere à análise de falha.

7.7 Coleta de amostras

O exame em laboratório de amostras extraídas de equipamento ou tubulação que tenha falhado ou que contenha defeito pode fornecer informação decisiva sobre a natureza do mecanismo de dano atuante e sobre sua cinética da acumulação. Haverá casos em que a simples inspeção visual em campo permita identificar o mecanismo de dano ativo, mas a coleta de amostras pode, ainda assim, contribuir para a qualidade da documentação rastreável favorecendo a conclusividade da análise de falha.

A eficácia dos exames em laboratório depende da representatividade das amostras disponibilizadas. Em determinadas situações, a análise de falha é mais eficaz quando são comparados resultados de exames aplicados a amostras expostas a condições de serviço diversas ou que contenham manifestações de dano distintas em intensidade ou morfologia. O dimensionamento da amostragem adequada para cada análise de falha envolve decisão de engenharia de natureza subjetiva, que deve ser desejavelmente tomada pelo responsável técnico durante ou após a inspeção visual.

Aspectos a considerar para efeito de dimensionamento são:

- (I) informação que se pretende obter da análise laboratorial;
- (II) posição relativa de cada amostra no equipamento ou tubulação; e
- (III) tamanho de cada amostra necessariamente compatível com os exames aos quais ela se destina.

A especificação resultante desse dimensionamento deve estabelecer o código de identificação de cada amostra e demais informações requeridas para a operação de remoção. É desejável que a posição de onde procede cada amostra seja registrada em desenho e/ou fotografia, conforme aplicável.

A extração das amostras do equipamento ou tubulação é em geral conduzida pelo proprietário ou por terceiros à sua ordem. Devem ser tomados os seguintes cuidados:

- (I) retirar amostras metálicas preferivelmente por corte a frio, mediante emprego de serra, disco de corte ou outro recurso que evite o aquecimento localizado. Se o corte a quente for indispensável, dimensionar a amostra de tal modo que sua extensão útil seja poupada de modificações metalúrgicas induzidas pela temperatura;
- (II) identificar cada amostra e manter essa identificação durante a extração, o armazenamento, o transporte e em todo o ciclo de operações a que ela seja submetida;
- (III) preservar a integridade física das amostras, protegendo-as de corrosão ou de qualquer outra forma de degradação até que elas sejam recebidas em seu destino. Cuidados específicos devem ser dispensados às superfícies de particular interesse para a análise, como, por exemplo, superfícies de fratura, de desgaste ou de corrosão.

O tratamento aplicado às amostras, depois de concluída a análise de falha, deve ser objeto de acordo. Questões que a serem consideradas são:

- (I) responsabilidade pela guarda das amostras;
- (II) garantia de integridade durante o armazenamento;
- (III) prazo para conservação.

7.8 Exames em laboratório

A montagem do plano de exames em laboratório é atribuição do responsável técnico.

Os exames devem ser especificados de modo a:

- (I) aprofundar e/ou detalhar o conhecimento já adquirido sobre os mecanismos de dano que determinaram, ou que contribuíram, para a manifestação da falha ou defeito;
- (II) consolidar a documentação das evidências disponíveis de modo a fortalecer os resultados do relatório conclusivo a ser produzido na etapa III;
- (III) prospectar novas evidências, inclusive aquelas capazes de descartar hipóteses sobre mecanismos de dano aventadas inicialmente.

Os resultados dos exames previstos podem ser inconclusivos ou revelar novos desdobramentos. Uma estratégia de planejamento que pode oferecer economia de tempo e de recursos consiste em prever o plano de exames em laboratório em duas fases. A primeira, de natureza exploratória, deve ser compacta em número e em complexidade dos exames. A segunda deve ser projetada para atender às demandas identificadas na fase anterior.

A elaboração do plano de exames em laboratório deve se iniciar por detalhada inspeção visual e, se cabível, por inspeção dimensional das amostras originais disponibilizadas pelo proprietário ou patrocinador. Descontinuidades e marcações, eventualmente presentes, devem ser documentadas por fotografia ou outros meios. Segue-se a preparação de um plano de corte para cada amostra original destinado a orientar a fabricação dos corpos de prova. Esse plano de corte deve necessariamente prever o código de identificação de cada fração resultante da repartição das amostras originais. Determinados exames demandam que o corpo de prova a eles destinado atenda ao requisito de posição em relação ao equipamento ou tubulação de onde procedem e esse é um cuidado adicional a ser considerado no plano de corte. Superfícies de fratura, de desgaste ou de corrosão eventualmente presentes nas amostras originais devem ser preservadas.

Um exame em laboratório e a preparação dos corpos de prova correspondentes podem ser executados de modo direto pelo responsável técnico, ou podem ser contratados junto à terceira parte, cabendo nesse caso ao responsável técnico supervisionar essas atividades.

Os exames em laboratório podem ser arrançados em duas famílias:

- (I) exames de qualificação de materiais perante a especificação aplicável;
- (II) exames destinados a explorar descontinuidades de forma, alterações metalúrgicas adquiridas em serviço, o comportamento de juntas soldadas e outros interesses.

Os exames de qualificação típicos compreendem:

- (I) análise química quantitativa por métodos analíticos convencionais;
- (II) ensaio de dureza Rockwell, Brinell ou Vickers;
- (III) ensaio de tração, em geral na temperatura ambiente;

- (IV) ensaio de resistência ao impacto segundo Charpy; e
- (V) ensaio de tenacidade à fratura.

A qualificação do material resulta da comparação entre os resultados desses ensaios e os índices estabelecidos na especificação aplicável. Cada ensaio deve ser executado por procedimento compatível com a especificação objeto da comparação.

No segundo caso, os interesses são diversificados e demandam uma variedade de métodos de ensaio. Além dos anteriores, são frequentemente empregados exames que envolvem processamento de imagem, como é o caso do exame metalográfico, do exame fratográfico e da análise química semiquantitativa por dispersão de energia através de microscopia eletrônica de varredura. Os procedimentos nem sempre são normalizados e a análise dos resultados pode envolver comparações e avaliações subjetivas a cargo do responsável técnico.

7.9 Análise mecânica dos danos ou defeitos

Existem situações em que uma análise de falha envolve não conformidade cujo reparo, embora exigido pelo Código de Projeto aplicável ao estado novo, mostra-se problemático ou irrealizável depois que o equipamento ou tubulação se encontra em serviço.

Não conformidades frequentemente enquadradas nessa situação são, dentre outras:

- (I) perdas de espessura localizadas;
- (II) descontinuidades planares.

Casos ocorrem em que descontinuidades planares deixam de ser detectadas e corrigidas ainda na fabricação e são finalmente identificadas quando o equipamento ou tubulação totaliza muitos milhares de horas de operação. Diante desse fato, o responsável técnico pode se valer de uma análise mecânica da não conformidade levando em conta realisticamente as diversas variáveis que ditam sua severidade, e decidir se na ausência do reparo o equipamento ou tubulação permanece adequado ao uso. Outras alternativas à simples desativação do equipamento ou tubulação que podem ser consideradas pelo responsável técnico são:

- (I) operação por um período limitado de tempo;
- (II) operação em regime abrandado de pressão e/ou temperatura.

Cabe ao responsável técnico estabelecer o método de análise mecânica adequado a cada caso, assim como o conjunto de dados que necessita para sua aplicação. Orientação para análise mecânica de não conformidades é, por exemplo, encontrada no ASME FFS-1 e se aplica a equipamentos projetados e construídos de acordo com os seguintes códigos:

- ASME BPVC Sec. I;
- ASME BPVC Sec. VIII, Div. 1;
- ASME BPVC Sec. VIII, Div. 2;
- API 620; e
- API 650.

Assim como as tubulações projetadas e construídas conforme:

- ASME Piping Code B31.1; e
- ASME Piping Code B31.3.

Os procedimentos de análise mecânica expostos no ASME FFS-1 podem ser aplicados, com o devido cuidado, a equipamentos ou tubulações projetados e construídos por outros padrões, desde que tais padrões sejam devidamente reconhecidos.

8 Etapa III: Interpretação

8.1 Método

A interpretação das evidências reunidas na base de dados é o caminho para responder aos quesitos propostos pelo proprietário ou pelo patrocinador. Usualmente a etapa III se inicia em paralelo com a etapa II, uma vez que cada nova evidência deve ser interpretada de modo a testá-la e compará-la com o conhecimento até então adquirido, de modo a orientar a coleta das informações subsequentes.

O método de interpretação deve ser estabelecido pelo responsável técnico considerando a natureza dos quesitos, o conteúdo da base de dados e a natureza do defeito ou da falha sob análise.

A subjetividade é uma condição intrínseca a qualquer processo de análise de falha. Determinada atividade pode ter caráter cartesiano como, por exemplo, a revisão de certo aspecto de projeto por aplicação do código aplicável. Não obstante, a interpretação global das evidências é sempre de natureza subjetiva. O resultado final de uma análise de falha é uma opinião emitida pelo responsável técnico.

A Figura 2 oferece uma visão generalista do método de interpretação, onde cabem as adequações indispensáveis a cada caso.

8.2 Mecanismos de dano

Na fase inicial da interpretação, o responsável técnico deve ter em vista as características típicas dos mecanismos de dano frequentemente ativos em equipamentos ou tubulações assemelhados àquele objeto da análise. Tais características fazem parte da memória própria do responsável técnico que ademais pode se valer da literatura especializada.

Haverá caso em que mais de um mecanismo se mostra ativo, mas nem todos contribuem para o agravamento do defeito ou para a falha. Cabe ao responsável técnico apontar, dentre os mecanismos ativos, aquele que presta a principal contribuição para a manifestação do defeito ou da falha. O mecanismo responsável, assim identificado, não deve ser confundido com a causa do defeito ou da falha. A causa está vinculada às condições que tornaram possível a atividade do mecanismo responsável.

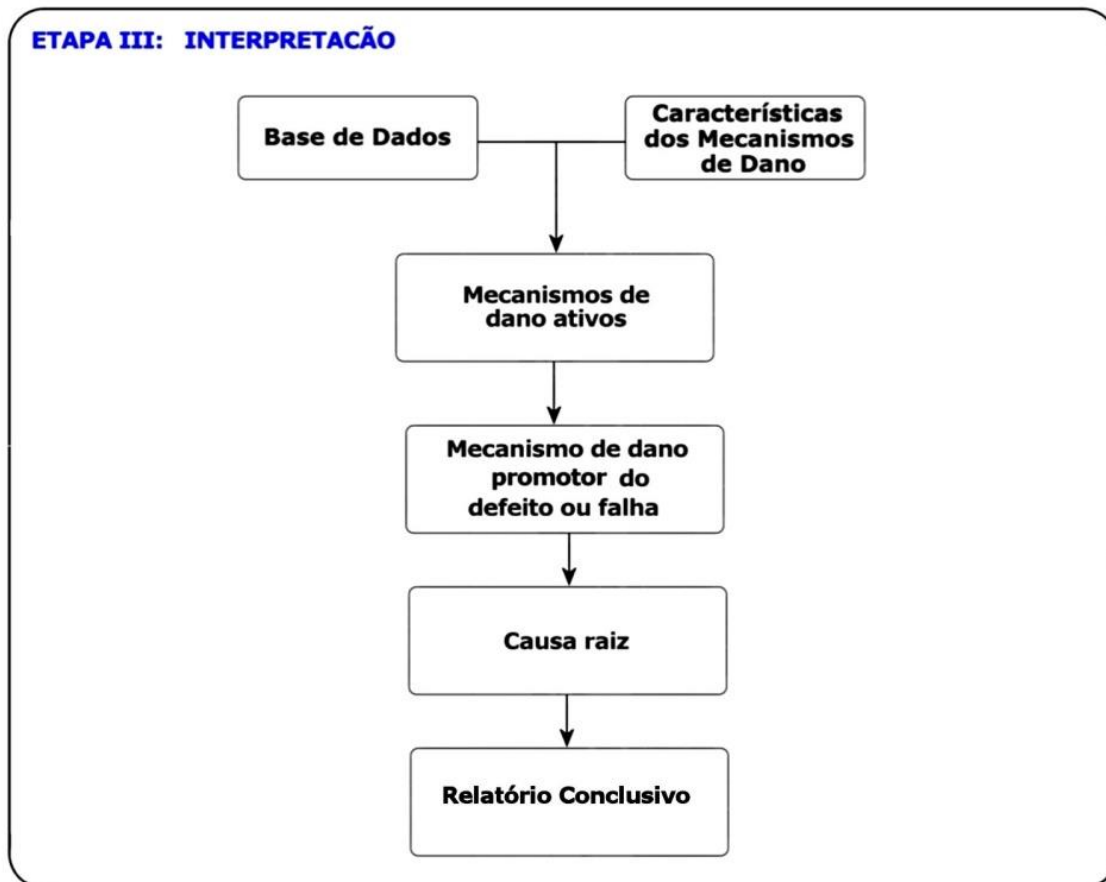


Figura 2 - Detalhamento das atividades da etapa III que convergem para o relatório conclusivo de uma análise de falha

8.3 Causas

São causas concorrentes àquelas que favorecem a atividade dos mecanismos contribuidores para o defeito ou para a falha. Causa raiz é aquela circunstância que, a julgamento do responsável técnico, exerce papel determinante para a manifestação do defeito ou da falha. Um dos critérios para selecionar a causa raiz dentre um conjunto de causas concorrentes é o, assim denominado, "teste da não ocorrência": causa raiz é aquela cuja exclusão inviabilizaria a ocorrência do defeito ou da falha. Depois de estabelecida a causa raiz e, com base nesse fundamento, cabe ao responsável técnico prosseguir na interpretação das evidências de modo a responder aos demais quesitos a ele submetidos pelo proprietário ou pelo patrocinador.

8.4 Relatório conclusivo

O relatório conclusivo a ser submetido pelo responsável técnico à aprovação do proprietário ou patrocinador deve atender da melhor forma aos objetivos estabelecidos em consonância com o especificado em 4.2 e 4.3, respeitados os limites da base de dados. É desejável que a redação deste documento aguarde o fechamento da base de dados para evitar conclusões e recomendações incorretas como resultado da não consideração de informações relevantes. A urgência das demandas pode exigir a apresentação de relatórios preliminares. Nesse caso, as partes devem se precaver quanto à possibilidade de conflito entre um documento preliminar e o relatório conclusivo.

O relatório conclusivo pode ser acompanhado por um laudo técnico que sintetize suas conclusões e eventuais recomendações. Este laudo técnico pode incluir condições e restrições de validade estabelecidas a partir de limites de conteúdo da base de dados.

Uma análise de falha, ainda que executada de acordo com a melhor técnica, pode eventualmente não atender de modo pleno aos objetivos indicados em 4.2 e 4.3. A conclusividade depende da qualidade da base de dados construída ao longo do serviço que esta nem sempre pode ser garantida antecipadamente. Casos ocorrem em que a própria manifestação de um defeito ou as consequências de uma falha ocultam evidências indispensáveis para a identificação do mecanismo responsável. Ainda que o mecanismo causador seja claramente estabelecido, as informações acessíveis sobre o histórico do equipamento ou da tubulação podem ser insuficientes para a identificação da causa raiz. O relatório conclusivo emitido nessa circunstância deve explicitar suas limitações de tal modo que possa servir de base para futuros estudos complementares acaso empreendidos.

O proprietário ou o patrocinador pode estabelecer atributos a serem observados pelo relatório conclusivo. Considerando a subjetividade intrínseca às conclusões e às recomendações resultantes do serviço de análise de falha, convém ao proprietário ou patrocinador que o relatório conclusivo preencha os seguintes requisitos de qualidade:

- (I) que o documento contenha todas as informações relevantes reunidas na base de dados, ou que permita rastreabilidade à origem daquelas que não acompanhem o documento em mídia digital ou impressa. Em particular, os exames que envolvem processamento de imagem devem ser devidamente documentados;
- (II) que os comentários, considerações, conclusões e recomendações constantes do documento sejam lastreados em evidências rastreáveis;
- (III) que a redação do documento permita seu pleno entendimento por especialistas, assim como, desejavelmente, por não especialistas;
- (IV) que dúvidas ou imperfeições levantadas pelo proprietário ou patrocinador, após a entrega do documento, sejam tratadas pelo responsável técnico e que eventuais aperfeiçoamentos objeto de consenso sejam introduzidos sob forma de revisão.

O proprietário ou patrocinador pode a seu critério submeter o relatório conclusivo à revisão crítica de um ou mais especialistas independentes. Nessa condição, o serviço a cargo do especialista independente deve ser entendido como uma análise de falha cuja base de dados seja inicialmente restrita à informação documental. Conclusões e recomendações decorrentes de uma análise de falha refletem opinião pessoal do autor, salvo conflito com documento normativo, com a boa prática industrial, com evidências registradas na literatura ou na própria base de dados, a discrepância de entendimento entre especialistas não caracteriza erro por qualquer das partes. No caso incomum em que a revisão crítica de um relatório conclusivo conduzir a divergência insanável entre especialistas, cabe então ao proprietário ou patrocinador estabelecer a solução para o caso.

9 Recomendações

9.1 A base de dados e o relatório conclusivo referentes ao serviço de análise de falha pertencem ao proprietário ou ao patrocinador. Recomenda-se ao responsável técnico acerrar-se dos cuidados necessários para garantir o sigilo das informações. Haverá caso em que a disseminação dos resultados pelo responsável técnico deva ser restrita a representante credenciado pelo proprietário ou patrocinador.

9.2 O uso do relatório conclusivo decorrente de um serviço de análise de falha é atribuição gerencial do proprietário ou do patrocinador. Recomenda-se ao proprietário:

- (I) anexar o relatório conclusivo aos registros históricos do equipamento ou tubulação;
- (II) implementar as eventuais proposições relativas à segurança de pessoa e do ambiente, salvo se discordar de tais proposições;
- (III) em caso de eventual discordância insanável com as proposições envolvendo segurança, incluir no registro histórico do equipamento ou tubulação um documento que justifique o não acolhimento das mesmas.

10 Advertência

10.1 A análise de falha envolve multidisciplinaridade. Sua execução demanda que o responsável técnico pelo serviço disponha por si, ou através de suporte técnico a ele acessível, no mínimo de conhecimento geral sobre materiais, sobre ensaios destrutivos e não destrutivos, sobre mecanismos de dano, além de conhecimentos específicos ditados pela natureza da falha sob análise.

10.2 A ABENDI se exime de responsabilidade por eventuais prejuízos que possam decorrer da frustração de expectativas resultante da aplicação inadequada desta Prática Recomendada.

Referências bibliográficas complementares

- [1] ASM International:Metals Handbook, vol. 9; Metallography and Microstructures; USA; 2004.
- [2] ASM International:Metals Handbook, vol. 11; Failure Analysis and Prevention; USA; 2002.
- [3] Espejo Mora, E.; Análisis de Fallas - Notas de Classe; Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia; Bogotá; Julho de 2012.

ANEXO A (INFORMATIVO):

CASO COMENTADO

A.1 Notas de esclarecimento

O caso de análise de falha a seguir proposto é meramente ilustrativo e destina-se a facilitar o entendimento de conceitos estabelecidos nesta Prática Recomendada. Ele não corresponde a uma ocorrência específica, embora incorpore situações tomadas da vida real. Não se pretende que esse exemplo represente todas as alternativas de abordagem e análise para o caso em pauta.

A.2 Caso de vazamento em junta soldada de trocador de calor

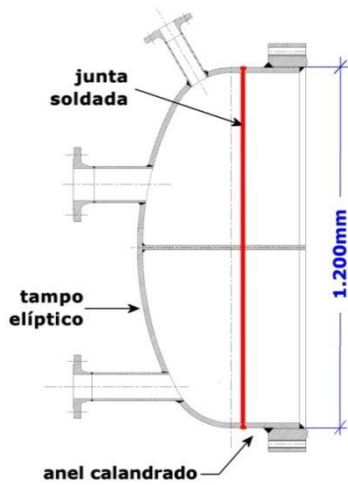
A.2.1 Panorama da falha

Um trocador de calor pertencente a uma indústria química tem por função aquecer certo fluido de processo no lado casco. A fonte quente é o vapor superaquecido que circula no lado dos tubos. Decorridos 65 meses de operação, foi identificado um vazamento de vapor para o ambiente a partir do cabeçote.

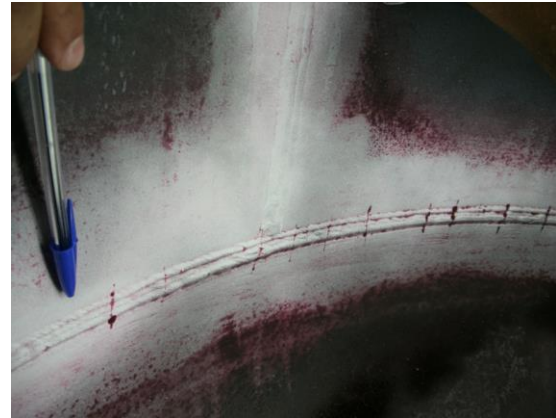
O trocador de calor possui feixe tubular em U. Ele foi produzido de acordo com o ASME BPVC Sec. VIII, Div. 1, Ed. 1999 e o TEMA Cl. B, Ed. 8th, 1999. São características de projeto:

- (I) pressão de projeto lado tubos 17 barG;
- (II) pressão de operação lado tubos 15 barG;
- (III) temperatura de projeto 280°C;
- (IV) temperatura de operação de entrada lado tubos 215°C;
- (V) temperatura de saída lado tubos 198°C.

O cabeçote é formado por uma flange soldada a um anel calandrado em chapa de espessura 15,8 mm, por sua vez soldado a um tampo elíptico ASME 2:1 de espessura mínima de 9,0 mm no rebordeamento. A divisória entre as câmaras de entrada e saída de vapor é em chapa de espessura 12,7mm, Figura A.1.A. Todos os componentes citados são fabricados em aço carbono ASTM A 516 Gr.70.



A



B

Figura A.1 - A: Cabeçote do trocador de calor por onde circula o vapor de aquecimento com destaque para a junta soldada que apresentou trinca passante. B: Ensaio por líquido penetrante aplicado na superfície interna do cabeçote com destaque para trincas transversais ao cordão de solda entre o tampo elíptico e o anel calandrado. As trincas avançam para o metal base tanto do tampo elíptico como do anel calandrado. O cordão de solda de fechamento do anel calandrado acha-se isento desse defeito.

A.2.2 Etapa I: Preliminar

Esse caso se classifica como uma análise de falha interna executada por uma empresa especializada contratada pelo proprietário para tal propósito. Coube à empresa especializada designar um engenheiro para cumprir a função de responsável técnico e constituir uma equipe técnica para apoiá-lo.

Os objetivos estabelecidos pelo proprietário foram:

- (I) identificação da causa raiz;
- (II) definição dos reparos necessários;
- (III) definição de medidas preventivas.

A.2.3 Etapa II: Base de dados

O levantamento de informações envolveu as seguintes atividades:

- (I) inspeção visual;
- (II) inspeção não destrutiva;
- (III) entrevistas com os envolvidos;
- (IV) coleta de amostra;
- (V) levantamento documental;e
- (VI) exame em laboratório.

O proprietário contratou o serviço de análise de falha rapidamente de tal forma que representantes

da empresa especializada inspecionaram o equipamento no momento em que este foi desmontado. As atividades de (i) a (v) foram executadas nessa ocasião. A inspeção não destrutiva envolveu a aplicação de ensaio por líquido penetrante a cargo do proprietário e exame metalográfico de campo através de réplicas executado pela empresa especializada. O levantamento documental se bastou com o fornecimento dos desenhos de fabricação do equipamento. A inspeção visual e o ensaio por líquido penetrante orientaram a decisão de campo sobre a posição mais adequada para a aplicação do exame metalográfico de campo e para a coleta de amostra do metal depositado da solda entre o anel calandrado e o tampo elíptico. Essa amostra foi destinada à análise química a cargo de terceira parte.

A Tabela A.1 resume as principais evidências incorporadas à base de dados.

Tabela A.1 - Síntese das evidências

Inspeção visual e ensaio por líquido penetrante
1 - O vazamento de vapor ocorreu através de trinca iniciada na superfície interna do cabeçote.
2 - O metal depositado da junta soldada entre o tampo elíptico e o anel calandrado apresenta inúmeras trincas no interior do cabeçote, todas elas perpendiculares ao cordão de solda, Figura A.1.B.
3 - Muitas dessas trincas transpassam a largura do cordão e se propagam por curta extensão no metal base tanto do anel calandrado, como do tampo elíptico.
4 - Nenhuma outra parte interna do cabeçote contém trincas.
Exame metalográfico de campo - Metal depositado da solda entre tampo elíptico e anel calandrado
5 - As trincas são ramificadas, Figura A.2.A.
6 - Segmentos de trinca de grande abertura, de pequena abertura e de dimensão capilar coexistem a curta distância.
7 - As trincas seguem orientação geral comum de modo que, mesmo ramificadas, elas não se entrelaçam.
8 - Uma trinca pode conter segmentos sucessivos com aberturas decrescentes no sentido da raiz, sendo este um indicativo de propagação descontínua, segmentos capilares são os de formação mais recente.
Exame metalográfico de campo - Metal base do tampo elíptico e do anel calandrado
9 - Todos os segmentos de trinca dispostos sobre os metais base são continuidade de trinca situada no metal depositado da solda entre o tampo elíptico e o anel calandrado, Figura A.2.B.
10 - Os segmentos de trinca contidos nos metais base são de grande abertura e não se ramificam.
11 - A raiz das trincas nos metais base tende ao formato arredondado característico de propagação estagnada. Não obstante podem ocorrer ciclos de reincidência da propagação.

Tabela A.1 (continuação)

Entrevistas com os envolvidos
12 - Consulta aos arquivos mostra que o Proprietário inspeciona regularmente seus equipamentos e conta com pessoal qualificado para essa atividade.
13 - O histórico de inspeção do trocador e a memória dos entrevistados não registram qualquer manifestação de dano que guarde semelhança com a falha sob análise.
14 - Segundo as entrevistas, não existe registro de falha, ou de defeito semelhante em qualquer outro equipamento que mantenha contato com o vapor de processo que circula no trocador de vapor acidentado.
15 - Segundo as entrevistas, o cabeçote do trocador de calor nunca esteve exposto a sobrecargas de pressão, ou de temperatura. Os limites operacionais estabelecidos no projeto de trocador de calor foram sempre respeitados.
16 - Segundo as entrevistas, a veia do vapor de aquecimento pode ter passado por curtos períodos de contaminação por espécies químicas procedentes do processo. Tais eventos não são exatamente documentados, mas não há registro de impacto dessas contaminações sobre a integridade estrutural de outros equipamentos e tubulações.
Levantamento documental
17 - Os desenhos de fabricação confirmam que a construção do trocador de calor se regeu pelo Código ASME BPVC Sec. VIII, Div. 1, Ed. 1999.
18 - Os desenhos de fabricação formalizam as características operacionais do trocador de calor de interesse para a Análise de Falha.
Exame em laboratório - Análise química de amostra extraída do metal depositado
19 - A composição química do metal depositado da junta entre o tampo elíptico e o anel calandrado é incompatível com qualquer metal de solda prescrito pelo Código ASME BPVC Sec. VIII, Div. 1. Tal circunstância caracteriza uma não conformidade de fabricação.

A.2.4 Etapa III: Interpretação

A.2.4.1 Mecanismos de dano ativos e mecanismo de dano promotor da falha

Analisando a morfologia dos defeitos, caracterizada no exame metalográfico de campo, o responsável técnico identificou dois mecanismos de dano ativos:

- (I) corrosão sob tensão, com atuação restrita ao metal depositado do cordão de solda entre o tampo elíptico e o anel calandrado;
- (II) corrosão-fadiga, ativo apenas nos metais base adjacentes ao cordão de solda.

Essa conclusão parcial resulta de julgamento baseado na literatura e na memória própria do responsável técnico.

As trincas por corrosão-fadiga apenas se iniciam nos metais base quando uma trinca por corrosão sob tensão em propagação no metal depositado alcança a zona de ligação correspondente. Tal fato aponta a corrosão sob tensão como o mecanismo de dano promotor da falha.

A.2.4.2 Primeiro objetivo estabelecido pelo proprietário - Identificação da causa raiz

Uma vez identificado o mecanismo promotor da falha, trata-se em sequência de analisar sua atuação para então eleger a causa raiz.

A falha é promovida pelo mecanismo de corrosão sob tensão, mas este atua em série com o mecanismo de corrosão-fadiga. A taxa de propagação das trincas por corrosão sob tensão é incerta. Ela será rápida em períodos curtos, quando as condições de ambiente lhe são favoráveis, após o que as trincas podem permanecer inativas por longo período. O exame metalográfico de campo confirma que no caso presente a propagação das trincas por corrosão fadiga é descontínua. Corrosão-fadiga, por sua vez, apresenta em geral taxas de propagação baixas. Tendo em conta a combinação entre esses mecanismos, o mais provável é que a falha por vazamento tenha ocorrido após um longo tempo de propagação, possivelmente com extensão de muitos meses, ou de vários anos. Nesse caso teria havido oportunidade para que inspeções rotineiras aplicadas ao trocador de calor identificassem a manifestação do dano, evitando assim a falha.

As seguintes razões descaracterizam a possível ineficiência das inspeções rotineiras como causa raiz para a falha analisada:

- (I) a manifestação que resultou na falha é atípica em trocadores de calor fabricados em aço carbono e operando com vapor superaquecido;
- (II) nenhuma ocorrência anterior em equipamentos, ou tubulações a montante e a jusante do trocador acidentado sinalizou a possibilidade dessa manifestação;
- (III) o cabeçote do trocador de calor não opera sob solicitações mecânicas severas o suficiente para justificar a inspeção rotineira da solda que veio a falhar em operação.

Em continuidade ao processo de análise, segue-se a revisão das condições indispensáveis para a atividade do mecanismo de corrosão sob tensão:

- (I) presença de água no estado líquido, ou, ao menos de umidade;
- (II) presença de um contaminante em solução com a água;
- (III) susceptibilidade do material à solução assim formada.

A presença de água é intrínseca à função do trocador de calor. Ainda que em operação normal o vapor possa se apresentar superaquecido e seco, durante períodos de parada e de partida haverá água em contato com as paredes do cabeçote. A presença de água deve ser desconsiderada como causa raiz para a falha.

Seja qual for o contaminante, ele entra em contato da mesma forma com o metal depositado de várias outras soldas presentes no cabeçote, assim como também mantém contato com metais base distintos. Apenas o metal depositado da junta soldada entre o tampo elíptico e o anel calandrado é atacado por corrosão sob tensão. A presença do contaminante é descartada como causa raiz da falha. Torna-se evidente que a susceptibilidade do material ao meio foi determinante para a falha. Segundo o "teste da não ocorrência", se o metal depositado da junta soldada entre o tampo elíptico e o anel calandrado apresentasse o mesmo comportamento de todos os demais materiais empregados no cabeçote, a falha não teria acontecido. A essa evidência soma-se o fato da análise química mostrar que nessa solda foi empregado um consumível em desacordo com o Código de Projeto aplicável.

O conjunto dos argumentos justifica a decisão do responsável técnico em eleger como causa raiz da falha a utilização pelo fabricante do trocador de calor de consumível de solda inadequado. A causa raiz é genericamente classificada como um erro de fabricação.

A.2.4.3 Segundo objetivo estabelecido pelo proprietário - Definição dos reparos necessários

Imediatamente após a conclusão da atividade de campo relacionada à análise de falha, o proprietário decidiu aplicar um reparo emergencial no cabeçote. Tal reparo consistiu em:

- (I) completa remoção do cordão de solda danificado e das descontinuidades adjacentes contidas nos metais base;
- (II) reconstituição da solda de ligação entre o tampo elíptico e o anel calandrado mediante procedimento de soldagem qualificado.

A causa raiz da falha reside na inadequação do consumível empregado na junta soldada durante a fabricação do cabeçote. O reparo emergencial pode ser validado como um reparo definitivo.

A.2.4.4 Terceiro objetivo estabelecido pelo proprietário - Definição de medidas preventivas

O reparo aplicado é suficiente para a recuperação da adequação ao uso, e o trocador de calor não necessita qualquer atenção adicional de inspeção, além das rotinas usuais a ele destinadas pelo proprietário.

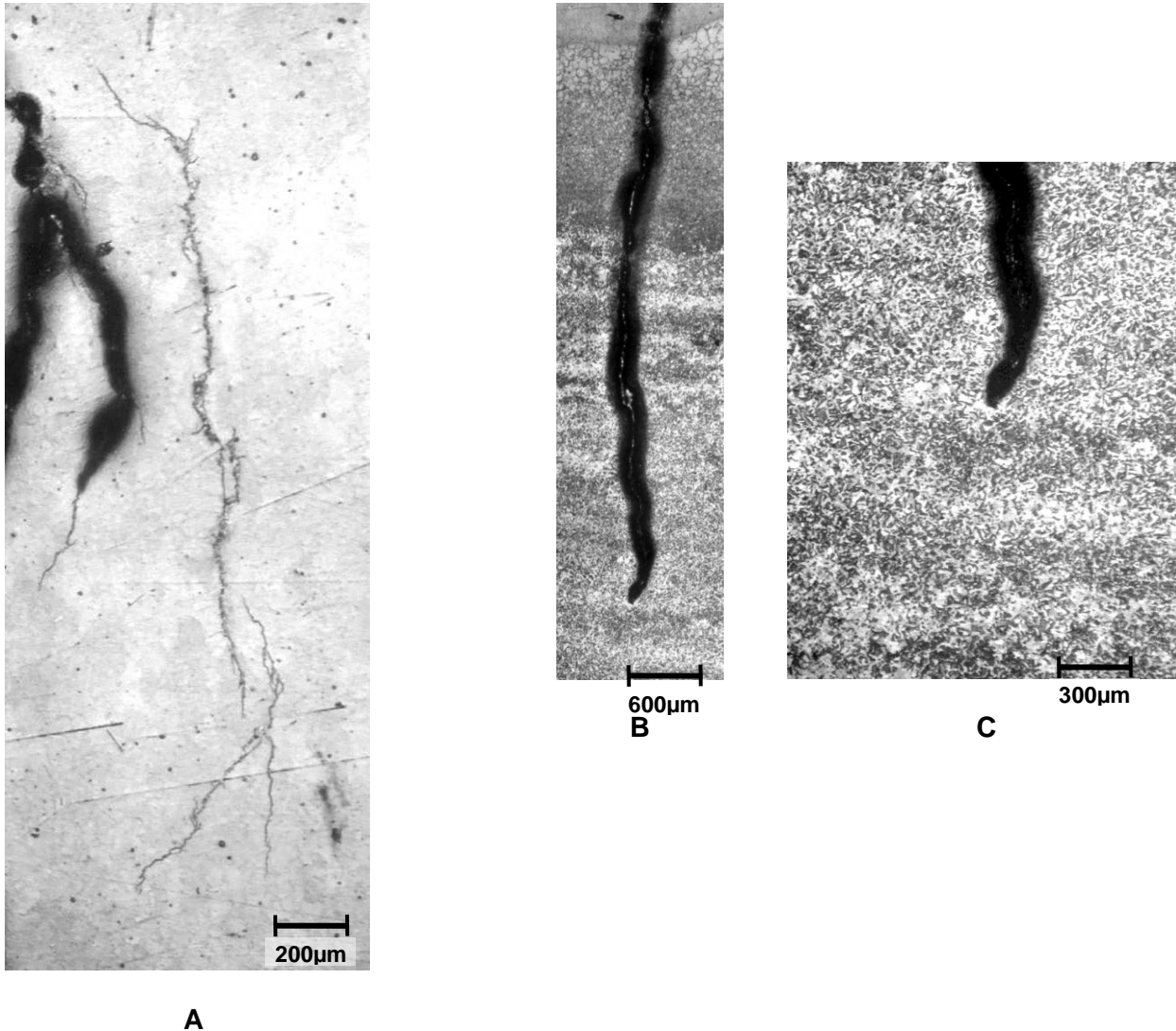


FIGURA A.2 - A: Metal depositado da junta soldada entre o tampo elíptico e o anel calandrado mostrando múltiplas trincas ramificadas de distintas aberturas. Os segmentos capilares indicam atividade recente. A morfologia é típica de danos resultantes de corrosão sob tensão. Superfície interna do cabeçote, polimento mecânico, sem ataque, réplica metalográfica metalizada por deposição de ouro. B e C: Metal base do anel calandrado onde se observa uma trinca singela de grande abertura e raiz arredondada. Essa morfologia é característica do dano por corrosão-fadiga, quando a trinca se mantém por certo tempo sem propagação. Superfície interna do cabeçote, polimento mecânico, ataque químico por Nital 2%, réplica metalizada mediante deposição de ouro.