



**Universidade de
Aveiro
2007**

Departamento de Engenharia
Mecânica

**Luis Filipe Pereira de
Almeida**

**Tubagens Industriais de Alto Risco: Materiais
Fiabilidade e Inspeção RBI**



**Universidade de
Aveiro
2007**

Departamento de Engenharia
Mecânica

**Luis Filipe Pereira de
Almeida**

**Tubagens Industriais de Alto Risco: Materiais
Fiabilidade e Inspeção RBI**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em (designação do mestrado), realizada sob a orientação científica do Dr. Francisco José Queirós de Melo, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Júri de Mestrado:

Presidente: Prof. Dr. José Joaquim de Almeida Grácio
Professor Catedrático, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

Vogais: Prof. Dr. Luís António Andrade Ferreira
Professor Associado com Agregação, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial,
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
(arguente)

Prof. Dr. Robertt Ângelo Fontes Valente
Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro
(arguente)

Prof. Dr. Francisco José Malheiro Queirós de Melo
Professor Associado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro
(orientador)

Agradecimentos

Este trabalho, apesar de representar maioritariamente o esforço do autor, dependeu de sugestões e palavras de apoio de pessoas e entidades:

- Ao prof Andrade Ferreira que forneceu as primeiras referências quando o autor ainda completava o tema de Projecto na licenciatura;
- Ao Prof José Grácio, orientador na disciplina de projecto, que possibilitou ao autor o início no entusiasmo na área de manutenção;
- Ao Prof António de Sousa, também pela orientação e toda a disponibilidade durante a disciplina de projecto,
- Ao Eng Manuel Rodrigues, por todo o apoio e orientação de um homem com muita experiência na área de manutenção;
- Ao Prof Queirós de Melo pela sua disponibilidade interesse e colaboração no decorrer do trabalho.

Por fim não pode o autor deixar aqui neste modesto espaço o carinho e apreço que tem pelos seus Pais, Avós e sua esposa Joana Pinho.

Resumo

Este trabalho, pretende reflectir a actividade do autor no período pós licenciatura, em que prosseguiu a sua actividade profissional na certificação e manutenção de parques industriais. Esta actividade é de indiscutível importância pelo factor de garantir a operacionalidade de equipamentos, e pela minimização do risco de avaria, para que o intervalo entre paragens indesejadas seja o maior possível. Esta área de engenharia, representa um constante desafio, a optimização e actualização das técnicas e estratégias usadas nos programas de manutenção e inspecção. A particularizar este facto, refere-se o uso do critério RBI, como base de análise e classificação estabelecendo níveis de risco que juntamente com a probabilidade de falha dos equipamentos, estabelecerá níveis de fiabilidade.

O autor pôde, conseqüentemente desenvolver trabalho nesta área com os métodos acima referidos.

Objectivo

Neste trabalho pretende-se descrever o pensamento e conduta técnica ao efectuar uma manutenção eficaz e credível numa instalação industrial.

Estes fundamentos enquadram-se num plano de inspecção de carácter eminentemente prático possibilitando ao executante a clarificação por níveis de fiabilidade os equipamentos aplicando o RBI.

Palavras-chave

Fiabilidade, Tubagens, Inspeção, RBI, Inconel, Risco, Probabilidade de Falha.

ÍNDICE

1 Introdução

- 1.1 Considerações Gerais
- 1.2 Áreas de Conhecimento com Interação no Projecto de estruturas de Tubagem
- 1.3 Referências

2 Fiabilidade de Instalações Industriais

- 2.1 O Conceito de Fiabilidade
- 2.2 O Conceito de Falha como oposto à Fiabilidade de Sistemas
- 2.3 Objectivo dos Modelos de Fiabilidade
- 2.4 As Incertezas do Processo de Análise de Fiabilidade
- 2.5 O problema Fundamental
- 2.6 Níveis de Fiabilidade
- 2.7 Síntese do Capítulo
- 2.8 Referências

3 Conceitos da Mecânica de Fractura de Caracterização da Falha Mecânica de Componentes Industriais

- 3.1 O Factor de Intensidade de Tensão. Modos de Propagação de Fendas
- 3.2 Materiais Dúcteis. Estimativa do factor de Intensidade de Tensão. Conceito de Raio Plástico
- 3.3 Fendas Superficiais: estimativa do factor Intensidade de tensão
- 3.4 Referências

4 RBI (*Risk Based Inspection*)

- 4.1 Introdução
- 4.2 O Conceito do Factor de Risco
- 4.3 A Norma RBI
- 4.4 Planear uma Inspeção RBI
- 4.5 Recolha de dados e Informação para Avaliação RBI
- 4.6 Referências

5 Identificação dos Mecanismos de Deterioração e Modos de Falha no Âmbito do RBI

- 5.1 Falha e Modos de Falha para o RBI
- 5.2 Mecanismos de Deterioração
- 5.3 Avaliação da probabilidade de Falha
- 5.4 Avaliação das Consequências de Falha
- 5.5 Determinação do Risco, Avaliação e Gestão
- 5.6 Gestão do Risco

6 Frequência das Inspeções de Tubagens

- 6.1 Introdução
- 6.2 Prática de Inspeção de Tubagens
- 6.3 Procedimento Geral de Inspeção
- 6.4 Trabalho Pré-Inspeção de Tubagens

7 Análise do Modelo Fluido-Tubagem Assumido

- 7.1 Classificação de Tubagens Mediante o Perigo (API 570)
- 7.2 Classificação da Tubagem PSSR
- 7.3 Classificação do Fluido (Código 704 – N.F.P.A)
- 7.4 Tubagens Mais Usadas no Transporte de Fosgênio

8 Cálculo dos Níveis de Fiabilidade de Instalações Usando o RBI

- 8.1 *Checklist* de Inspeção Externa
- 8.2 Resultados Obtidos/acções Correctivas
- 8.3 Análise da Probabilidade de Falha
- 8.4 Factores de Probabilidade de Falha
- 8.5 Cálculo da Probabilidade de Falha
- 8.6 Cálculo do Nível de Fiabilidade RBI
- 8.7 Apresentação de Resultados

9 Conclusões e Futuro Desenvolvimento

- 9.1 Porquê usar o RBI
- 9.2 Principais Vantagens da Aplicação RBI
- 9.3 RBI em Síntese
- 9.4 Aplicabilidade do Método

1 Introdução

Estado da Arte sobre o Projecto e Manutenção de Sistemas de Tubagens

1.1 Considerações Gerais

Uma tubagem é essencialmente uma estrutura de transporte de fluidos. Deve ter capacidade de resistir a sistemas de forças bastante complexas, tais como:

- O peso próprio e o peso do fluido circulante;
- Pressão interna (se existir);
- Efeitos localizados nos suportes e ligações a outros equipamentos;
- Os efeitos de expansão térmica. A intensidade dos esforços assim gerados pode por em causa a integridade e segurança de toda a estrutura, de modo que as maiores precauções no âmbito da engenharia de projecto destes sistemas incide precisamente na detalhada caracterização das forças geradas na tubagem por efeito da referida expansão térmica.
- As solicitações aerodinâmicas. De referir que, em situações excepcionais podem induzir-se forças, devidas a esta causa. É objectivo dos códigos de dimensionamento, embora incida fora do âmbito deste trabalho. Contudo refere-se aqui a importância da inclusão no projecto.

- Efeitos esporádicos devido a solicitações sísmicas. O tratamento destes efeitos mecânicos a nível de projecto incide, essencialmente na atribuição de um factor dinâmico equivalente a avaliar as forças dinâmicas.
- Interacção solo-estrutura (no caso de tubagens enterradas). O tratamento destas estruturas é bem mais complexo que os casos anteriores. De facto, o solo exerce forças radiais (devidas à massa e transmissão de eventuais cargas de superfície) e forças tangenciais, devidas ao atrito. Este sistema de forças é bastante difícil de modelar, assim como o comportamento mecânico de um corpo granular (o solo), que é bastante heterogéneo. Estas dificuldades referem-se não só às forças estáticas mas também às dinâmicas; nomeadamente as provenientes de actividades sísmicas. Um modelo simplificado permitindo conhecer a força radial sobre uma tubagem enterrada será analisado mais adiante neste trabalho.

Para além destes factores mecânicos, existem outros relacionados com a sensibilidade do material a acções químicas. Estes factores são de extrema importância na integridade da tubagem, que combinados com solicitações mecânicas podem comprometer a segurança e o bom desempenho das tubagens. O efeito de corrosão em juntas soldadas, bem como em todo o equipamento, é acelerado quando um campo de tensões actuar em simultâneo; de facto, a nível microestrutural, o campo de tensões pode promover a rotura de ligações intergranulares na liga metálica, permitindo a passagem de fluidos quimicamente agressivos que aceleram a formação e percipitação de compostos químicos com resistência mecânica bem inferior à do material na fase inicial, debilitando as propriedades mecânicas previstas e acelerando fenómenos de propagação de fendas. A fim de prevenir estes efeitos nefastos para a integridade dos componentes no complexo industrial, são usados meios de detecção durante os procedimentos de inspecção permitem obter uma informação quanto ao estado dos componentes examinados. Mais adiante no capítulo 5, será referido detalhadamente através dos métodos de inspecção e detecção, as causas prováveis da geração de defeitos em tubagens.

Os problemas anteriormente mencionados, constituem naturalmente uma pequena parte do conjunto de variáveis a considerar na formação bem sucedida de um projecto, de um complexo de tubagens (ou mesmo num troço do sistema com papel específico no complexo de processo

químico ou termodinâmico). O bom desempenho destes projectos está assente numa constante investigação nas mais variadas áreas de modelação numérica e experimental na concepção e validação estrutural. De facto o assunto é tão vasto e tem tantas ligações a campos aparentemente sem afinidade com este, que é-se obrigado aqui a restringir os assuntos àqueles que têm envolvimento mais óbvio nesta área de engenharia de projecto e de manutenção. A complexidade do traçado geral, como mostra o exemplo na fig. 1, deixa o alerta aos projectistas do muito trabalho que os espera na elaboração bem sucedida do projecto.



Fig. 1.1 - Exemplo de um complexo de tubagens numa industria química (*MOSAIC Industries*; figura obtida de http://www.pipepak.com/news_pub/cust_app/mosaic/default.asp)

O bom desempenho de um sistema de tubagens está essencialmente associado à garantia de um transporte (escoamento à pressão prevista no projecto) de fluidos com o rendimento previsto e sem problemas dentro de um período de tempo sem intervenção de manutenção não prevista. Aquele desempenho depende, logo no início do arranque do processo de funcionamento, de um adequado desenho ou traçado.

Na questão anterior das solicitações geradas, durante o funcionamento em condições previstas no projecto, refere-se que, se o desenho de uma tubagem é adequado (sob o ponto de vista de solicitações mecânicas), significa que as suas forças e reacções geradas durante o funcionamento, não provocam tensões e deformações susceptíveis de distorcer permanentemente, determinados elementos da tubagem. Para garantir um adequado desenho, é necessário dotar a tubagem de um conjunto de suportes com capacidade para absorver esforços e permitir deslocamentos em direcções convenientes, como será discutido com mais pormenor mais adiante neste trabalho.

Pode-se desta forma assegurar a sua estabilidade geométrica e controlo da interacção, relativamente a outros elementos do complexo industrial, como é o caso de reservatórios, bombas e reactores.

1.2 Áreas de Conhecimento com Interação no Projecto de Estruturas de Tubagens

1.2.1 Códigos de Dimensionamento e Normalização de Projecto

Na fase de projecto de uma estrutura de tubagens, podemos resumir a interação de áreas essenciais ao apoio do projecto no diagrama a seguir apresentado (fig. 1.2):

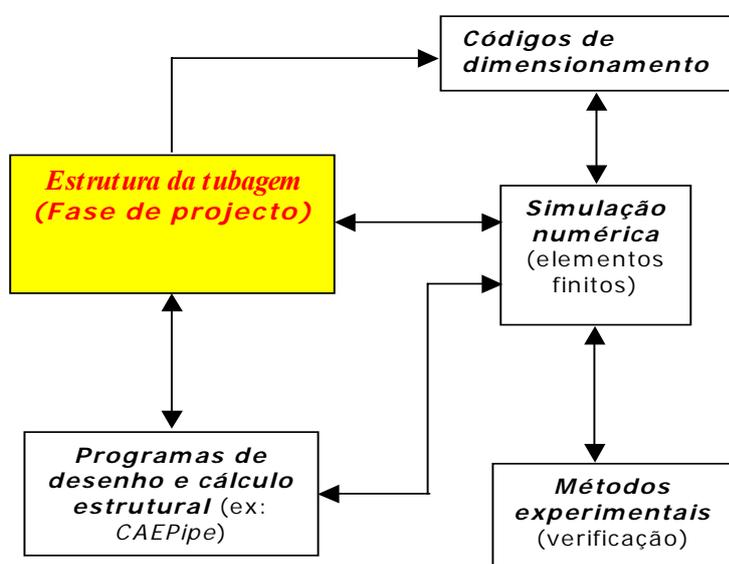


Fig. 1.2 – Diagrama de interação de áreas de investigação aplicada ao projecto de tubagens

Ao lançar o projecto de uma tubagem, as entidades responsáveis consideram primeiramente que tipo de fluido será transportado. As suas características de inflamabilidade e toxicidade, têm importante implicação no traçado inicial no que respeita a zonas habitadas, cursos de água e áreas florestais. Face a estes factores, pode o traçado não ter a configuração mais económica, mas terá seguramente um melhor enquadramento em directivas referentes à segurança de pessoas e impacto ambiental. Desta forma poder-se-á partir para um desenho da linha central da tubagem, com melhor definição, representável num diagrama tridimensional.

Surge então o isométrico de definição inicial. A partir desta etapa, uma estratégia de escolha e definição do tipo de suportes, a seleccionar e localizar para a tubagem, pode ser efectuada a partir de códigos de dimensionamento, que actualmente são desenvolvidos e constantemente actualizados por comissões técnicas (ligadas ao sector fabril e à investigação universitária). Naturalmente espera-se um maior contributo dos países mais industrializados, como é o caso dos Estados Unidos da América, com o *ASME* (American Standards for Mechanical Engineerin) e o *API* (American Petroleum Institute).

Estas especificações, são amplamente usadas em construção de instalações industriais, em praticamente todo o mundo. Na Europa Comunitária, aplicam-se actualmente o *EUROCODE* e as normas do *BSI* (British Standards Institution), com âmbito semelhante ao código *ASME*.

Dada a sua enorme importância e extensão de áreas de dimensionamento tratadas, este código é seguido em muitos países europeus, em particular Portugal.

a) O Código ASME

A versão relativamente recente do Código ASME contém as seguintes secções que abordam áreas específicas de engenharia de reservatórios de pressão:

- **Secção I** – *Caldeiras e Geradores de Vapor para Produção de Energia (power boilers);*
- **Secção II** – *Especificações de Materiais (partes A e B);*
- **Secção III** – *Produção de Energia Nuclear (divisões I e II);*
- **Secção IV** – *Caldeiras e Geradoras de Vapor para Aquecimento;*
- **Secção V** – *Testes Não Destrutivos;*
- **Secção VI** – *Manutenção de Sistemas Geradores de Vapor para Aquecimento;*

- **Secção VII** - *Manutenção de Sistemas Geradores de Vapor para Produção de Energia;*
- **Secção VIII** – *Cálculo de Reservatórios de Pressão (divisões I e II);*
- **Secção IX** – *Especificações de Soldadura (também envolvendo a Secção II parte C);*
- **Secção X** – *Projecto de Reservatórios de Pressão em Plástico Reforçado por Fibras.*

b) As normas de BSI, British Standards Institution

São especificações emitidas pela Instituição Britânica de Normalização (BSI) destinada à indústria metalomecânica geral. Contém numerosas especificações referentes ao projecto e teste estrutural de componentes mecânicos. A sua consulta está actualmente assegurada através das potencialidades da Internet, sendo necessário que se seja subscritor do serviço.

c) O Eurocódigo (EUROCODE)

Trata-se de um extenso conjunto de normas e especificações de aplicação generalizada em estruturas em vigor na Comunidade Europeia. Não contemplando objectivamente divisões sobre construção de instalações industriais (tubagens, reservatórios de pressão, reservatórios de armazenagem), inclui importantes recomendações sobre o cálculo tendo em conta o tipo de juntas a ligar diferentes elementos estruturais (por exemplo, ligações aparafusadas e ligações soldadas), bem como a avaliação da integridade estrutural em presença de forças sísmicas em que se regista importante efeito da interacção fluido-estrutura (1998)

A contribuição das normas e especificações em vigor, são um elemento essencial para assegurar o funcionamento, correcto e fiável de uma instalação industrial.

Estes procedimentos ajudam na prevenção e minimização de erros de projecto, uma vez que contêm especificações construtivas.

Os códigos e normas de desenho e cálculo, estão fundamentados numa apurada investigação, usando modelação numérica e verificação experimental.

Pode-se adiantar, que praticamente a totalidade das especificações dos códigos de dimensionamento, estão baseadas em resultados obtidos por modelação numérica, de elementos estruturais e respectivo sistema de forças, integrados em instalações industriais.

A modelação numérica tem melhorado, com a contribuição do constante desenvolvimento na área do método de elementos finitos, bem como outras soluções especificamente desenvolvidas, para estruturas tipo casca (reservatórios pressurizados ou não e tubos sujeitos a sistema de forças generalizadas).

Desde longa data, que os investigadores se têm preocupado com a determinação do estado de tensão, em acessórios para instalações industriais, a fim de o relacionar com fenómenos de propagação de defeitos e interacção com ambientes quimicamente agressivos.

Existe uma grande quantidade de informação sobre esta área de conhecimento aplicado a instalações industriais, correndo o autor deste trabalho o risco de omitir algumas de considerável importância histórica. Contudo um esforço maior será concentrado na citação das referências mais recentes.

1.2.2 Códigos de Elementos Finitos no Cálculo de Instalações Industriais

Dada a indiscutível importância do projecto de instalações industriais, quer na acção sobre a economia dos países onde laborem, quer no impacto causado nas comunidades (segurança e minimização de consequências adversas ao ambiente), os processos de simulação numérica do funcionamento de tais projectos tem elevada importância por representar um meio económico de previsão do desempenho do complexo industrial em laboração. Para se obter uma informação credível sobre este propósito, é necessário que as modelações numéricas levadas a cabo contemplem entre outros parâmetros, todas as causas susceptíveis de afectar o funcionamento da instalação. Refira-se por exemplo, as acções mecânicas e térmicas já mencionadas anteriormente).

Existe uma grande escolha de módulos comerciais que o projectista pode adquirir a fim de encurtar o tempo destinado ao desenvolvimento de várias etapas de projecto. Actualmente qualquer módulo comercial de elementos finitos pode servir para modelar o comportamento de um sistema de tubagens; contudo, alguns permitem com grande comodidade aceder a uma biblioteca de acessórios prontos a incluir no projecto sem necessidade de os desenhar e examinar previamente quanto ao seu comportamento estrutural em separado; como bom exemplo para esta tarefa é de referir os sistemas de suportes, mangas de expansão (tipo fole metálico) e acessórios curvos.

Vamos citar apenas alguns dos módulos comerciais mais conhecidos pela constante actualização e especialização permitida na realização de projectos na área aqui discutida:

- **CAEPIPE**[®] - Aparece em 1983 como o primeiro programa de análise de tensões em tubagens industriais sob esforços generalizados, seguindo as normas do ASME, BSI, API e NEMA. (SST Systems, Inc., 1641, N. First Street, Suite 275, San Jose, CA 95112-4817, USA, <http://www.sstusa.com/caepipe.htm>) (pronunciado *key-pipe*).
- **PIPESTRESS**[®] - Módulo comercial, de grande difusão entre projectistas de instalações industriais, principalmente na Europa. (81, Avenue Louis-Casai 1216 Geneva, Switzerland, <http://www.dst.ch/pipestress.htm>).
- **ALGOR**[®] - Completo módulo de elementos finitos, que permite também ao utilizador efectuar análises de estrutura de sistemas de tubagens, nomeadamente investigar o complexo estado de tensão em elementos curvos, acessórios que não permitem conhecer o estado de tensão a partir de expressões simples usuais em análise elementar de estruturas. (ALGOR, Inc., 150 Beta Drive, Pittsburgh, PA 15238-2932 USA, <http://www.algor.com/default.aspx>).

A título de exemplo, a figura 1.3 mostra um exemplo de análise de deformações num tubo curvo com terminações tangentes por modelação numérica com o ALGOR[®]. Estes elementos, apresentando uma considerável flexibilidade, são bastante vulneráveis a esforços de flexão, podendo por repetição cíclica, apresentar fendas de crescimento acelerado por acção química (corrosão sob tensão). Estudos contínuos são efectuados nestes acessórios, a fim de caracterizar o estado de tensão e o seu reflexo em zonas particularmente solicitadas a fim de prever a formação e crescimento de defeitos. Esta análise é efectuada experimentalmente num tubo curvo sob flexão no plano de curvatura, usando rosetas de extensómetros com fio calibrado. (*Trabalho efectuado na Unidade de Análise Experimental de Tensões do INEGI, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, R. Dr Roberto Frias, 4099-465 Porto*).

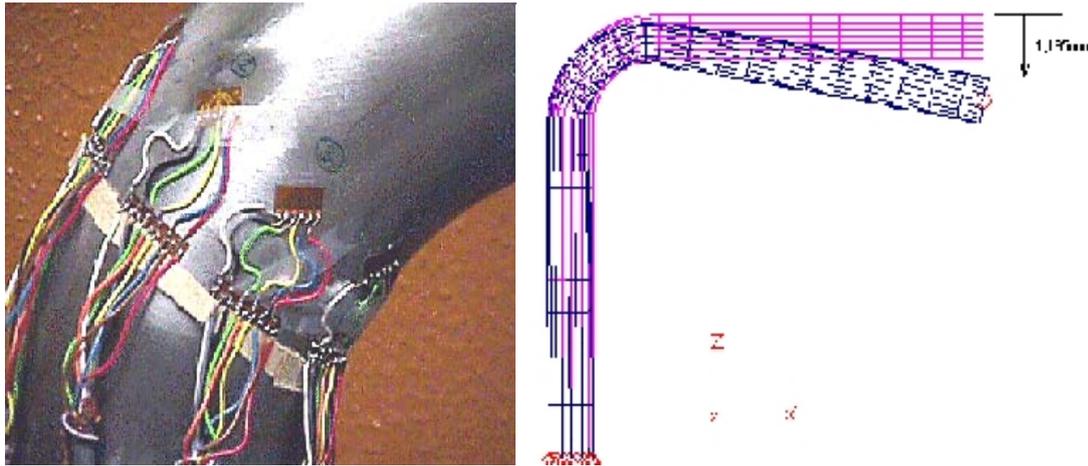


Fig. 1.3 - Análise de deformações num Acessório Curvo por Modelação Numérica e Verificação Experimental por extensómetros

Como foi referido, há actualmente programas de cálculo estrutural de sistemas de tubagens e instalações industriais permitindo com grande comodidade a modelação específica de alguns acessórios da instalação, como é o caso de suportes com características especiais e elementos curvos, sujeitos a esforços generalizados. Para permitir estas facilidades, muito tem contribuído a investigação efectuada no comportamento dos referidos acessórios, levada a cabo quer por modelação numérica, quer por testes experimentais reproduzindo tanto quanto possível as mesmas condições que são esperadas em serviço. Por exemplo, Ohtsubo H e Watanabe O, (1978), formularam um elemento de tubo curvo submetido a um sistema de forças generalizado, podendo tal elemento apresentar deformações em regime linear ou não linear. O uso destes elementos permite grande economia no número global dos graus de liberdade e na simplificação do desenho das malhas de elementos finitos. Bathe e Almeida (1983) formularam também elementos semelhantes destinados a esforços de flexão generalizados, mas com a contribuição da pressão interna, situação que tem grande influência na flexibilidade destes acessórios (ficam mais rígidos quando estão sob pressão interna). Os resultados obtidos por estes investigadores permitiram melhorar muito a formulação de elementos disponíveis nos códigos comerciais disponíveis, ou então pelo menos, indicar as limitações inerentes à sua utilização quando os resultados não fossem garantidos.

1.3 Referências

ASME, “The American Society for Mechanical Engineers”, *On-Line* editions; *Section VIII, Boilers, Pressure Vessels Code*,

http://engineers.ihs.com/collections/asme/asme-standards.html?MID=W094&s_kwcid=asme|383956942

BSI, *British Standards Institution*, *on-line* editions,

<http://www.techstreet.com/info/bsi.html> (de Thomson *on-line*);

http://global.ihs.com/standards.cfm?currency_code=USD&customer_id=21254A3A5F0A&shopping_cart_id=282538332949404C4A5A4D582E0A&rid=Z56A&mid=W084&country_code=US&lang_code=ENGL (de HIS *on-line*)

‘*EUROCODE 8 - European Committee for Standardization*,: Design provisions for earthquake resistance of structures – Part 4: Silos, tanks and pipelines’, 1998

Ohtsubo H e Watanabe O., "Stress Analysis of Pipe Bends by Ring Elements", *Trasn. ASME, Journal of Applied Mechanics*, 1978, Vol. 100, pp.112-121

Bathe, K.J., Almeida, C.A., Ho, L.W.. "A Simple and Effective Pipe Elbow Element - some Non-Linear Capabilities", *Computers & Structures* 17 659 - 667, 1983

Software de projecto e cálculo:

CAEPIPE[®] - SST Systems, Inc., 1641, N. First Street, Suite 275, San Jose, CA 95112-4817, USA, <http://www.sstusa.com/caepipe.htm>

PIPESTRESS[®] - 81, Avenue Louis-Casai 1216 Geneva, Switzerland,

<http://www.dst.ch/pipestress.htm>

ALGOR[®] - Inc., 150 Beta Drive, Pittsburgh, PA 15238-2932 USA,

<http://www.algor.com/default.aspx>

2 Fiabilidade de Instalações Industriais:

“ Manutenção e Previsão de Risco em Estruturas de Tubagens ”

2.1 O Conceito de Fiabilidade

Entende-se por fiabilidade no sentido mais lato, como sendo uma característica de um sistema organizado ou projecto, que oferece ao utilizador uma sensação de confiança. É a qualidade de algo em que se verifica o cumprimento dos objectivos.

É a qualidade de algo que tem extrema confiança.

Se algo ou alguém transmite segurança e confiança, então temos a fiabilidade. A probabilidade de que um equipamento ou componente de um sistema, funcionar dentro dos parâmetros de qualidade definidos, durante um determinado período de tempo, sob as condições de funcionamento preestabelecidas. O funcionamento de um equipamento é satisfatório se cumprir os requisitos fixados.

A Engenharia de fiabilidade é um campo específico no estudo de sistemas e seu funcionamento

De uma forma simples pode adiantar-se que um equipamento é fiável, se este cumprir os requisitos exigidos pela boa pratica da fiabilidade.

2.2 O Conceito de Falha como oposto à Fiabilidade de Sistemas

Um equipamento fiável apresenta boa e eficaz resistênciã a uma acção ou solicitação, que tenha sobre ele um efeito adverso.

A fiabilidade é melhorada e garantida através de correctos planos de manuseamento, inspecção e manutenção.

Usar de uma forma adequada e correcta os equipamentos, inspeccioná-los com rigor e precisão e intervir com atempada manutenção, de forma a antecipar a falha, são excelentes medidas para garantir fiabilidade. A manutenção deve ser aplicada, com conhecimento da vida média do equipamento, para não cair em manutenção excessiva e desajustada. A falha é definida como um fenómeno que prejudica ou impede o normal funcionamento do equipamento. Este fenómeno terá maior probabilidade de ocorrer, se os requisitos de fiabilidade de um equipamento não forem cumpridos, e/ou se a manutenção e manuseamento não forem os correctos.

Este tema da fiabilidade, vai ser desenvolvido mais adiante em detalhe.

2.2.1 Generalidades

Um equipamento fiável apresenta uma relativa neutralidade e insensibilidade a causas externas susceptíveis de criar condições para que ele se degrade ou perca eficácia na função esperada. Havendo acções mecânicas, podemos reconhecer o equipamento como fiável se ele continuar a desempenhar as funções para que foi projectado de modo estável, resistindo às acções mecânicas susceptíveis de o danificar ou avariar.

A falha é definida como o fenómeno do não cumprimento dos requisitos de fiabilidade do equipamento; o sistema deixa de funcionar dentro dos parâmetros de um sistema desempenhando com eficácia os objectivos para que foi concebido. Um sistema fiável não tem falhas com frequência (uma vez que é reconhecido que a ausência absoluta de falhas não é possível). A fiabilidade do equipamento é melhorada (ou pelo menos mantida em elevados padrões) ou garantida através de correctos planos de *manuseamento, inspecção e manutenção*. Usar de uma forma adequada e correcta os equipamentos, inspeccioná-los com rigor e precisão e intervir com atempada manutenção, de forma a antecipar a falha, são medidas imprescindíveis para garantir a fiabilidade do equipamento.

Como foi referido, há causas presentes num equipamento em serviço que actuam de modo mais ou menos rápido no sentido de criar condições para que o equipamento deixe de funcionar correctamente ou mesmo parar de operar. Estes acontecimentos apontam quase sempre para cenários a evitar pois quando são de pequenas consequências, constituem sempre um prejuízo financeiro para a empresa onde operem; por outro lado, há casos em que as consequências já podem ter reflexos bastante graves quando comunidades ou agregados populacionais são afectados na sua saúde ou conforto. Esta possibilidade determina que inspecções periódicas sejam incluídas num programa de manutenção do sistema; no entanto, dado que uma acção de inspecção

significa um elevado esforço orçamental para a empresa detentora do equipamento a inspeccionar, as inspecções devem ser decididas segundo uma *estratégia de probabilidade* de acontecimento (que se pode associar a um *risco*) de falha. Naturalmente as acções de inspecção devem incidir com maior frequência nos equipamentos operando nas condições mais severas e durante mais tempo. Há pois um conjunto de factores que determinam a extensão de uma inspecção e os itens a examinar num complexo industrial. A manutenção deve pois ser decidida e levada a cabo tendo um bom conhecimento da vida média dos equipamentos, de modo a evitar-se manutenção excessiva e desajustada.

2.2.2 Caracterização Probabilística das Avarias em Equipamentos Industriais

Foi referido que os componentes de uma instalação industrial ou equipamento estão sujeitos a causas susceptíveis de criar condições de funcionamento deficiente dentro de um certo lapso de tempo. As causas potenciando as condições para que o equipamento ou componente tenha um desempenho decrescente, conducente a probabilidade de avaria, podem ocorrer de modo permanente ou ocasional. No primeiro caso, é bastante mais fácil ao projectista determinar as condições em que o componente deve ser concebido de modo a resistir às causas adversas actuando de modo mais ou menos permanente; já o caso de causas esporádicas ou ocasionais, deve ser tratado considerando uma probabilidade de ocorrência de tais causas.

Deste modo, a avaria de um equipamento pode ser caracterizada pelas seguintes condições:

- Uma probabilidade de ocorrência da causa determinando as condições de avaria;
- Uma probabilidade do componente, agora em presença das causas determinando condições para avaria, resistir durante determinado intervalo de tempo antes que se realize uma intervenção de manutenção.

Estes dois pontos, numa perspectiva simplista de explicação dos objectivos da manutenção industrial constituem naturalmente um importante procedimento enquadrado nas regras de manutenção de equipamentos e instalações industriais. Tais pontos são objectivo dos programas de manutenção actualmente seguidos por equipas de gestão de instalações industriais em praticamente todos os países economicamente desenvolvidos. Neste trabalho dar-se-á ênfase a um eficiente e credível programa de manutenção aplicado a instalações industriais, o *Risk based Inspection* conhecido pela sigla *RBI*, actualmente adoptado nos Estados Unidos da América. Fazendo cada vez mais parte de planos de manutenção em equipamentos industriais na Europa Comunitária e particularmente em Portugal. Neste trabalho o *RBI* é usado na elaboração de procedimentos de inspecção e manutenção em instalações industriais efectuadas pelo autor.

2.3 Objectivo dos Modelos de Fiabilidade

É pois compreensível que o objectivo da teoria de fiabilidade estrutural, seja tratar as incertezas que envolvem o projecto de estruturas, de forma a garantir um valor aceitável da sua probabilidade de falha. Desta forma permite evitar surpresas no desempenho e comportamento de equipamentos, prevendo falhas e evitando sucessivas reparações. O sistema de fiabilidade, estuda as possíveis falhas e avarias dos equipamentos, de forma a maximizar o seu tempo de vida, e compreender todo o seu funcionamento. Um correcto plano de manuseamento, inspecção e manutenção, é a base para garantir que a fiabilidade se mantenha em níveis de desempenho elevado.

Dada a natureza aleatória das variáveis envolvidas no processo de dimensionamento estrutural (solicitação, resistência dos materiais, etc.), não é possível garantir que uma estrutura seja absolutamente segura.

Os investigadores sobre este tema, tem procurado desenvolver modelos capazes de efectuar a previsão, e uma metodologia de risco sobre decisões respeitantes, á estratégia de manutenção de instalações industriais tendo em conta a sua fiabilidade. Em Portugal, Andrade Ferreira (1996, 1998, 1999) tem apresentado contribuições sobre este importante tema.

Será sempre necessário aceitar algum risco, embora este esteja dentro de níveis aceitáveis.

Este tema de fiabilidade e risco será desenvolvido em detalhe mais adiante no capítulo 4, sobre o uso do critério RBI.

2.4 As Incertezas do Processo de Análise de Fiabilidade

As incertezas que aparecem no processo de análise de fiabilidade podem ser de três tipos diferentes: *incertezas físicas*, *estatísticas* e de *modelo*. As *incertezas físicas*, estão relacionadas com o carácter aleatório das grandezas físicas, como a quantificação das acções, as características dos materiais, as dimensões das peças, etc.

Estas grandezas podem ser expressas através de processos estocásticos, e os seus valores só podem ser obtidos através da análise de informação recolhida.

No entanto, na maioria dos casos, a quantidade de informação que é possível obter não é suficiente para uma boa definição dos modelos estatísticos, o que dá origem ao segundo tipo de incertezas, as *incertezas estatísticas*. Por último, as *incertezas de modelo* estão relacionadas com a necessidade de criar modelos matemáticos para simular a realidade, modelos estes que estão inevitavelmente sujeitos a diversos tipos de simplificações.

2.5 O Problema Fundamental

A análise da fiabilidade de um sistema estrutural é um problema complexo, envolvendo um grande número de variáveis. Essencialmente estas variáveis dividem-se em dois grupos, aquelas que definem a acção e aquelas que definem a capacidade resistente da estrutura ou equipamento. A acção é definida, como a solicitação aplicada ao equipamento e o seu efeito associado.

A capacidade resistente do equipamento, representa-se e associa-se ao fenómeno de manter boas capacidades operatórias e estruturais, mesmo aquando solicitado durante o seu serviço, definidas na análise de fiabilidade e projecto.

A comparação entre a acção e a capacidade resistente, não deve ser levada a cabo directamente. O razoável e lógico da análise de fiabilidade, é a definição de outra variável que conjuga o efeito das duas anteriores. Esta variável denominada, *Efeito da Acção*, traduz o impacto da solicitação tendo em atenção a capacidade do equipamento de manter boas capacidades operatórias e estruturais.

Este efeito da acção, tem reflexo na probabilidade de falha e consequentemente na fiabilidade de um equipamento. Desenvolveremos estes conceitos no capítulo 4-RBI.

2.6 Níveis de Fiabilidade

Os níveis de fiabilidade no estudo estratégico aqui apresentado, serão definidos segundo os conceitos do método RBI (Capítulo 4), o qual estabelecerá 5 níveis de fiabilidade distintos.

Esta classificação, tem como fonte de informação a avaliação da Probabilidade de Falha, do anterior referido, método RBI, assunto a detalhar na descrição do método RBI, no sub item reservado ao conceito de probabilidade de falha.

2.7 Síntese do capítulo

Foram estabelecidas as linhas gerais de aplicação de um plano de caracterização de fiabilidade no regime de operação e funcionamento de instalações industriais e equipamentos. Para sistematizar e organizar o grau de fiabilidade, este terá 5 níveis distintos, baseados no método RBI consistindo este num *plano estratégico de tomadas de decisão* integradas em acções de manutenção de equipamentos ou instalações. A não observância das acções no sentido de cumprir o programa de manutenção pode levar a riscos relacionados com o funcionamento da instalação ou complexo. Estes riscos reflectem-se inevitavelmente em consequências em pessoas, no ambiente e na quebra de produção, de parques industriais.

Cabe ao RBI a estimativa desse risco, levando o seu utilizador à obtenção de uma fundamentação para as decisões em assumi-las ou não.

A aplicação deste critério assegurará a maior fiabilidade de funcionamento.

2.8 Referências

- (1996) – Ferreira, L.A, “Proportional Hazards Method in Maintenance“ – EuroMaintenance`96;
- (1998) – Ferreira, L.A, “Uma Introdução à Manutenção“ – Publindustria;
- (1999) – Ferreira, L.A, “Aplicação da Informática á Manutenção“ – 14º Congresso brasileiro de manutenção;

3 Conceitos de Mecânica da Fractura na caracterização da falha mecânica de componentes industriais

3.1 O Factor de Intensidade de Tensão. Modos de propagação de fendas

Qualquer componente estrutural tem uma constituição material que não é absolutamente homogénea nem isotrópica. No caso particular das ligas ferrocarbónicas, largamente aplicadas no fabrico de quase a totalidade de elementos estruturais, a sua constituição ao nível microscópico, revela heterogeneidades resultantes da presença de vários elementos químicos, que não apenas o ferro puro. No caso dos aços verifica-se uma fase dominante, a *ferrite*, estando esta combinada com outra fase, a *cementite*, de elevada dureza. A combinação em diversas proporções destas fases é característica dos diversos tipos de aços disponíveis, onde também outros elementos químicos podem ser usados para melhorar determinadas características mecânicas.

As substâncias mencionadas distribuem-se de modo discreto na matriz metálica, havendo fronteiras, designadas como juntas de grão, que separam os componentes. Estas juntas de grão são de elevada importância pois explicam muitos modos de falha mecânica de componentes. Sendo pois reconhecido que as ligas metálicas (em particular os aços) não tem de facto uma estrutura homogénea antes dispõem de um incontável número de microentalhes. Estes podem ser defeitos nas juntas de grão, nos entalhes decorrentes de processos de maquinagem ou devido ao meio corrosivo, entre outras causas. Os investigadores em Mecânica dos Sólidos verificaram que por aplicação de funções potenciais em análise de tensões em corpos contendo defeitos como fendas ou entalhes, o estado de tensão na vizinhança de tais defeitos atinge teoricamente valores extremamente elevados. A partir desta constatação, desenvolveu-se a *Mecânica da Fractura*, uma metodologia científica de modelação numérica e verificação experimental da integridade de corpos portadores de defeitos.

Pode dizer-se que o principal objectivo de Mecânica da Fractura é o de determinar se as micro-fendas ou entalhes poderão crescer no componente em serviço, atingindo um tamanho que determine a impossibilidade do componente não poder mais resistir ao esforço para que foi projectado e sofrer rotura irremediável (objectivo apresentado por T.J. Dolan, “*Preclude Failure: A Philosophy for Material Selection and Simulated Service Testing*”, SESA J. Exp. Mech., Jan. 1970).

Esta área da Ciência de Materiais é de indiscutível importância e está em constante desenvolvimento, quer na melhoria de métodos de aproximação numérica quer nos procedimentos experimentais.

Nesta secção será abordado, de modo introdutório apenas, como os conceitos da Mecânica da Fractura podem articular-se com a falha de componentes e determinar procedimentos para manutenção. Um parâmetro de grande importância na verificação da integridade de um componente portador de um defeito ou fenda, é o *factor de intensidade de tensão*, que informa o projectista desta questão:

Sendo reconhecido que existe um defeito no componente, para determinado estado de tensão, poder-se-á esperar que o componente resista e a que intensidade se deve limitar o esforço externo?

A Mecânica da Fractura apresenta numa abordagem linear-elástica uma perspectiva para esta questão a partir da expressão básica do FIT, *Factor de Intensidade de Tensão* (SIF, *Stress Intensity Factor*) para uma placa de dimensões virtualmente infinitas e sujeita a um estado plano de tensão, como mostra a fig. 2.1.

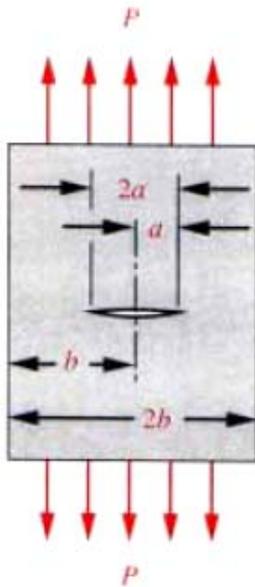
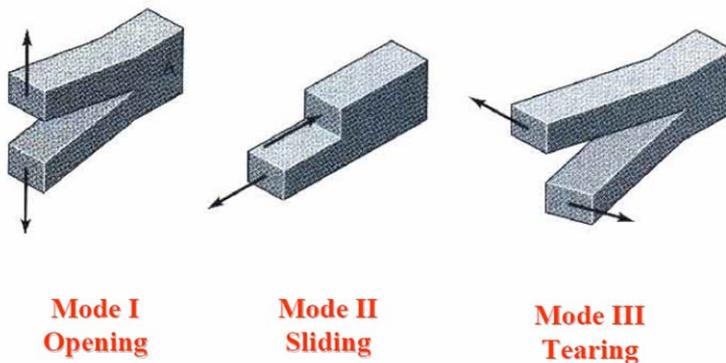


Fig. 3.1 – Placa portadora de uma fenda e sujeita a um estado plano de tensão (figura retirada das aulas de Mecânica da Fractura , *School of Engineering, University of Tennessee at Martin, 2004*)

O factor de intensidade de tensão designa-se por K e tem um índice de acordo com o modo de solitação e propagação ao longo do plano da fenda, como mostra a fig. 3.2.

Crack Displacement Modes



Hamrock, Fig. 6.8

Fig. 3.2 – Modos de solitação ao longo do plano de uma fenda numa placa (aulas de Mecânica da Fractura, do Prof Hamrock, *School of Engineering, University of Tennessee at Martin, 2004*)

O caso mais severo consiste no Modo I, em que a fenda tende a ser aberta por um campo de tensão normal ao plano da fenda:

$$K_I = \sigma_{\text{nom}} \sqrt{\pi a} \quad (3.1)$$

onde na expressão anterior, σ_{nom} é a tensão nominal (também designada tensão remota) a que está sujeito o componente (suposta sem defeito); a é o semi-comprimento da fenda (assumida existindo num plano) e b é a largura da placa (assume-se que $b \gg a$). As unidades de K no Sistema Internacional são $[\text{MPa m}^{1/2}]$.

Supondo que é possível obter (por meios experimentais) um valor crítico para o factor K_I , designado K_{IC} (associado naturalmente ao modo de carregamento ou solicitação), então para determinado tamanho do defeito caracterizado pelo semi-comprimento a (fig. 2.1) poderemos avaliar o limite para a intensidade da tensão remota que o componente suportará sem que a fenda se propague de modo incontrolado. Por exemplo, uma placa de alumínio série 2024 tem $K_{IC}=26 \text{ MPam}^{1/2}$; se uma fenda com semi-comprimento $a=1\text{mm}$ (0.001 m) for detectada, então a máxima tensão remota σ_{nom} que a placa pode suportar é:

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a}} = \frac{26}{\sqrt{\pi \times 0.001}} = 463 \text{ MPa} \quad (3.2)$$

Esta tensão excede bastante a tensão de cedência desta liga de alumínio (cerca de 210 MPa) o que mostra que a presença do defeito mencionado não constitui o principal motivo de falha da placa; este falhará por excesso de deformação plástica, não sendo a fenda que condicione tal. Já para uma fenda com semi-comprimento $a=50\text{mm}$, a tensão remota admissível é:

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{26}{\sqrt{\pi \times 0.05}} = 65.6 \text{ MPa} \quad (3.3)$$

já limitando consideravelmente o máximo esforço admissível.

3.2 Materiais dúcteis. Estimativa do Factor de Intensidade de Tensão. Conceito de raio plástico

O que acaba de ser resumidamente referido constitui um procedimento pouco usado em Mecânica da Fractura pois trata-se de uma situação ideal para praticamente todos os metais; de facto estes apresentam um comportamento com alguma ductilidade, de modo que na vizinhança do vértice de uma fenda, não será conceptível que o campo de tensões atinja valores extremamente elevados, compatíveis com a modelação teórica na abordagem linear-elástica; uma análise mais realista do problema da propagação de fendas em materiais dúcteis é o objectivo da Mecânica da Fractura Elasto-Plástica.

Nesta metodologia, o que se faz é determinar uma distancia (o *raio plástico*) de modo que o estado de tensão na placa em carga não ultrapasse a tensão de cedência do material, tal como se mostra na fig. 3.3.

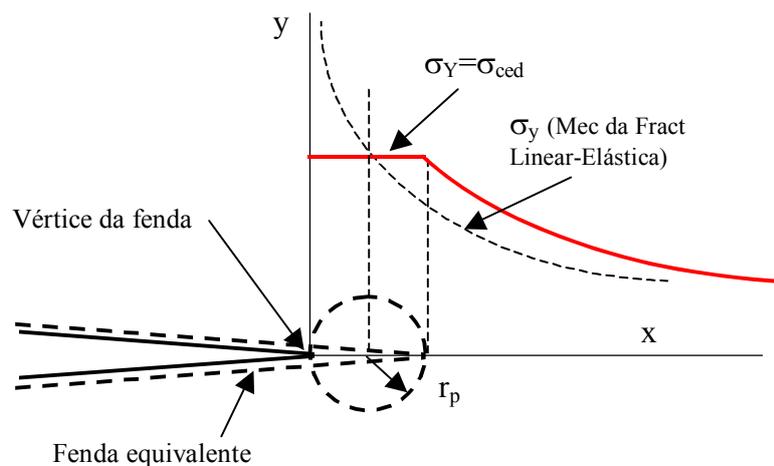


Fig. 2.3 – desenvolvimento da fenda equivalente a partir do raio plástico no vértice da fenda

Deste modo, impondo que o factor de intensidade de tensão para a tensão remota da placa tal como na fig. 3.1 seja igual ao obtido para a tensão remota igual à de cedência do material, mas associada a uma nova fenda de semi-comprimento r :

$$K_I = \sigma_{nom} \sqrt{\pi a} = \sigma_Y \sqrt{2\pi r}$$

onde r é raio plástico, equivalendo a uma fenda de semi-comprimento $2r$ que tem um K_I igual ao associado ao defeito existente, mas agora com a tensão nominal igual à cedência do material. Da expressão anterior obtemos:

$$r = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (3.4)$$

A fenda equivalente que se associa ao factor de intensidade de tensão K_I para um material dúctil com a tensão de cedência σ_Y tem agora um semi-comprimento $a+2r$; deste modo, no exemplo acima analisado por *Mecânica da Fractura Linear-Elástica*, considerando que a liga de alumínio 2028 tem $\sigma_Y=210$ MPa, uma tensão remota de 65.6 MPa, então a fenda admissível para $K_{Ic}=26$ MPa m^{1/2}, tem o comprimento equivalente:

$$a=54.86 \text{ mm onde } r=2.43\text{mm (anteriormente era } a=50\text{mm)}$$

O exemplo anterior constitui o primeiro caso de estudo em Mecânica da Fractura; tal exemplo serviu contudo para aproximar a partir de funções correctoras o factor de intensidade de tensão em placas portadoras de fendas com outra orientação como mostra a fig. 2.3. O valor de K_0 é o dado pela eq. (2.1), sendo possível obter o K_I para a placa portadora de fenda lateral multiplicando K_0 pelo factor de correcção dado na fig. 3.4.

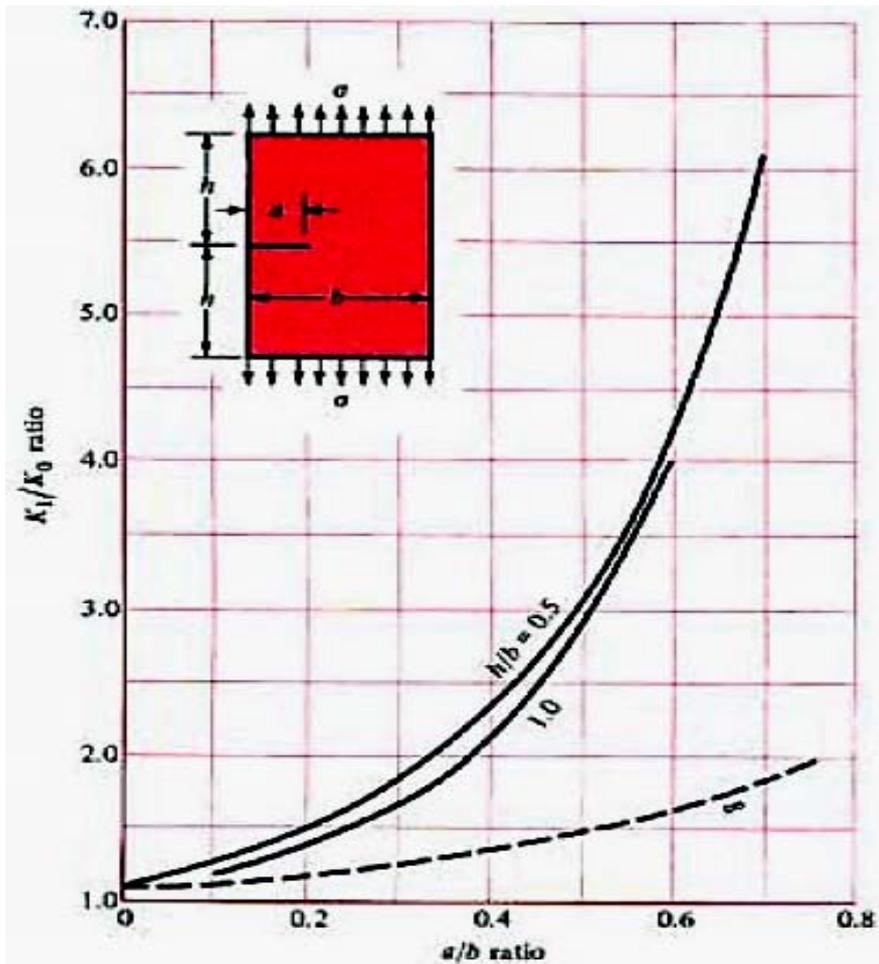


Fig. 3.4 - Factor de correcção para determinar o K_1 numa placa com fenda lateral (aulas de Mecânica da Fractura, prof. Hamrock , *School of Engineering, University of Tennessee at Martin, 2004*)

Neste trabalho podemos reconhecer a ligação das técnicas de Mecânica da Fractura à análise de risco de uma instalação através deste exemplo muito simples:

Considere-se que foi detectada uma fenda de semi-comprimento $a=49\text{mm}$ num componente tipo placa plana semelhante ao exemplo anteriormente estudado, a qual se encontra imersa num meio quimicamente agressivo. Por exame laboratorial foi possível estimar a velocidade de crescimento da fenda se persistisse a actividade do meio químico em 10^{-1} mm/mês . Admitindo que a análise se efectua segundo os conceitos da Mecânica da Fractura Linear-Elástica, de modo que para uma tensão remota $\sigma_{\text{nom}}=65.6\text{ MPa}$, a fenda terá um semi-comprimento $a_{\text{crit}}=50\text{mm}$.

Através aquela taxa de crescimento prevê-se ser necessário efectuar a reparação ou substituição do componente ao fim de 10 meses de serviço. (sendo este o único factor susceptível de alterar o comprimento da fenda).

O facto do parâmetro K_I poder chegar ao valor crítico para o material do componente portador do defeito não significa que, para aquele valor haja falha; tal resultado de K_{IC} está associado a uma probabilidade de ocorrência da falha (a qual será próxima de 1, se $K_I = K_{IC}$), assunto que será discutido mais adiante.

3.3 Fendas Superficiais: Estimativa do Factor de Intensidade de Tensão

3.3.1 Placas planas portadoras de fendas superficiais

Debateu-se aqui a questão de elementos estruturais portadores de defeito tipo fenda, mas passando através da espessura do componente; isto é, trata-se de uma fenda de penetração total. No caso de uma placa ou elemento de casca encerrando um fluido sob pressão, podia o componente apresentar uma integridade razoável, mas a sua operacionalidade poderia constituir sério risco para o sistema, uma vez que o fluido se escaparia de modo mais ou menos rápido. Este tipo de defeitos pode levar à desactivação do sistema pelo facto do componente apresentar uma causa “*leak before break*” (ou seja, fuga antes de falha, em oposição a “*break before leak*”, caso que pode ter consequências talvez mais graves que o primeiro).

O facto é que antes que uma fenda atinja a geometria de defeito totalmente penetrante, uma inspecção por meios adequados deveria detectar um perfil mais ou menos semelhante ao importante caso a seguir apresentado na fig. 3.5, de um estudo de J. P. Gonçalves e P.T. de Castro (1999) na determinação de factores de intensidade de tensão em fendas de penetração parcial em placas ou cascas.

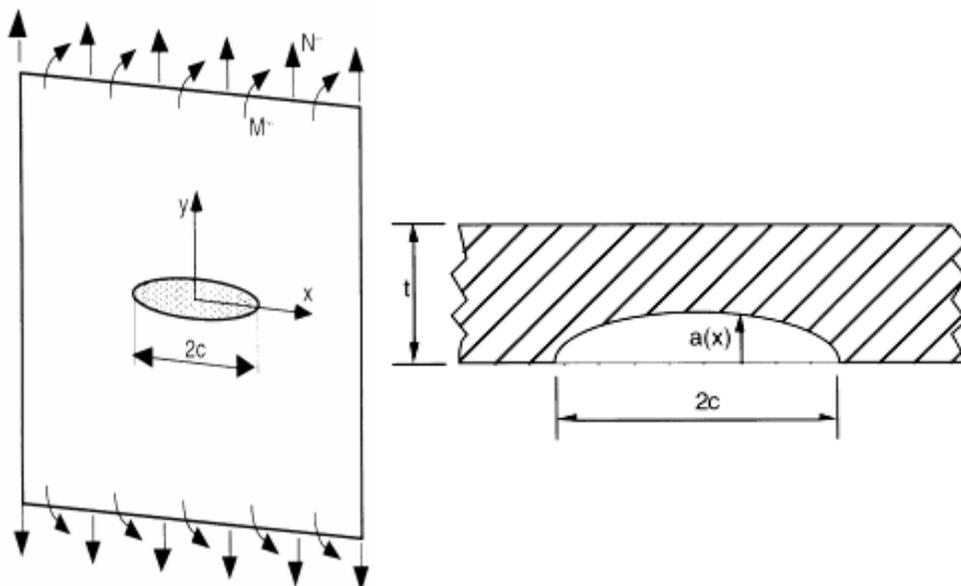


Fig. 3.5 - Fenda superficial (ou semi elíptica) numa placa plana (J.P. Gonçalves *et al* (1999))

Tal como se observa na fig. 3.5, uma placa com uma fenda de perfil semi elíptico, se submetida a um esforço de tracção ou flexão de modo a permitir a abertura da fenda, deverá apresentar um campo de tensões ao longo do ligamento residual que permite obter o factor de intensidade de tensão por expressões associadas à analogia de uma fenda de penetração total mas tenso entre as suas faces adjacentes uma distribuição de elementos elásticos (ou elasto-plásticos, conforme o tipo de análise estrutural), segundo um modelo proposto por J. Rice (1972) com o nome *Line Spring* e usado por J.P. Gonçalves e P.T. de Castro (1999).

Tal como é fisicamente expectável, o factor de intensidade de tensão refere-se agora a uma frente de fenda (ou linha) elíptica que delimita a parte de material sem contacto daquela que ainda se mantém coesa. O factor de intensidade de tensão é avaliado ao longo do comprimento da fenda por coordenadas lineares ou angulares, conforme a opção dos autores de resultados. A fig. 3.6 apresenta o caso referente a vária geometria de fendas semi elípticas em que se usa coordenadas angulares para localizar o ponto onde se efectua o cálculo.

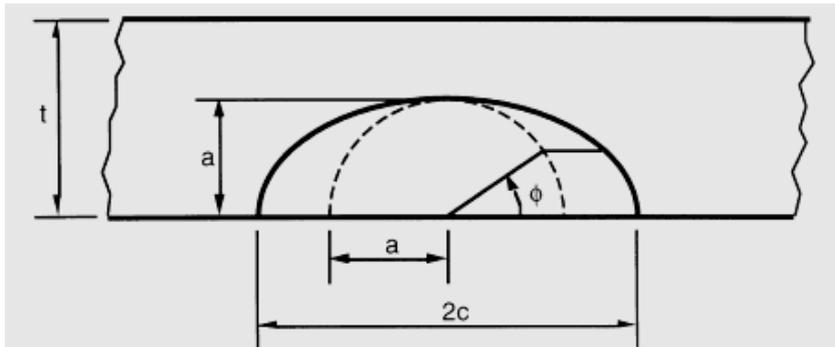


Fig. 3.6 – Coordenadas angulares em pontos no perfil da fenda (J.P. Gonçalves *et al* (1999))

O factor de intensidade de tensão tem o aspecto mostrado na fig. 3.7, onde se verifica que o valor máximo se regista na parte mais profunda do defeito (a =maior profundidade do defeito, c = semi-eixo maior da elipse, t =espessura da placa e ϕ =argumento angular).

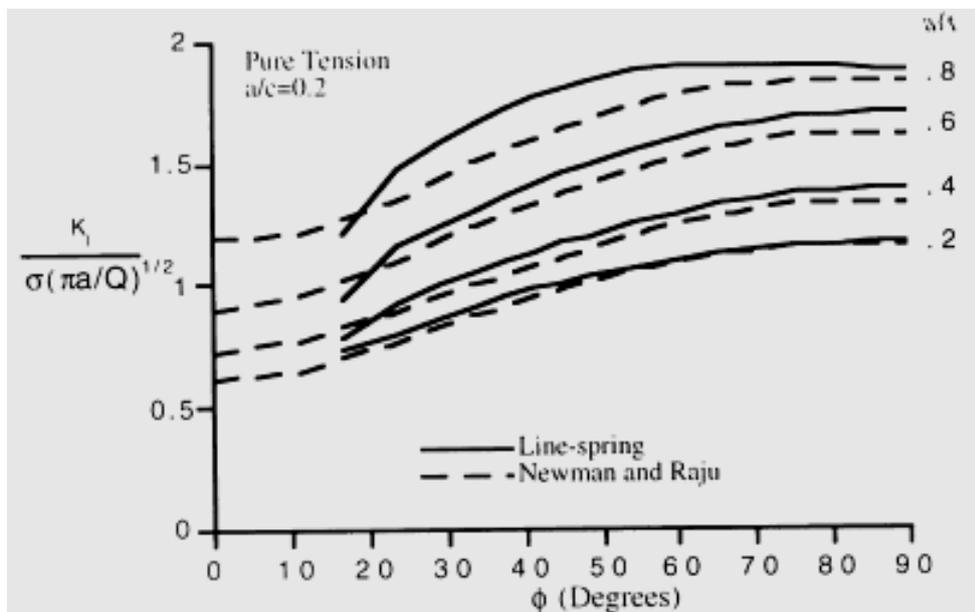


Fig. 3.7 (a) – Factor de intensidade de tensão em fenda semi-elíptica (tracção remota uniforme) $a/c=0.2$

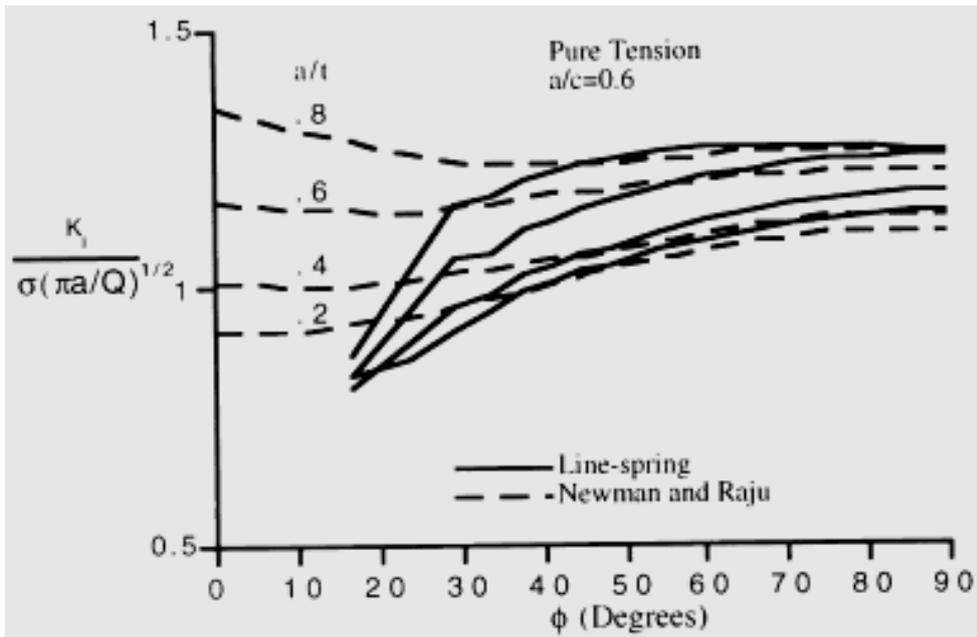


Fig. 3.7 (b) – Factor de intensidade de tensão em fenda semi-elíptica (tracção remota uniforme) a/c=0.6

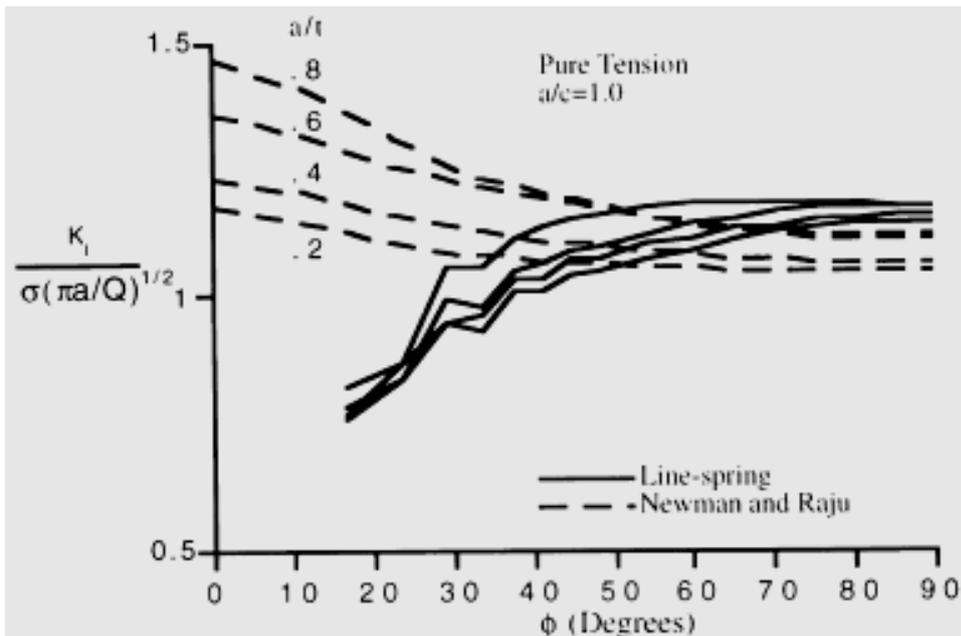


Fig. 3.7 (c) – Factor de intensidade de tensão em fenda semi-elíptica (tracção remota uniforme) a/c=1.0

Nas figuras anteriores o factor de intensidade de tensão é calculado a partir da expressão referente a K_I para uma fenda totalmente penetrante (tal como analisado na fig. 2.1) usando um factor de correcção assim dado:

$$Q = 1 + 1.464(a/c)^{1.65} \quad \text{para } a/c \leq 1$$

Os valores apresentados nos gráficos são normalizados pelo valor:

$$\bar{K} = \frac{K_I}{\sigma(\pi a Q)^{1/2}}$$

O caso apresentado na fig. 3.7 (c) corresponde à iminência de rotura da superfície, criando o cenário de “*leak before break*”, supondo que a estrutura ainda manterá a sua integridade depois da frente de fenda chegar à face oposta de onde se iniciou. Os resultados apresentados pelos autores Gonçalves e de Castro foram comparados com os obtidos por Raju e Newman (1979), que usaram elementos finitos sólidos de elevada ordem na determinação dos factores de intensidade de tensão em vária geometria de defeitos semi elípticos.

Verifica-se uma boa concordância apenas nos pontos mais profundos do defeito, o que de todo não se verifica quando a fenda intersecta a superfície de onde se iniciou. De qualquer modo, o método usado pelos autores Gonçalves e de Castro é seguro como método de avaliação da integridade de um componente portador de um defeito como o discutido, uma vez que na região onde o factor de intensidade de tensão é máximo, este valor está certificado por métodos rigorosos.

Este tipo de defeitos pode ser de todos o mais realista a considerar no presente estudo, pois a sua geometria é estatisticamente a mais encontrada quando existem juntas soldadas, eventualmente submetidas a esforços de fadiga. O crescimento de fendas assim configuradas pode ser acelerado se houver pressão e um ambiente corrosivo actuando nas faces da fenda e esta for sujeita a esforço de abertura e fecho de modo periódico.

Consideremos o exemplo de uma placa de alumínio série 2024, anteriormente referido com $K_{IC}=26 \text{ MPam}^{1/2}$, tendo uma espessura de 10mm. Vamos supor existir uma fenda aproximadamente semi elíptica com as dimensões $a=6\text{mm}$, $c=10\text{mm}$ (comprimento total 20mm ou 0.02m). Obtemos então os parâmetros adimensionais $a/t=0.6$ e $a/c=0.6$. Para $\phi=90^\circ$ o valor adimensional do factor de intensidade de tensão é $\bar{K} = 1.25$ (pela fig.2.7 (b)) e $Q=1.63$. Para o valor limite $K_{IC}=26 \text{ MPam}^{1/2}$ obtemos então a tensão remota correspondente que levaria à propagação instável da fenda segundo critério de Mecânica da Fractura Linear-Elastica:

$$\sigma = \frac{26}{(\pi \times 0.006 \times 1.63)^{1/2}} = \frac{26}{0.1753} = 148 \text{ MPa}$$

Como se verifica, trata-se de um resultado inferior à tensão de cedência do material, facto ao qual se pode associar uma maior probabilidade de ocorrência dado que o utilizador pode não estar avisado da existência do defeito assim caracterizado e confiar no factor de segurança que ainda dispõe (o qual é $1-148/210$, ou seja cerca de 40%), podendo incorrer no risco de fractura do componente.

3.3.2 Cascas cilíndricas portadoras de fendas superficiais

Na sequência do estudo anterior, aborda-se aqui resumidamente o problema da determinação do factor de intensidade de tensão em tubos ou reservatórios de pressão cilíndricos. Trata-se de um tipo de estruturas com uma configuração muito frequente, quer de modo autónomo, quer combinada com outras formas geométricas (fundos semi-elípticos ou esféricos, por exemplo). Daí se esperar que estas cascas sejam portadoras de defeitos, geralmente provenientes de operações de ligação entre módulos estruturais (por soldadura, por exemplo) ou gerados em serviço. Dada a importância deste problema, muitos investigadores tem procurado obter valores credíveis para o factor de intensidade de tensão associado a defeitos existentes nesta geometria de cascas. Para esse fim, é frequente o uso da modelação da estrutura na vizinhança do defeito por elementos finitos volumétricos de elevada ordem de deformação a fim de garantir resultados tão exactos quanto possível.

Não sendo objectivo deste trabalho desenvolver muito este tema, são referidos a seguir alguns resultados obtido pelo investigador Andrea Carpinteri *et al.* (1998) como contribuição para o conhecimento da propagação de fendas em acessórios tubulares cilíndricos. Na fig. 3.8 caracteriza-se a geometria de uma fenda de configuração semi-elíptica e os parâmetros geométricos usados nas expressões necessárias O factor de intensidade de tensão associado.

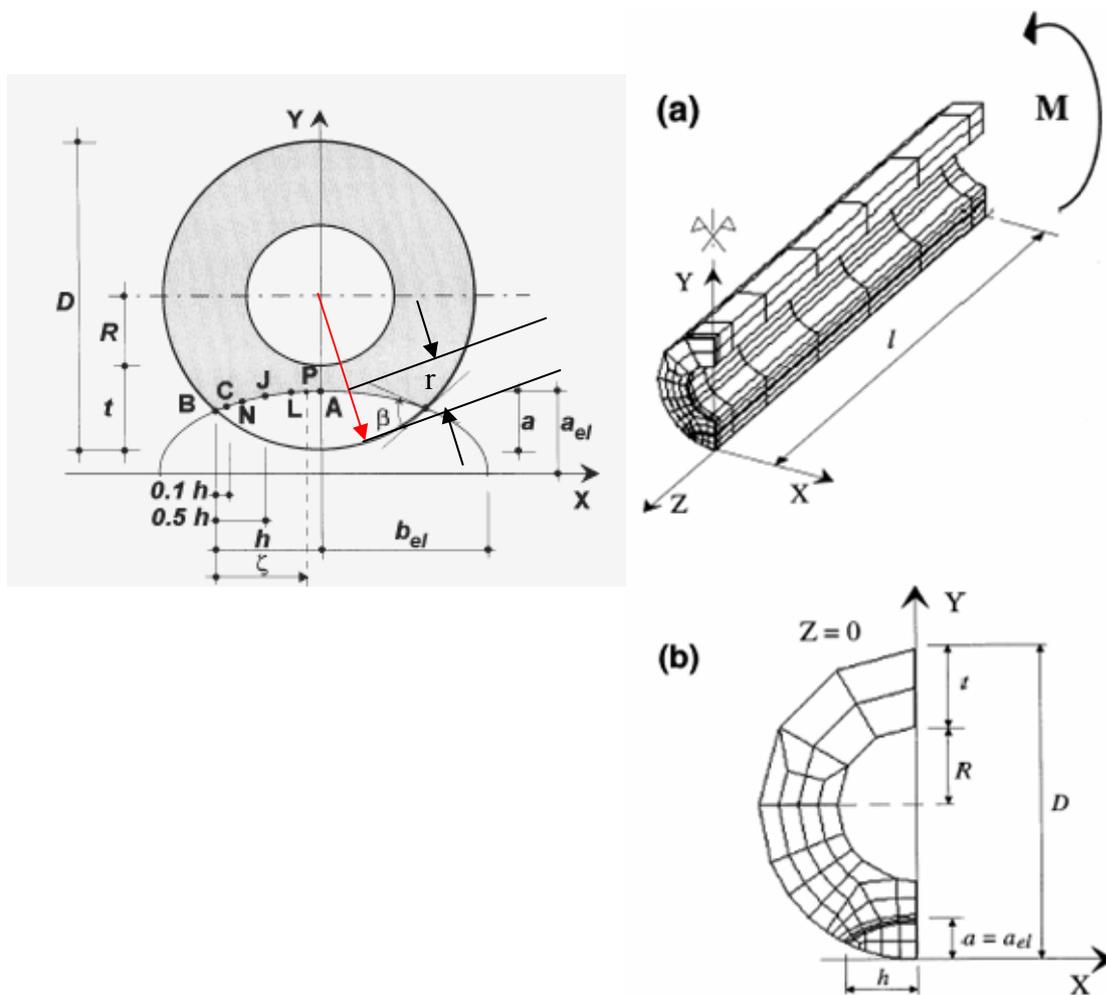


Fig. 3.8 – Modelação de um tubo de paredes moderadamente espessas portador de uma fenda superficial usando elementos finitos (Carpinteri *et al* (1998))

As seguintes expressões são necessárias na determinação do factor de intensidade de tensão em tubos com fendas na direcção circunferencial e submetidos a flexão (fig. 3.8):

a = máxima profundidade da fenda

a_{el} = semi-eixo menor da elipse (supondo a fenda com perfil semi-elíptico; a superfície exterior do tubo não é necessariamente tangente ao eixo maior)

$\xi = a/t$ (no ponto mais profundo da fenda, mede-se a/t)

$\alpha = a_{el}/b_{el}$ (referidos à elipse nos seus eixos principais)

$s = a_{el}/a$ (refere-se ao desvio do eixo maior da elipse em relação à tangente à circunferência exterior do tubo). Normalmente $s=1$

Usa-se ainda a coordenada auxiliar ζ , que referencia o ponto onde se presente determinar o K_I (factor de intensidade de tensão) tendo como origem a intersecção da linha perfil da fenda com a circunferência exterior do tubo (ver fig. 3.8); geralmente emprega-se a coordenada adimensional (normalizada) ζ/h

A fim de simular acções relacionadas com a inspecção e manutenção de sistemas industriais (parte do objectivo deste trabalho), vamos supor um tubo pertencente a um permutador de calor tendo as seguintes dimensões e características mecânicas:

- D (diâmetro exterior) = 100mm
- t (espessura) = 4.5mm
- Fenda semi-elíptica: $a=3\text{mm}$ ($a=a_{el}$); $s=1$; $a/t \approx 0.66$; $R/t \approx 10$ ($R \approx 45\text{mm}$; raio interno)
- $\alpha=0.6$ (relação entre eixos da elipse)
- *Material: aço austenítico Sandvik 3R12 com a seguinte composição química (de <http://www.smt.sandvik.com/tube/>):*

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
max			max.	max.		
0.030	0.5	1.3	0.030	0.015	18.5	10

- Factor de intensidade de tensão para este material $K_{IC} \approx 28 \text{ MPa} \times \text{m}^{1/2}$

A fig. 3.9 apresenta resultados sob forma gráfica para o factor de intensidade de tensão adimensionalizado $K_{I,M}^*$ no caso do tubo portador do defeito referido e solicitado à flexão.

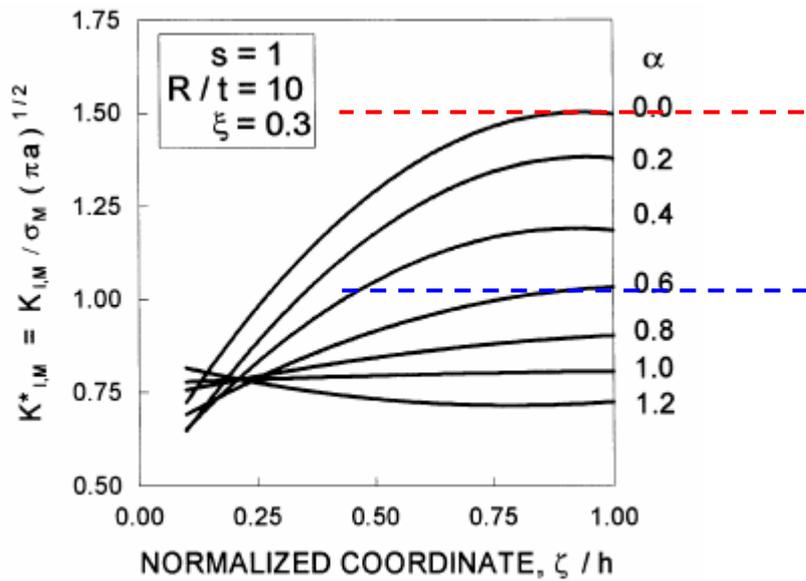


Fig. 3.9 – Factor de intensidade de tensão num tubo com defeito parcial semi-elíptico (carga de flexão)

A expressão para o factor de intensidade de tensão adimensional neste tipo de estruturas é:

$$K_{L,M}^* = \frac{K_{I,M}}{\sigma_M \sqrt{\pi a}}$$

onde:

$$\sigma_M^\infty = \frac{M \times D / 2}{\pi (D^4 - (D - 2t)^4) / 64}$$

(σ_M^∞ é a tensão de flexão remota máxima na zona não atingida pelo defeito e r é a distância radial entre a face exterior do tubo e o perfil do defeito; ver fig. 3.8). No presente caso, vamos admitir $r_{\max} = a = 3\text{mm}$.

Com os dados anteriores obtemos do gráfico na fig. 3.9 o valor adimensional $K_{L,M}^* \approx 1$, deste modo coincidindo o factor de intensidade de tensão para aquele tipo de fenda num tubo cilindrico coincidente com o mesmo parâmetro mas pertencente a uma placa de dimensões virtualmente infinitas com uma fenda de semi-comprimento a ; o factor de intensidade de tensão é

$$K_{L,M}^* = \frac{K_{I,M}}{\sigma_M \sqrt{\pi a}} = 1; \quad (\text{em unidades S.I})$$

$$K_{I,M} = \sigma_M \sqrt{\pi a} = \sigma_M \sqrt{\pi \times 3E - 03} \approx 0.1 \times \sigma_M$$

Quer dizer que, para o material anteriormente suposto, a máxima tensão (nominal) de flexão na vizinhança da fenda seria $\sigma_M^\infty = 28/0.1 = 280$ MPa, valor que se encontra bem próximo da cedência deste tipo de aço; este resultado mostra o bom comportamento que o material seleccionado apresenta, mesmo em presença de um defeito como o assumido.

Um caso em que o defeito se aproximasse mais da forma de um *entalhe rectilíneo*, em que $\alpha=0$, mantendo os restantes parâmetros geométricos, teria o factor de intensidade de tensão adimensional agravado; $K_{L,M}^* \approx 1.5$, conforme se pode ver na fig. 3.9; a tensão remota passaria agora a ser:

$$K_{L,M}^* = \frac{K_{I,M}}{\sigma_M \sqrt{\pi a}} = 1.5;$$

$$K_{I,M} = 1.5 \sigma_M \sqrt{\pi a} = 1.5 \sigma_M \sqrt{\pi \times 3E - 03} \approx 0.15 \times \sigma_M$$

Seria agora $\sigma_M^\infty = 28/0.15 = 186.7$ MPa, reduzindo-se a margem de segurança a 67% da tensão de cedência do material.

Num cenário de decisões baseadas no *RBI*, o estabelecimento de um factor de risco para este tipo de defeitos em serviço poderia ser assim simulado:

- Probabilidade de um tubo do permutador atingir 67% (ou mais) da tensão de cedência (caso presente, onde $\sigma_M^\infty = 186.7 \text{ MPa} \approx 67\% \times \sigma_Y$ ($\sigma_Y = 280 \text{ MPa}$): 0.8
- Factor de risco associado ao derrame de fluido (suposto vapor) a alta pressão: Elevado (risco de explosão em contacto com óleo)

Veremos mais adiante como se estabelece um factor de risco e quais os critérios para formular este importante parâmetro; entretanto, fica por agora assente que o factor de risco permite avaliar as consequências de uma decisão de manter em funcionamento um componente que potencialmente pode colapsar; entretanto, vamos estabelecer a seguinte relação:

$$\text{Risco} = \text{Probabilidade} \times \text{Consequência}$$

Onde a consequência é graduada de acordo com uma escala de impacto no funcionamento da instalação e eventual reflexo sobre vidas humanas. Neste caso, foi estabelecido (hipoteticamente por peritagem) que a *Consequência* seria do tipo D e a probabilidade do nível de tensão de flexão crítica se verificar (ou se exceder) seria de 0.8 (nível 4), tendo-se usado a Matriz de Risco, técnica a ser explicada mais adiante.

O uso deste diagrama mostrava que o *Risco* de se manter este componente em serviço mostraria que se assumiria uma classificação de *INACEITÁVEL*, por colocar em elevado risco a instalação e pessoas na vizinhança.

3.4 Referências para o Capítulo 3

(1979) - Raju IS, Newman Jr. JC. “*Stress-intensity factors for a wide range of semi-elliptical surface cracks in finite-thickness plates*”. Engineering Fracture Mechanics, Elsevier, 1979;11:817–829.

(1979) - Newman JC Jr, Raju IS. Analyses of surface cracks in finite plates under tension or bending loads. NASA TP-1578, National Aeronautics and Space Administration, Washington DC, 1979.

(1972) - Rice JR, Levy N. The part-through surface crack in an elastic plate. Journal of Applied Mechanics 1972, ASME Vol 39, pp 185–194.

(1998)- Andrea Carpinteri , Roberto Brighenti and Andrea Spagnoli, “*Part-through cracks in pipes under cyclic bending*”, Nuclear Engineering and Design, 185 (1998), Elsevier, pp 1–10

4 RBI

Risk Based Inspection

4.1 Introdução

A inspecção com base no risco (RBI), constitui actualmente, uma das ferramentas essenciais para por em prática a aplicação dos princípios de análise de risco, no controlo de programas de inspecção de equipamentos de parques industriais. O RBI foi utilizado na indústria de geração de energia nuclear durante algum tempo e é utilizado em refinarias e indústrias petroquímicas.

As falhas em equipamentos estáticos podem ocasionar enormes perdas de material e danos ao meio ambiente.

A adopção de estratégias de inspecção capazes de identificar, antecipadamente as falhas e consequentemente reduzir o perigo destes equipamentos é uma tendência crescente entre as indústrias dos sectores petrolífero e químico.

O RBI foi desenvolvido pelo *American Petroleum Institute* (API), especificamente com este propósito. As suas principais vantagens são:

- Permitir a identificação e classificação de sistemas e equipamentos críticos para a segurança dos parques industriais;
- Permitir a elaboração de uma estratégia de inspecção, que se concentra nos equipamentos que são críticos do ponto de vista do risco, concentrando os esforços de inspecção no que é importante inspeccionar, optimizando os dispêndios de recursos;
- Permitir um sistema documentado de inspecção de equipamentos;
- Promover o estudo e o reconhecimento profundo dos mecanismos e processos de corrosão que afectam os equipamentos;

- Permitir a quantificação numérica de riscos por uma metodologia aceite por toda a indústria de petróleo e do sector químico e, conseqüentemente, permitir a comparação entre os diversos parques industriais;
- Optimizar os intervalos entre paragens e permitir o planeamento racional e sistemático das mesmas;
- Promover o acompanhamento permanente do ciclo de vida dos equipamentos, permitindo a manutenção programada e aumentando a taxa de disponibilidade e conseqüentemente a produção do parque.

Basicamente a metodologia RBI procura identificar os equipamentos de maior risco existente num parque industrial.

Todo o equipamento tem um risco associado, que é calculado considerando um cenário de falha desse equipamento.

Essa falha pode provocar uma série de conseqüências mais ou menos graves ou uma série de conseqüências sem qualquer impacto.

4.2 O Conceito do Factor Risco

O risco é uma combinação da probabilidade de um determinado evento ocorrer, durante um período de tempo, e a conseqüência desse evento.

Em termos matemáticos, o risco é calculado pela equação:

$$\text{Risco} = \text{Probabilidade} \times \text{Consequência}$$

O risco mais alto é, na maioria das vezes, associado a uma pequena percentagem de equipamentos de um parque industrial. Os procedimentos RBI podem ser baseados numa análise quantitativa e qualitativa. Os métodos qualitativos providenciam um grau de performance do equipamento, baseado na experiência e engenharia. Os métodos quantitativos usam métodos de engenharia para estabelecer prioridades e desenvolver programas para a inspecção do equipamento.

O RBI usa os resultados de uma análise formal de risco (por exemplo, a análise de risco na corrosão), para um correcto planeamento da inspecção e análise dos processos físicos a ela associados.

Os métodos de engenharia que são usados no RBI, incluem exames não-destrutivos, projecto e análise de sistemas e componentes, mecânica da fractura, análise de probabilidades, fiabilidade, etc.

4.3 A Norma RBI

A norma RBI referida como norma API 580, providencia um método para desenvolver e implementar um programa RBI. A metodologia é apresentada passo-a-passo. Os Princípios da estrutura RBI:

- Planeamento da avaliação RBI;
- Recolha de informação e de dados;
- Identificação de mecanismos de degradação e modos de falha;
- Avaliação da probabilidade de falha;
- Avaliação da consequência de falha;
- Determinação do risco, avaliação e gestão;
- Gestão do risco com actividades de inspecção;
- Outras actividades para diminuir o risco (reparação, substituição, manutenção);
- Reavaliação e actualização;
- Papel, responsabilidades, treino e qualificações;
- Documentação e registos.

Benefícios e Limitações do RBI

Os benefícios do RBI são:

- Redução global do risco do equipamento avaliado;
- Compreensão do risco corrente.

Por outro lado o RBI permite também focar a inspecção naquilo que realmente é importante de inspeccionar, reduzindo os dados recolhidos e com maior custo efectivo.

O RBI é baseado numa avaliação bem provada do risco e princípios de gestão. O RBI poderá ser de difícil aplicação nas seguintes situações:

- Falta de informação ou informação insuficiente;
- Equipamento com design inadequado ou estiver defeituoso;
- Equipamento violando as normas recomendadas (Normas máquinas);
- Planos de trabalho mal executados;
- Falta de pessoal qualificado.

Equipamento Alvo

Os equipamentos pressurizados que podem ser alvo de um programa RBI são:

- Reservatórios de pressão;
- Tubagens de processos industriais;
- Tanques de armazenamento;
- Equipamento rotativo;
- Caldeiras e aquecedores;
- Permutadores de calor;
- Outro equipamento sob pressão.

Equipamentos não cobertos pela norma são:

- Sistemas de instrumentação e controlo;
- Sistemas eléctricos;
- Sistemas estruturais;
- Componentes de máquinas (excepto bombas e compressores).

Consequência e Probabilidade no RBI

O objectivo fundamental do RBI consiste por um lado, na determinação dos incidentes que podem ocorrer (consequência) como resultado de uma falha de um equipamento (COF – Consequence of Failure) e, por outro lado, na determinação da probabilidade da sua ocorrência (POF – Probability of Failure).

Uma avaliação RBI pode ser feita qualitativamente, quantitativamente ou usando aspectos de ambos. Ambas desenvolvem um ranking de risco que deve ser usado para avaliar separadamente a probabilidade e a potencial consequência de falha. Estes valores são combinados para estabelecer o risco.

4.4 Planear uma Inspeção RBI

4.4.1 Estabelecer Objectivos e Metas a Atingir com a Inspeção RBI

Definir Critérios de Risco

A avaliação RBI vai determinar o risco dos itens avaliados. Deve ser estabelecido um critério de risco para a avaliação do equipamento, por exemplo, em risco alto, médio risco e baixo risco.

Gestão do Risco

Quando os riscos são identificados, as acções de inspecção e/ou outras medidas para reduzir o risco, podem ter um efeito positivo na redução dos riscos até um nível aceitável (mediante os critérios de aceitação definidos).

A avaliação RBI permite identificar riscos que podem ser gerido por determinadas acções, como por exemplo:

- Modificação do processo para eliminar condições que conduzem ao risco;
- Modificação dos procedimentos de operação para evitar situações de risco;
- Tratamentos químicos no processo para reduzir taxas de deterioração;
- Mudar a metalurgia dos componentes para reduzir o POF (Probabilidade de Falha);
- Remover isolamentos desnecessários para reduzir a corrosão dentro dos isolamentos;
- Actualizar os sistemas de detecção de falhas;
- Entre muitos outros...

Redução de Custos

Quando as actividades de inspecção são optimizadas, baseadas numa correcta compreensão dos riscos, um ou mais benefícios são obtidos, levando a uma redução dos custos.

Novo Projecto com Avaliação de Risco

Uma avaliação RBI feita em novos equipamentos ou em novos projectos, pode render importantes informações dos riscos potenciais. Isto permite reduzir os riscos através do projecto.

4.5 Recolha de Dados e Informação para a Avaliação RBI

4.5.1 Dados Necessários para o RBI

Para cada avaliação RBI é importante, desde a fase inicial, documentar todas as bases e aproximações para o estudo em causa. Para levar a cabo a análise de risco, afigura-se necessário possuir toda a documentação dos equipamentos, tal como desenhos 2D, registos de inspecções, reparações e substituições, composição dos fluidos operantes, mecanismos e taxas de deterioração, e a sua severidade, custos de interrupções, de substituição de equipamentos, de danos ambientais, e o impacto ao nível humano.

4.5.2 Fontes de Dados e Informações Especificas

Registos/Projectos de Construção

- Planta do parque industrial (P&ID'S);
- Desenhos isométricos de tubagens;
- Diagramas de especificações;
- Registos de materiais de construção;
- Códigos e normas usadas;
- Sistemas de protecção;
- Sistemas de monitorização e detecção de fugas;
- Sistemas de isolamento;
- Registos de inventários;
- Sistemas de despressurização de emergência;
- Sistemas de segurança;
- Sistemas de detecção e combate a incêndios;
- Layout.

Registos de Inspeção

- Frequência e programa de inspecções;
- Quantidade e tipos de inspecções;
- Reparações e alterações;
- Resultados de inspecções.

Dados do Processo

- Análises à composição química dos fluidos, incluindo contaminantes;
- Ficha de segurança dos fluidos;
- Temperatura e pressão dos fluidos;
- Sistemas de controlo de dados;
- Procedimentos de operação;
- Procedimentos de arranque e de encerramento;
- Procedimentos de emergência;
- Registos de operação e processo.

Informação e Dados Fora do Local

Estes dados são relevantes se uma possível consequência de falha afectar áreas fora do parque industrial.

Dados sobre Falhas

- Dados genéricos da frequência de falha;
- Dados específicos de falhas industriais;
- Dados específicos de falha dos equipamentos e do parque industrial;
- Registos de fiabilidade e condições de monitorização;

Condições Atmosféricas do Local

- Registo de condições climatéricas;
- Registo de actividade sísmica.

Custos

- Custo de substituição do equipamento;
- Custo de falha do equipamento ao nível ambiental, humano e de produção.

4.6 Referências

Norma API 580.

5 Identificação dos Mecanismos de Deterioração e Modos de Falha no Âmbito do RBI

“ Mecanismos de Deterioração e Modos de Falha “

Os mecanismos, frequências e susceptibilidade de deterioração, são as entradas primárias para determinar o POF. O modo de falha é um elemento chave para determinar o COF.

5.1 Falha e Modos de Falha para o RBI

O termo Falha pode ser definido como o término da capacidade para realizar uma determinada tarefa. O tipo de falha que se enquadra no RBI é aquele que conduz à perda de substâncias armazenadas (*loss of containment*), causada pela deterioração.

5.2 Mecanismos de Deterioração

Existem 4 grandes grupos de mecanismos de deterioração observados nas indústrias de petróleo e químicas:

- Perda de espessura por erosão, corrosão, cavitação ou ataque químico (interna e externa);
- Fractura devido à corrosão sob tensão (Stress Corrosion Cracking);
- Deterioração metalúrgica e ambiental;
- Deterioração mecânica;

5.3 Avaliação da Probabilidade de Falha

5.3.1 Introdução

A probabilidade de ocorrência específica é o produto da probabilidade de falha (POF) e da probabilidade de ocorrer o cenário em consideração. A análise da probabilidade de falha deve dirigir-se a todos os mecanismos de deterioração a que o equipamento é susceptível. Adicionalmente, deve ser dirigida à situação onde o equipamento é susceptível de mecanismos de múltipla deterioração. A análise deve ser credível e bem documentada.

Podem ocorrer outros mecanismos de deterioração não descritos (actividade sísmica, sobrepressão por falha dos dispositivos de controlo, erros de projecto, sabotagem, erro humano, etc), que devem ser englobados na análise do POF. A probabilidade de falha é de extrema importância no bom funcionamento de uma companhia industrial, permitindo classificar e identificar equipamentos críticos. Este processo permite de uma forma muito clara estimar o estado de conservação dos equipamentos e prever possíveis falhas, maximizando a fiabilidade e a segurança do parque industrial.

Outra aplicação importante, é a solidificação significativa da exactidão do denominado plano de prevenção da manutenção (PPM's), permitindo substituir equipamentos, antecedendo a sua avaria.

5.3.2 Determinação da Probabilidade de Falha

A probabilidade de falha é determinada por duas considerações principais:

- Mecanismos e frequências de deterioração do material de construção do equipamento, como resultado do seu ambiente envolvente.
- Eficácia do programa de inspecção para identificar e monitorizar os mecanismos de deterioração, para que o equipamento possa ser reparado ou substituído antes da falha.

O cálculo da probabilidade de falha envolve os seguintes passos:

- Identificar mecanismos de deterioração activa e credível que são esperados ocorrer durante o período de tempo em consideração;
- Determinar a susceptibilidade e a taxa de deterioração;
- Determinar a eficácia de inspecções passadas e programas de manutenção. É necessário avaliar a probabilidade de falha considerando várias estratégias de inspecções e programas de manutenção futuras alternativas.
- Determinar a probabilidade de falha, nas condições correntes e degradação contínua à taxa esperada. O modo de falha (fuga pequena, fuga grande, rotura do equipamento) deve ser também determinada, baseando-se no mecanismo de degradação. Pode ser desejável, em certos casos, determinar a probabilidade de mais que um modo de falha e combinar os riscos.

5.3.2 Determinar a Taxa e Susceptibilidade de Deterioração

Combinações de condições dos processos e materiais de construção, para cada item do equipamento, devem ser avaliadas para identificar mecanismos de degradação activos e credíveis. Um método é agrupar componentes que tenham o mesmo material de construção, e estejam expostos ao mesmo ambiente externo e interno. Os resultados da inspecção de cada item do grupo podem ser relacionados com outros equipamentos do grupo.

A taxa de deterioração pode ser expressa em termos de taxa de corrosão para perda de espessura, ou em termos de susceptibilidade à deterioração para mecanismos onde a taxa de deterioração é desconhecida ou impossível de medir (como a corrosão sob tensão). A susceptibilidade é designada como alta, média ou baixa, baseada nas condições ambientais e combinações de materiais de construção.

As fontes de informação são:

- Dados publicados;
- Testes de laboratório;
- Testes no local e monitorização em serviço;
- Experiência com equipamento similar;
- Dados de inspecções anteriores.

A melhor informação provirá de experiências de operação, onde existem condições que levam a taxas de degradação reais e que podem ser observadas. Outras fontes de informação são as bases de dados de experiências em parques industriais.

5.3.3 Determinar Modos de Falha

É importante ligar o mecanismo de deterioração com o modo de falha mais provável.

Por exemplo:

- As picadas geralmente levam a fugas de pequeno diâmetro;
- A corrosão sob tensão pode desenvolver-se em pequenas fendas pelas paredes, até à rotura catastrófica;
- A deterioração metalúrgica e deterioração mecânica podem levar a pequenas cavidades ou roturas;
- A perda de espessura devido à corrosão se for muito significativa pode causar grandes fugas ou a rotura.
- Etc...

O modo de falha afecta primariamente a magnitude das consequências.

5.3.4 Quantificar Eficácia de Programas de Inspeção Anteriores

Os programas de inspeção (Combinação de exames não destrutivos – NDE's) variam na sua eficácia para localizar e medir a deterioração. Depois de identificar os mecanismos de deterioração, o programa de inspeção deve ser avaliado para determinar a eficácia em determinar os mecanismos.

Se tiverem sido feitas múltiplas inspeções, é importante reconhecer que a inspeção mais recente reflecte melhor as condições correntes de operação. Se as condições de operação tiverem sido alteradas, as taxas de deterioração baseadas nos dados da inspeção anterior poderão não ser válidas.

A determinação da eficácia da inspeção deve considerar o seguinte:

- O tipo de equipamento;
- Mecanismos de deterioração activos e credíveis;
- Taxa ou susceptibilidade de deterioração;
- Cobertura e frequência dos métodos de NDE's;
- Acessibilidade às áreas de deterioração esperadas.

A eficácia de futuras inspeções pode ser otimizada por:

- Utilização de métodos de NDE's melhor aplicáveis aos mecanismos de deterioração activos e credíveis;
- Ajuste da cobertura de inspeção;
- Ajuste da frequência de inspeção.

5.3.5 Calcular a Probabilidade de Falha por Tipo de Deterioração

Combinando o mecanismo de deterioração esperada, a sua taxa ou susceptibilidade, dados de inspeção e eficácia de inspeção, uma probabilidade de falha pode ser determinada para cada tipo de deterioração e modo de falha. A probabilidade de falha pode ser determinada para períodos de tempo futuros ou condições correntes.

5.4 Avaliação das Consequências de Falha

5.4.1 Introdução à Análise da Consequência

Esta classificação permite de uma forma muito realista, classificar o impacto ao nível humano, ambiental e de produção de uma suposta falha. Assim sendo, poderemos ter uma análise de forma pontual e individual em cada equipamento, inspeccionado pelo método RBI. Esta classificação RBI permite, tratar as tubagens do site industrial (tubagens como exemplo), de uma forma individual, consoante o seu impacto Humano, Ambiental e de Produção.

5.4.2 Perda de Substâncias Armazenadas

A análise de consequências num programa RBI baseia-se numa falha potencial significativa, no sentido de discriminar entre outros itens de equipamento que poderão estar na sua origem e nas consequências, nomeadamente a perda de substâncias armazenadas. Os efeitos mais visíveis são:

- Impacto na saúde e segurança;
- Impacto ambiental;
- Perdas de produção;
- Custos de reconstrução e manutenção.

5.4.3 Outras Falhas Funcionais

Embora o RBI esteja apenas vocacionado para perdas de substancia armazenadas, na avaliação RBI podem ser incluídas outras falhas funcionais, como por exemplo:

- Falhas mecânicas ou funcionais de componentes internos;
- Falha em tubos de permutadores de calor;
- Falhas em dispositivos de regulação de pressão;
- Falha de equipamentos rotativos.

5.5 Determinação do Risco, Avaliação e Gestão

5.5.1 Determinação do Risco

Determinação da Probabilidade de um Risco Específico

A probabilidade de cada cenário credível (possível de ocorrer) pode ser determinada após a avaliação das probabilidades de falha e modos de falha para os mecanismos de degradação mais importantes.

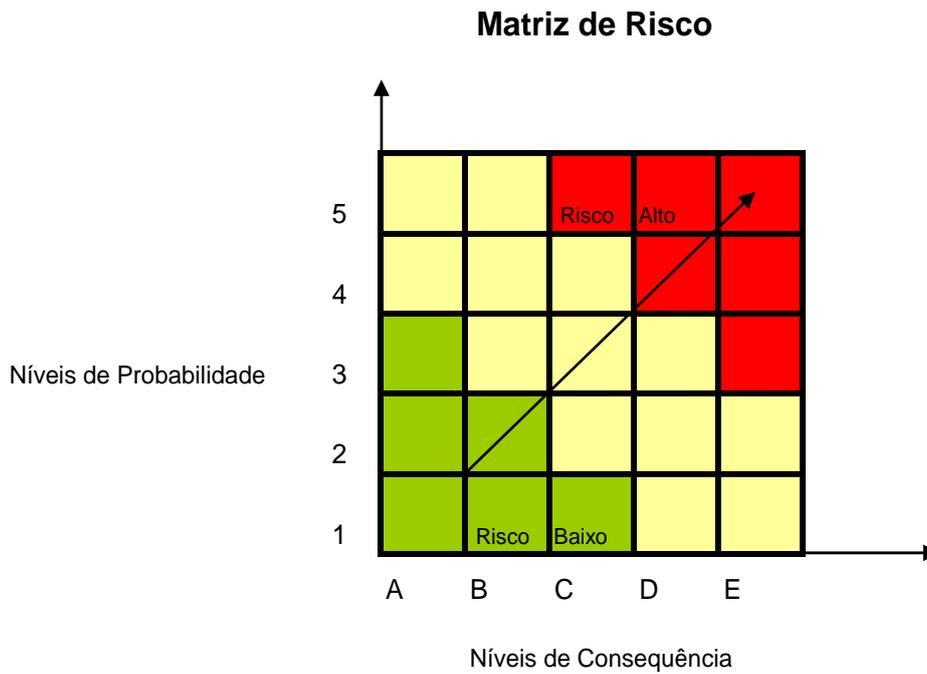
Por outras palavras, a perda de substâncias armazenadas pode ser apenas o primeiro evento numa série destes, que levam a uma consequência específica. Por exemplo, depois de haver uma fuga, o primeiro evento pode ser a iniciação ou falha dos mecanismos de protecção; o segundo evento pode ser a dispersão, diluição ou acumulação de fluido e o terceiro evento pode ser a iniciação ou falha de acções preventivas (neutralização do fluido, etc...) e em diante, até ocorrer uma consequência específica (fogo, explosão libertação de substâncias toxicas, etc...).

Cálculo do Risco

O risco de uma consequência específica é dado por:

$$\text{Risco de uma Consequência Específica} = \text{Probabilidade de uma Consequência Específica} \times \text{Consequência Especifica}$$

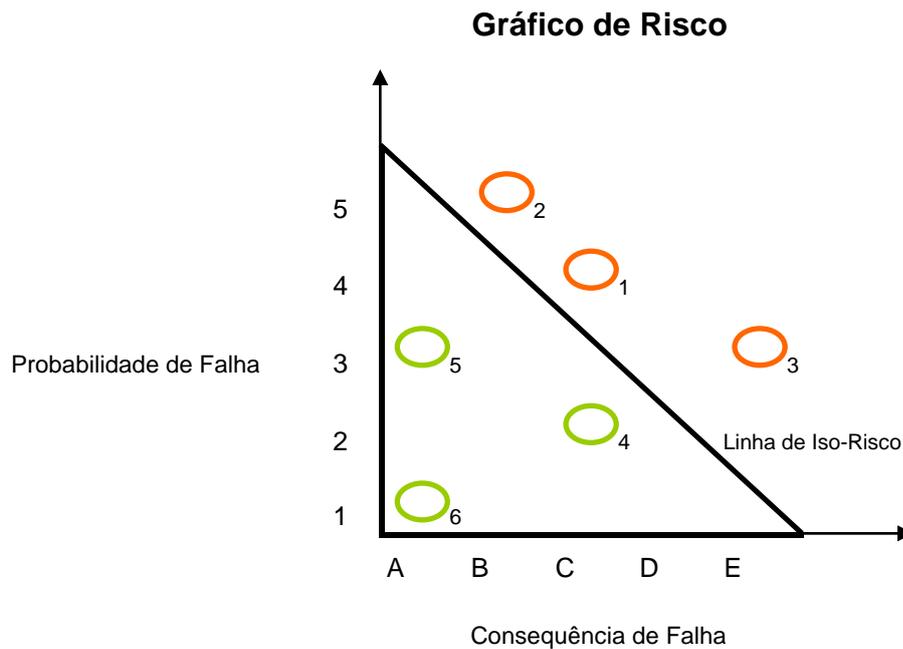
Se não se poder exprimir a probabilidade e a consequência por valores numéricos, o risco pode ser obtido colocando um ponto numa matriz de risco, como mostrado abaixo:



Todos os pares de Probabilidade/Consequência podem ser colocados numa matriz de risco.

Outra possibilidade é apresentar a análise de risco em gráficos de risco. Numa matriz de risco a distribuição de risco ao longo de um parque ou unidade é efectuada de forma qualitativo. Para o efeito, definiram-se 3 níveis de risco, nomeadamente alto (cor vermelha), médio (cor amarela) e baixo (cor verde). Assim o risco mais elevado, corresponde ao canto superior direito.

O gráfico de risco é semelhante à matriz de risco, uma vez que o risco mais elevado se situa no canto superior direito. Um esquema destes gráficos é mostrado a seguir:



Neste gráfico são mostrados 6 itens de equipamentos, assim como uma linha de iso-risco (linha onde o risco é constante). Os itens que se situarem acima da linha de iso-risco são considerados críticos e devem ser alvo de estratégias para redução do risco.

Em geral todos os itens situados no canto superior direito devem ser prioridade, uma vez que têm o maior risco. Por outro lado, os itens situados no canto oposto tendem a ter pouca prioridade, uma vez que têm um baixo risco.

5.6 Gestão do Risco

5.6.1 Acessibilidade do Risco

Entende-se por acessibilidade do risco, um critério associado a valores ou intervalos de criticidade definidos pela estratégia, necessidade e perigosidade de cada companhia, na manutenção das suas instalações. Um determinado fenómeno poderá ser classificado de crítico e inaceitável numa determinada planta, contudo poderá ser tolerável mediante o padrão de exigência de outra empresa distinta.

Muitas empresas têm critérios de risco, definindo níveis de segurança aceitáveis e prudentes. Estes critérios de risco devem ser usados na avaliação RBI.

Dado que cada empresa tem o seu próprio critério, as decisões em relação ao risco podem variar.

5.6.2 Avaliação do Risco em Planos de Inspeção e Manutenção

O uso e avaliação do risco em planos de manutenção permite determinar o que inspeccionar, como inspeccionar e a extensão da inspeção. A segunda parte deste processo é determinar quando inspeccionar o equipamento.

Após ter sido feita a análise de risco e obtidos os valores de risco, convenientemente traduzidos num gráfico ou matriz, deve-se identificar os equipamentos com risco maior, intermédio e baixo (estabelecer um ranking). O equipamento pode também ser ordenado pelo nível de risco. Devem ser criados limites que dividam o risco em aceitável e inaceitável.

5.6.3 Gestão do Risco

A gestão de risco tem início após o estabelecimento do ranking de equipamentos e da definição dos limites de risco. Os riscos julgados aceitáveis não são objecto de acções futuras, geralmente designadas por mitigação.

Para os riscos considerados inaceitáveis, é necessária a sua mitigação, caracterizada pelas seguintes medidas:

- Avaliação da necessidade do equipamento para a operação da unidade;
- Redução dos riscos a um nível aceitável através da implementação de um programa de inspeção, com eventual reparação do equipamento;
- Acções que diminuam as consequências de uma eventual falha;
- Acções que reduzam a probabilidade de falha, como uma alteração metalúrgica ou redesenho do equipamento.

5.6.4 Gestão do Risco com Actividades de Inspeção

Reduzir o Risco Através da Redução da Incerteza por Inspeção

A inspeção serve para identificar, monitorizar e medir os mecanismos de deterioração. Uma aplicação correcta das inspeções melhorará a habilidade do utilizador para prever os mecanismos de deterioração e taxas de deterioração. Quanto melhor for a capacidade de prever, menor será a incerteza de quando ocorrerá uma falha. Assim, as actividades de redução do risco podem ser feitas antes da altura em que a falha seja previsível.

Dependendo de factores como o tempo restante de vida do equipamento e o tipo de mecanismo de deterioração, a gestão do risco através da inspeção pode ter pouco ou nenhum efeito. Exemplos destes casos são os seguintes:

- Taxas de corrosão bem estabelecidas e equipamentos próximos do fim de vida;
- Falhas instantâneas relacionadas com as condições de operação, como a fractura frágil;
- Tecnologias de inspeção insuficientes para detectar ou qualificar adequadamente a deterioração;
- Eventos que conduzam a falhas (circunstâncias não previsíveis).

Estabelecer uma Estratégia De Inspeção Baseada na Avaliação do Risco

A estratégia de inspeção deve ser projectada em conjugação com outros planos de redução de risco, para que todos os equipamentos tenham um risco resultante aceitável. Os operadores devem considerar *ranks* de risco, potenciadores de risco, historial do artigo, número e resultados das inspeções, tipo e eficácia das inspeções, equipamento em serviço similar.

A inspecção só será eficaz se a técnica usada for capaz de detectar o mecanismo de deterioração e a sua severidade.

A estratégia de inspecção deve ser um processo iterativo, para assegurar que as actividades são continuamente focadas em itens com risco mais alto e que os riscos são efectivamente reduzidos com a actividade implementada.

Avaliação do Risco em Planos de Inspeção e Manutenção

O uso e avaliação do risco em planos de manutenção permite determinar o que inspeccionar, como inspeccionar e a extensão da inspecção.

A segunda parte deste processo é determinar quando inspeccionar o equipamento. Os riscos julgados aceitáveis não são objecto de acções futuras, geralmente designadas por mitigação.

Se os riscos após inspecção forem considerados inaceitáveis, é necessária a sua mitigação, caracterizada pelas seguintes medidas:

5.6.5 Outras Actividades de Redução do Risco

Actividades de Redução do Risco

- **Reparação/Substituição:** Quando o equipamento chega a um ponto onde o risco de falha não possa ser gerido até um nível aceitável, a reparação /substituição é a única maneira de reduzir o risco;
- **Avaliar Falhas para Determinar a Aptidão para o Serviço (Fitness for Service):** Um procedimento para avaliar a aptidão para o serviço (Fitness for Service – FFS) do equipamento pode ser feito, com a norma API RP 579. Este procedimento determina se o equipamento continua apto para executar as suas funções, em que condições e durante quanto tempo, com as falhas determinadas na inspecção. O FFS pode também ser usado para determinar qual a extensão das falhas. Determinadas em inspecções futuras, que obrigam à reparação ou substituição do equipamento;

- **Modificação do Equipamento e Redesign:** A modificação do equipamento ou redesign pode permitir a redução da probabilidade de falha. Os exemplos incluem:
 - Alterações metalúrgicas;
 - Adição de forros protectores e camadas;
 - Remoção de dedlegs;
 - Mudanças físicas que permitam controlar /minimizar a corrosão;
 - Melhorias no isolamento;
 - Mudanças no design em pontos de injeção.
 - Etc...

- **Isolamento de Emergência:** O isolamento de emergência de uma área pode reduzir as consequências de fogo, explosão ou toxicidade, no caso de uma descarga. A localização apropriada de válvulas de isolamento, a operação remota, a capacidade para actuar no caso de descargas e fugas é crucial para a redução das consequências destes incidentes;
- **Despressurização de Emergência:** A despressurização de emergência reduz a quantidade e a taxa de descarga;
- **Modificação dos Processos:** Consegue-se diminuir a consequência e a probabilidade de falha, alterando-se o processo para condições menos perigosas;
- **Reduzir/eliminar o armazenamento de substâncias perigosas ou de produtos intermédios;**
- **Construção resistente a explosões.**

6 - Frequência das Inspeções de Tubagens

6.1 Introdução

A frequência de inspeção de tubagens usando um programa RBI, é estabelecida tendo como base os seguintes factores:

- Acessibilidade das tubagens para inspeção;
- Condições ambientais em que se encontra inserida a tubagem;
- Tipo de tubagem;
- Estado de conservação da tubagem;
- Tipo de projecto da tubagem e a sua idade;
- Preocupação da segurança pública;
- Preocupação com o meio ambiente;
- Necessidade de documentar as condições da tubagem;
- Importância da tubagem no bom funcionamento do parque industrial.

6.2 Prática de Inspeção em Tubagens

Independentemente das práticas de inspeção e dos seus resultados, deve ser sempre feita uma inspeção visual uma vez por mês. Se as tubagens forem muito extensas ou de difícil acesso, a inspeção visual deverá ser feita uma vez por ano.

No caso destas tubagens inspeccionadas, uma vez que nenhuma se encontra em situação crítica, o RBI recomenda uma inspeção visual rápida uma vez por mês (acima referido), e manter-se a inspeção externa visual e não destrutiva no tempo definido, podendo contudo na tubagem P 146, alargar este período por mais um ano.

6.3 Procedimento Geral de Inspeção

- Inicialmente deve-se começar por um exame visual, de forma a avaliar as condições interiores e exteriores das tubagens, soldaduras, ligações aparafusadas, ligações rebitadas, juntas de expansão, válvulas, suportes das tubagens, isolamentos e revestimentos das tubagens;
- Exame das tubagens usando métodos não destrutivos (geralmente ultra-sons);
- Avaliação detalhada usando métodos não destrutivos, em zonas consideradas críticas, identificadas pelo primeiro procedimento;
- Simulação de uma situação crítica para verificação da capacidade de resposta do sistema de controlo de emergência do parque industrial, de forma a garantir a segurança ambiental e humana, bem como a conservação de todo o equipamento;
- Reajustar os reguladores das tubagens de modo a evitar sobrepressões;
- Verificação do design das tubagens, comparativamente com o design de projecto;

6.4 Trabalho Pré-Inspeção de Tubagens

Este ponto é fulcral para uma boa avaliação das tubagens durante a inspeção.

6.4.1 Plano de Inspeção

1. Definir Objectivos da inspeção;
2. Lista de pessoal participante;
3. Lista dos itens a inspeccionar;
4. Lista dos equipamentos e tubagens do parque a encerrar durante a inspeção, se assim for necessário.

6.4.2 Plano de Segurança:

Deve ser verificado e analisado (ou efectuado) o plano de segurança, com base nas condições de trabalho e perigo existente.

Devendo-se certificar que todos os trabalhadores tenham recebido, lido e percebido a análise, para que a inspecção decorra em segurança e com o menor perigo possível.

(Ex: exames de radiologia).

1. Lista de contactos em caso de acidente;
2. Lista de contactos em caso de emergência;
3. Lista das moradas dos hospitais locais;
4. Apresentar as normas de segurança das áreas a inspeccionar;
5. Apresentar uma descrição das instalações onde existem as tubagens a serem inspeccionadas.

7 Análise do Modelo Fluido-Tubagem Assumido

7.1 Classificação de Tubagens Mediante o Perigo (API 570)

A tubagem analisada é classificada de nível 1 (perigo elevado), uma vez que é uma tubagem transportadora de fosgénio, sendo este bastante tóxico por inalação, podendo levar a edema pulmonar. Este fluido em contacto com óleos ou gorduras, pode provocar explosão e em caso de incêndio degradação térmica (decompõe-se em monóxido de carbono, cloro, dióxido de carbono e tetracloreto de carbono).

7.2 Classificação da Tubagem PSSR

Os sistemas de tubagens são difíceis de classificar de uma forma simples, porque incluem diferentes categorias de pressão, temperatura, fluido a transportar e materiais de construção. Não existe uma classificação única reconhecida por todos os sectores industriais. Nesta inspecção classifica-se a tubagem pela definição PSSR, uma vez que este tipo de classificação aplica-se a tubagens transportadoras de fluido de risco relevante. A tubagem em estudo transporta fosgénio. Este fluido como já foi referido anteriormente, em certas condições pode provocar explosão e degradação térmica.

A PSSR subdivide as tubagens em menor, intermédia e maior categoria. Esta divisão é baseada no fluido a transportar e na pressão do volume do mesmo fluido.

7.3 Classificação do Fluido (código 704 - N.F.P.A)

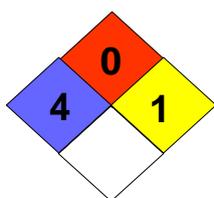
Os reservatórios ou equipamentos contendo volumes significativos de produtos químicos, são classificados mediante o código 704 N.F.P.A (National Fluid Protection Agency), para que desta forma, seja mais fácil identificar-se o perigo que cada produto representa.

A classificação é feita por três categorias:

- **Risco para a saúde;**
- **Inflamabilidade;**
- **Reactividade;**

Cada categoria tem 5 níveis distintos.

Fosgénio:



Risco para a Saúde - Zona Azul
Inflamabilidade - Zona Vermelha
Reactividade – Zona Amarela

O espaço a branco é usado quando o produto tem riscos especiais (produtos oxidantes, radioactivos, corrosivos ou não compatíveis com a H₂O). No produto em análise, Fosgénio estes riscos não se verificam.

Risco para a Saúde – Nível 4: Uma exposição ainda que pequena pode causar morte ou danos físicos graves, mesmo após tratamento médico.

Inflamabilidade – Nível 0: Produto incombustível.

Reactividade – Nível 1: Produto normalmente estável, mas se sujeito a valores de pressão e temperatura elevados instabiliza. Reage com H₂O de forma não violenta, mas com alguma libertação de energia.

7.4 Tubagens Mais Usadas no Transporte de Fosgénio

Devem ser investigadas e analisadas detalhadamente as características de cada tubagem usada, de forma a garantir boa fiabilidade, maximizando a exactidão da inspecção, bem como a minimização da probabilidade de falha.

Seguidamente, vamos analisar alguns tipos de tubagens industriais, mais usadas no transporte do gás fosgénio:

7.4.1 Aço Carbono A106

7.4.1.1 Exemplo de características de uma Tubagem Industrial

Identificação	P – 111 A
Localização	Industria em Geral
Tipo	Tubagem transportadora de Fluido
Idade	29 Julho de 1988
Código de Construção	ANSI 16.3
Especificação dos Materiais	ASTM A 106 Grande B (Plus ASTM A 520)
Revestimento	Tinta
Fluido Transportado	Fluido Líquido
Dimensões Ø	6''
Diâmetro Exterior Real	168,3 mm
Schedule Number	40
Espessura Nominal	7,112 mm
Espessura Mínima Admissível	6,22 mm
Massa por Unidade de Comprimento	28,269 Kg/m
Teste Hidrostático Original	29,4 Kg/cm ²
Temperatura do Fluido	35,0 °C
Pressão do Fluido	2,8×10 ⁵ Pa
Caudal	57336,757 Kg/hr
Viscosidade	0,266 mPas
Densidade	1237,3 Kg/m ³
Tensão Superficial	20,4814 Mn/m
Factor de Intensidade de Tensão	50 MPa×m ^{1/2}

7.4.1.2 Análise Metalúrgica dos Materiais de Construção

Composição dos Elementos de Liga (ASTM A 106 Grade B)

Elementos de Liga	Composição %
C	0,30
Mn	0,29-1,06
P	0,025
S	0,025
Si	0,10
Cr	0,40
Cu	0,40
Mo	0,15
Ni	0,40
V	0,08

Cálculo do Carbono Equivalente

$$CE = \%C + \%Mn/6 + (\%Cr + \%Mo + \%V) /5 + (\%Ni + \%Cu) /15 = 0,528$$

Após análise dos dados anteriormente referidos, conclui-se que o aço ASTM A 106 Grade B é não ligado. Os elementos de liga associados, estão presentes em muito baixa percentagem, inferiores a 5%, sendo praticamente desprezáveis. A soldabilidade deste aço é de fácil execução, não necessitando de pré-aquecimento para espessuras até 12mm. O baixo valor de carbono também reforça o referido anteriormente.

De notar que, o carbono equivalente neste aço, deve ter um limite máximo de 0,5.

Cálculo da Dureza Máxima sob Cordão (Dureza Vickers)

$$HV_{m\acute{a}x} = 90 + 109 \times \%C + 47 \times \%Si + 75 \times \%Mn + 30 \times \%Ni + 31 \times \%Cr = 231,3 \text{ HV}$$

Este valor de dureza é o valor máximo admissível sem comprometer a construção soldada a fenómenos de falha. Se a dureza for superior, a tenacidade e resistência ao impacto vai reduzir-se aumentando a fragilidade. A junta soldada se submetida a esforços durante o seu serviço, fica susceptível a falha.

A dureza máxima de uma junta soldada, geralmente mede-se próximo do cordão e não em cima do mesmo.

Para a definição dos critérios de aceitação dos valores da dureza existe uma norma específica. O cálculo efectuado é uma recomendação para o bom funcionamento da união soldada em serviço, assunto que contudo sai fora do âmbito deste trabalho.

Cálculo da Espessura Mínima Admissível

Considerando os valores do ponto 7.4.1.1 conclui-se:

Linha P - 111 A

$$e_{Min} = 0,875 \times e_{Nominal} = 7,11 \times 0,875 = 6,22 \text{ mm}$$

Tensão Interna da Tubagem

Linha P - 111 A

$$\sigma_{Interna} = (P \times \varnothing_{Interno}) \div (2 \times e_{MedidoMinimo}) = (0,28 \times 154,076) \div (2 \times 6,4) = 3,37041 \text{ MPa}$$

Nesta cálculo das tensões internas associadas á linha, assumiu-se que o valor mínimo de espessura, mantém-se igual em todo o diâmetro da tubagem e em todo o seu comprimento, para desta forma maximizar a garantia dos cálculos efectuados, aumentando a sua fiabilidade.

7.4.1.3 Resistência Mecânica

Linhas P – 111 A

Após análise deste material aplicado nos equipamentos, podemos referir que possui uma tensão de rotura (Tensile Strength) de 415 MPa e uma tensão de cedência (Yield Strength) de 240 MPa. Através destes valores característicos e mediante as condições actuais de serviço, podemos prever o comportamento do equipamento durante o seu funcionamento.

7.4.1.4 Ovalizações

Após a realização dos cálculos da *Tensão Interna da Tubagem*, pode-se efectuar uma comparação em termos numéricos, com as tensões de cedência dos respectivos materiais base, referidos no ponto relativo á *Resistência Mecânica* e estimar a possibilidade de ocorrência de ovalizações. Após esta análise, verifica-se que ovalizações não puderam ocorrer, tendo como origem, tensões internas excessivas, durante o funcionamento normal das mesmas.

Concluimos neste exemplo que, as tensões internas associadas, não atingem o valor numérico da tensão de cedência do respectivo material base, A 106.

Se assim não fosse, teria que se aumentar a espessura de parede da tubagem (aplicar tubagem nova), por forma a diminuir as tensões internas associadas, evitando ovalizações, deformações e possíveis tensões excessivas do material base.

7.4.1.5 Taxa de Corrosão

Linha P - 111 A

$$\begin{aligned} \text{Taxa de Corrosão} &= (e_{\text{Nominal}} - e_{\text{MinimaMedida}}) \div (\text{Idade}) = \\ &= 0,039 \text{ mm/Ano} \end{aligned}$$

7.4.1.6 Tempo de Vida Útil

Linha P - 111 A

$$\text{Tempo de Vida Útil} = (e_{\text{Minima medida}} - e_{\text{MinimaAdmissivel}}) \div (\text{Taxa de Corrosão}) = 20 \text{ Anos}$$

Massa por Unidade de Volume

Linha P – 111 A

$$m = 0,02466 \times (D - t) \times t = 0,02466 \times (168,3 - 7,112) \times 7,1121 = 28,269 \text{ Kg/m}$$

7.4.2 Aço Inox 316 L

Linha P – 222 A

Outra aplicação muito usada na indústria química e no transporte de gás fosgênio, consiste nas tubagens de material base 316L.

7.4.2.1 Composição dos Elementos de Liga (ASTM A 312 Grade TP 316L)

Elementos de Liga	Composição %
C	0,035
Mn	2,0
P	0,04
S	0,03
Si	0,75
Cr	16,0-18,0
Cu	0,40
Mo	2,0-3,0
Ni	10,0-15,0

Através da análise dos elementos de liga, conclui-se que este aço é um inox austenítico, com boa resistência a corrosão e de baixo carbono, sendo desta forma de fácil soldabilidade.

Sendo um cromo níquel, resiste bem à corrosão, apresentando boas propriedades de cedência e rotura nas condições anteriormente descritas de funcionamento. Refere-se que este aço tem bom comportamento em termos de fissuração a quente e corrosão inter granular; apesar de não conter nióbio nem titânio tem um reduzido valor de carbono o que melhora a soldabilidade e reduz a referida corrosão inter granular.

A percentagem de molibdénio (3%) vai ser muito importante na boa resistência á corrosão, pois este junto com o crómio e o níquel vão potenciar-se. Durante a construção soldada deve ter-se em atenção o arrancamento lamelar e fissuração a frio. Este aço tem muito boas propriedades de tenacidade e ductilidade, embora uma menor resistência a cavitação.

Deve-se portanto acompanhar a evolução do desgaste nos pontos de escoamento turbulento, afim de prever a tensão interna admissível, sem que esta atinja a tensão de cedência e consequentemente deformações plásticas críticas capazes de comprometer o bom funcionamento do equipamento.

Cálculo do Carbono Equivalente

$$CE = \%C + \%Mn/6 + (\%Cr + \%Mo + \%V) /5 + (\%Ni + \%Cu) /15 = 5,595$$

Cálculo do Crómio Equivalente

$$CrE = C + Mo + 1.5 \times Si + 0.5 \times Nb = 3,66$$

Cálculo do Níquel Equivalente

$$NiE = Ni + 30 \times C + 0.5 \times Mn = 14,55$$

As percentagens e tipos de fases, podem ser previamente analisadas e previstas, tendo como base a análise do diagrama de Schaeffler (crómio e níquel equivalentes). Através deste com a consulta dos elementos de liga do metal base e do metal de adição, poder-se-á prever os domínios de estabilidade das diversas fases após arrefecimento, podendo desta forma analisar a susceptibilidade de fissuração, tenacidade, resistência mecânica, etc, etc. Após a análise do aço em questão, pode dizer-se que os domínios, de estabilidade das diversas fases após arrefecimento, vão ser compostos por martensite e ferrite.

7.4.3 INCONEL 600 – 2.4816 – NiCr 15 Fe

Este tipo de construção soldada de tubagens em INCONEL 600, tem enorme aplicabilidade nas principais indústrias químicas de elevada consequência de falha. Trata-se de uma liga com elevada resistência á corrosão, com grão homogéneo e bem distribuído com elevada tenacidade mesmo a baixas temperaturas. O seu melhor desempenho é contudo, a temperaturas até 900°C.

7.4.3.1 Composição dos Elementos de Liga (Inconel 600)

Elementos de Liga	Composição %
C	≤ 0,10
Si	≤ 0,50
Mn	≤ 1,00
P	≤ 0,02
S	≤ 0,015
Cr	14,0-17,0
Ni	72,0
Al	≤ 0,30
Cu	≤ 0,50
Fe	6,0-10,0
Ti	≤ 0,30

7.4.3.2 Níquel

O níquel como o principal elemento de liga do inconel 600:

O níquel aparece na natureza sob a forma de silicatos complexos, sulforetos, óxidos e carbonetos. Tem uma estrutura cúbica de faces centradas e uma condutividade eléctrica e térmica elevada. Em termos de propriedades mecânicas e magnéticas, é similar ao ferro em fase austenítica (ferro γ), embora de maior densidade.

É um metal branco, duro, maquinável e dúctil, fundindo mais lentamente que o aço e tornando-se vermelho antes de fundir.

A superfície bruta é lisa, cinzenta escura e torna-se branca quando maquinada.

A camada de óxido forma uma espuma branca sob o óxido.

O níquel é resistente á corrosão e oxidação, sendo contudo magnético. Em solução sólida com o ferro dá os aços inoxidáveis de largo campo de aplicação.

7.4.3.3 Inconel 600 - Liga Níquel-Crómio

O inconel 600 é definido como uma liga de níquel-crómio.

Esta liga é monofásica de estrutura ferro na fase γ com corpo de faces centradas, tendo como principal elemento de liga o níquel, estando na percentagem de 70%.

Uma adição de ferro (7 a 12%) é efectuada para redução do custo da liga. As ligas Ni-Fe-Cr são austeníticas, não fragilizam na presença do carbono e têm uma boa resistência á corrosão, embora não resistem aos ambientes com enxofre.

Dada a sua excelente resistência á corrosão, a temperaturas criogénicas e elevadas podendo chegar a 900°C, não fragilizam após aquecimento. Poder-se-á melhorar a ductilidade e a fluência adicionando-se nióbio e zircónio.

De uma forma resumida refere-se que, o Inconel 600 apresenta ótimas características mecânicas sendo bastante resistente á corrosão a alta temperatura, nomeadamente em vapor de água sobre pressão, ambientes clorados e cáusticos.

7.4.3.3 Soldabilidade do Inconel

A soldadura desta liga Ni-Cr, é um processo de dificuldade acrescida e relativamente lento, dado que a fusão do metal base como de adição é lenta.

Não necessita de pré aquecimento, nem de tratamento térmico, no entanto deve-se evitar efectuar o processo de soldadura, com o metal base bastante frio, sendo recomendável aquecê-lo sempre a uma temperatura de 20 °C e numa largura de 150 mm à volta da junta.

As peças vazadas de forma maciças ou complexas devem ser aquecidas a 100-150 °C.

Deverá ter-se em atenção a diluição de alguns elementos de liga que poderão ocasionar fissuração.

Alguns valores de elementos de liga toleráveis:

Elementos de Liga	Composição %
Ni	Todos os níveis são toleráveis sem problemas de fissuração.
Cr	O teor máximo é de 30-35%
Fe	Uma diluição de 50% não é tolerável.
Cu	O metal depositado não deverá conter Cu>15%
C e Mn	A diluição destes elementos não apresenta quaisquer problema nos teores habituais.
Si	A sua concentração máxima deve ser <1% podendo ser superior se o metal de adição contiver nióbio.

Como curiosidade, refere-se que a identificação do Inconel relativamente ao Monel pode ser feita através do ácido nítrico.

Deitando ácido nítrico concentrado sobre a amostra se não houver reacção, então é Inconel, se a solução se tornar cinzenta azulada então é Monel.

7.4.3.4 Influência na Soldabilidade do Níquel e suas Ligas em Geral

As impurezas ou elementos de adição existentes no metal base ou susceptíveis de lhe serem introduzidos durante a soldadura ou tratamento térmico.

- O principal elemento nefasto é o enxofre (S), sobretudo para o Ni puro e para os Ni.Cu (Monel 400);
- O Ni tem uma grande afinidade para o S quando aquecido a temperaturas na ordem dos 400 °C;
- O S_2Ni_3 que se forma penetra na massa do metal, fixando-se nos limites de grão, tornando-se frágil;
- O Pb é tão perigoso como o S mas menos frequente, pode ser introduzido através do uso das cintas no aperto de tubos;
- O P origina de forma igual uma precipitação nos limites de grão, aumentando desta forma o risco da denominada fissuração a quente;
- Os produtos de limpeza podem introduzir elementos prejudiciais, tais como o carbonato de sódio ou silicato;
- A fissuração a quente também pode ser proveniente de elevados valores de C, Si e mesmo Al e Ti, se estes elementos estiverem presentes em elevados teores.

8 Cálculo dos Níveis de Fiabilidade de Instalações usando o RBI

Neste capítulo como aplicação do procedimento descrito neste trabalho, classificam-se os equipamentos industriais quanto ao seu nível de fiabilidade usando como suporte principal o método RBI.

A fiabilidade será classificada em 5 níveis distintos, permitindo desta forma informar o sector técnico dos equipamentos de maior criticidade, risco e probabilidade de falha; ou seja de menor fiabilidade em operação.

Através da aplicação do critério apresentado neste trabalho, poder-se-á prever de uma forma mais exacta falhas de grande impacto, maximizando simultaneamente a fiabilidade.

8.1 *Checklists* de Inspeção Externa

O exemplo e os resultados seguidamente apresentados, apesar de realistas são fictícios, mas necessários para comprovar a validade do modelo desenvolvido neste trabalho. Este exemplo consiste na análise de uma tubagem onde os elementos condutores (tubagens) e órgãos anexos são inspeccionados.

A tubagem analisada, de material aço carbono A106, será a apresentada neste trabalho, no quadro 8.1.1.

8.1.1 Checklist P – 111 A

Item	Completo	Recomendações
1. Fugas		
1.1. Fluidos de processo	X	Não foram detectadas fugas.
1.2. Traçagem de vapor (aquecimento de condutas)		A tubagem não é aquecida.
1.3. Ancoragens existentes	X	A tubagem não possui ancoragens.
2. Desalinhamento		
2.1. Desalinhamento da tubagem. Restrições ao deslocamento	X	Tubagem algo desalinhada.
2.2. Desalinhamento em junta de expansão		Não foram encontradas juntas de expansão.
3. Vibração		
3.1. Excessivo peso em troços em balanço	X	Não foi detectado peso excessivo.
3.2. Suportes inadequados	X	Suportes adequados, sem vibrações excessivas.
3.3. Tubos de espessura fina, diâmetro interno pequeno ou de liga metálica		Não foram encontrados.
3.4. Ligações roscadas		Não foram encontradas.
3.5. Suportes soltos causando desgaste do metal		Não foram encontrados.
4. Suportes		
4.1. Sapatas de suporte fora da superfície apropriada (excessivo deslocamento)	X	Sapatas em bom estado.
4.2. Suportes tipo tirante de suspensão distorcido ou fracturado.		Não foram encontrados.
4.3. Molas com extremos fora do alojamento (molas em suportes compensadores)		Não foram encontradas.
4.4. Distorção ou fractura em braçadeiras de sustentação da tubagem		Não foram encontradas.
4.5. Suportes tipo angular soltos		Não foram encontrados.

4.6. Placas de deslizamento/rolos de deslizamento (em suportes para dilatação)		Não foram encontrados.
4.7. Condição do contra peso (em suportes de força constante para dilatação)		Não foram encontrados.
4.8. Corrosão nos suportes	X	Suportes com ligeira corrosão, embora não estejam m contacto directo com a tubagem.
5. Corrosão		
5.1. Pontos de ligação aparafusada das chapas de fixação dos suportes	X	Não foram encontrados.
5.2. Deterioração da pintura/revestimento	X	Pintura em bom estado.
5.3. Interface solo-ar	X	Não existem evidências de corrosão.
5.4. Interfaces de isolamentos		Não existem isolamentos.
5.5. Desenvolvimento orgânico (biológico)	X	Não existem evidências de desenvolvimento orgânico.
5.6. Deterioração das flanges	X	Flanges em bom estado.
6. Isolamento		A tubagem não é isolada.
6.1. Danos/penetrações		“
6.2. Falta de blindagem fina de protecção (jackting) do isolamento		“
6.3. Amassadelas (deformações por impacto), blindagem do isolamento		“
6.4. Bandas de protecção da blindagem fina do isolamento: falta ou fractura		“
6.5. Banding (partido/em falta)		“

8.2 Resultados Obtidos/Acções Correctivas

8.2.1 P - 111 A

Inspecção Visual/Controlo Não Destrutivo	Acções de Correctivas
1. Soldaduras	Acções de Prevenção/Correctivas
As soldaduras da tubagem encontram-se em bom estado de conservação, não apresentando sinais de corrosão, porosidades ou mordeduras visíveis.	
2. Ligações Aparafusadas	Acções de Prevenção/Correctivas
Flanges em bom estado de conservação.	
3. Ligações Rebitadas	Acções de Prevenção/Correctivas
Não foram encontradas.	
4. Juntas de Expansão	Acções de Prevenção/Correctivas
Não foram encontradas.	
5. Válvulas	Acções de Prevenção/Correctivas
Válvulas em bom estado de conservação.	
6. Suportes	Acções de Prevenção/Correctivas
Um suporte com ligeira corrosão, embora não esteja em contacto directo com a tubagem.	Eliminar a corrosão e beneficiar a protecção anticorrosiva.
7. Isolamento	Acções de Prevenção/Correctivas
A tubagem não é isolada.	
8. Revestimento	Acções de Prevenção/Correctivas
A tubagem encontra-se revestida exteriormente com tinta em boas condições de conservação. Interiormente não existe revestimento.	
9. Fugas de Fluido	Acções de Prevenção/Correctivas
Não foram encontradas fugas de fluido.	

10. Desalinhamento	Ações de Prevenção/Correctivas
Tubagem algo desalinhada.	No futuro poderá ser corrigido, uma vez que “não é crítico” ao bom funcionamento do equipamento. Este desalinhamento só tem impacto do ponto de vista ergonómico.
11. Vibrações	Ações de Prevenção/Correctivas
A avaliação de vibrações na tubagem foi efectuada em serviço, por sensibilidade humana. Não foram detectados vibrações ressonantes que possam causar fadiga do material e possíveis roturas na tubagem.	
12. Ovalizações	Ações de Prevenção/Correctivas
Não foram encontradas.	

8.3 Análise da Probabilidade de Falha

Linha P – 111 A

8.3.1 Degradação:

Nível Atribuído	Justificação
2	Encontram-se pequenos sinais de degradação, sendo contudo pouco relevantes.

1.1.1 Fluido Associado:

Nível Atribuído	Justificação
5	Em contacto com H ₂ O reage prontamente, formando HCl e CO ₂ . Este ácido conduz à degradação, rápida e severa do equipamento.

1.1.2 Ocorrência de Atmosferas Explosivas:

Nível Atribuído	Justificação
5	Associado a óleos ou gorduras poderá conduzir a uma explosão e degradação térmica. Em caso de incêndio vai decompor-se em monóxido de carbono, cloro, anidrido carbónico e tetracloreto de carbono.

1.1.4 Tempo de Serviço:

Nível Atribuído	Justificação
2	Tempo de serviço do equipamento data de cerca de 20 anos.

1.1.5 Solicitação:

Nível Atribuído	Justificação
3	A solicitação é moderada. Esta classificação baseia-se nos cálculos efectuados no relatório de inspecção.

1.1.6 Historial:

Nível Atribuído	Justificação
2	Ocorrência de uma falha pouco critica.

1.1.7 Factor Humano:

Nível Atribuído	Justificação
3	Operadores experientes, com tempo de serviço na ordem dos 20 anos.

1.1.8 Eficácia do Plano de Inspeção, Registos de Operação e Projecto:

Nível Atribuído	Justificação
2	Existência de registos de inspecções não totalmente completos. Condições de operação e registos de projecto conhecidos, e taxa de deterioração estimada.

1.1.9 Eficácia da Manutenção:

Nível Atribuído	Justificação
1	Manutenção periódica, eficaz, realizada por uma equipa seleccionada e especializada.

1.1.10 Factores Ambientais:

Nível Atribuído	Justificação
2	<p>Risco ambiental “moderado”, com provável ocorrência de chuvas e ventos fortes. Zonas próximas do mar.</p> <p><u>Sismicidade:</u> Intensidade sísmica máxima absoluta de grau 5. (Escala de Intensidade Sísmica de Wood-Neuman – Escala Internacional).</p> <p><u>Clima:</u> Temperado húmido, com estação de verão pouco quente.</p> <p><u>Temperatura:</u> Temperatura média anual = 17,3 °C. Amplitude térmica anual média = 12,3 °C.</p> <p><u>Nevoeiros:</u> Zona com nevoeiros característicos de região oceânica.</p> <p><u>Precipitação:</u> Clima chuvoso.</p> <p><u>Vento:</u> Durante a manhã predominam situações de calma e vento fraco.</p>

8.4 Factores de Probabilidade de Falha

8.4.1 Linha P – 111 A

P – 111 A	
Factores de Probabilidade de Falha	Classificação
Degradação	2
Fluido Associado	5
Ocorrência de Atmosferas Explosivas	5
Tempo de Serviço	2
Solicitação	3
Historial	2
Factor Humano	3
Eficácia do Plano de Inspeção, Registos de Operação e Projecto	2
Eficácia da Manutenção	1
Factores Ambientais	2

8.5 Cálculo da Probabilidade de Falha

8.5.1 Definição de Siglas Usadas

Factores de Probabilidade de Falha	Sigla
Degradação	D_{Equip}
Fluido Associado	F_{Equip}
Ocorrência de Atmosferas Explosivas	O_{Exp}
Tempo de Serviço	T_S
Solicitação	S_{Equip}
Historial	H_{Equip}
Factor Humano	F_{Humano}
Eficácia do Plano de Inspeção, Registos de Operação e Projecto	$E_{Insp\ registros}$
Eficácia da Manutenção	E_{Manut}
Factores Ambientais	F_{Amb}

8.5.2 Valor Final da Probabilidade de Falha

Linha P – 111 A

$$PF = 0,6 \times D_{Equip} + 0,05 \times F_{Equip} + 0,03 \times O_{Exp} + 0,02 \times T_S + 0,03 \times S_{Equip} + 0,03 \times H_{Equip} + 0,02 \times F_{Humano} + 0,16 \times E_{Insp\ registros} + 0,03 \times E_{Manut} + 0,03 \times F_{Amb} =$$
$$PF = 0,6 \times 2 + 0,05 \times 5 + 0,03 \times 5 + 0,02 \times 2 + 0,03 \times 3 + 0,03 \times 2 + 0,02 \times 3 + 0,16 \times 2 + 0,03 \times 1 + 0,03 \times 2 \Rightarrow \quad \underline{PF = 2,26}$$

8.6 Cálculo do Nível de Fiabilidade RBI

Linha P – 111 A

Este cálculo é efectuado com base em 3 factores que do ponto de vista da fiabilidade, influenciara o resultado final do cálculo demonstrado neste trabalho.

8.6.1 Factores para Calculo do nível de fiabilidade RBI (Escala de 1 a 5):

Classificação do A106:

1. **Sensibilidade à Corrosão – Nível 3** – Este aço, tendo na sua matriz metálica percentagem relativamente elevada de Ferrite (CCC-cúbica de corpo centrado), é mais sensível à corrosão porque os átomos de oxigénio se inserem nas faces dos cristais de Ferrite (CCC), dando origem ao oxido de ferro ou seja fenómeno de corrosão.
2. **Sensibilidade à Propagação de Defeitos – Nível 2** – Trata-se de um aço medianamente dúctil, com adequada insensibilidade à propagação frágil de fendas. A ductilidade é um atributo favorável à resistência do aço à fractura, portanto os aços carbono são medianos neste comportamento. Acresce no entanto, que a sua temperatura de transição frágil/dúctil é relativamente alta, o que não aconselha a sua solicitação a baixas temperaturas.

P – 111 A	
Factores para Cálculo do Nível de Fiabilidade RBI	Classificação
Sensibilidade á Corrosão	3
Sensibilidade á propagação de Defeitos	2

8.6.2 Definição de Siglas Usadas

Factores de Probabilidade de Falha	Sigla
Sensibilidade á Corrosão	$S_{\text{Corrosão}}$
Sensibilidade á propagação de Defeitos	$S_{\text{PropDefeitos}}$

8.6.3 Valor do Nível de Fiabilidade RBI

Linha P – 111 A

$$\text{Nível de Fiabilidade} = 0,5 \times S_{\text{Corrosão}} + 0,5 \times S_{\text{PropDefeitos}} =$$

$$NF = 0,5 \times 3 + 0,5 \times 2 \Rightarrow \underline{NF = 2,5}$$

8.7 Apresentação de Resultados

A tabela seguinte sintetiza os resultados obtidos:

Equipamento	Nível de Probabilidade de Falha	Nível de Fiabilidade RBI
P – 111 A	<u>2,26</u>	<u>2,5</u>

8.7.1 Cálculo da Classificação Final de Fiabilidade RBI

$$\text{Classificação da Fiabilidade} = 0,5 \times P_{\text{Falha}} + 0,5 \times N_{\text{Nível de Fiabilidade RBI}} =$$

$$CFiabilidade = 0,5 \times 2,26 + 0,5 \times 2,5 \Rightarrow \underline{\text{Classificação Fiabilidade} = 2,38}$$

Classificação Final da Fiabilidade RBI

$$\underline{\text{Classificação Final da Fiabilidade} = 2,38}$$

8.7.2 Análise e Discussão do Resultado Final

Considerando os 5 níveis definidos pelo método RBI, apresentados na escala de classificação da matriz de risco (ponto 5.), verifica-se que a classificação em termos de fiabilidade do equipamento analisado (P-111), bem como o seu resultado final (Classificação de Fiabilidade = 2,38), situa-se na zona verde do gráfico.

Refere-se que o escalão da classificação de fiabilidade da tubagem inspeccionada, é atribuída como *Aceitável e Não Crítica*.

9 Conclusões e Futuro Desenvolvimento

9.1 Porquê usar o RBI?

O RBI foi desenvolvido pelo American Petroleum Institute (API), tendo sido utilizado na indústria de geração de energia nuclear durante algum tempo. É actualmente utilizado em refinarias e indústrias petroquímicas. A inspecção com base no risco RBI constitui actualmente, uma das ferramentas essenciais e mais eficazes para por em prática a aplicação dos princípios de análise de risco, como optimização no controlo de programas de inspecção e manutenção de equipamentos de parques industriais.

As falhas em equipamentos estáticos podem ocasionar enormes perdas de material e danos ao meio ambiente. A adopção de estratégias de inspecção, capazes de identificar antecipadamente as falhas, poderão consequentemente, reduzir o perigo destes equipamentos. O uso deste critério é uma tendência crescente entre as indústrias dos sectores petrolífero e químico.

9.2 Principais Vantagens da Aplicação do RBI

- Permitir a identificação e classificação de sistemas e equipamentos críticos para a segurança dos parques industriais;
- Permitir a elaboração de uma estratégia de inspecção, a qual se concentra nos equipamentos que são críticos do ponto de vista do risco, concentrando os esforços de inspecção no que é importante inspecionar, otimizando os dispêndios de recursos;
- Permitir um sistema documentado de inspecção de equipamentos;
- Promover o estudo e o reconhecimento profundo dos mecanismos e processos de corrosão que afectam os equipamentos;
- Permitir a quantificação numérica de riscos por uma metodologia aceite por toda a indústria de petróleo e do sector químico e, conseqüentemente, permitir a comparação entre os diversos parques industriais;
- Optimizar os intervalos entre paragens e permitir o planeamento racional e sistemático das mesmas;
- Promover o acompanhamento permanente do ciclo de vida dos equipamentos, permitindo a manutenção programada e aumentando a taxa de disponibilidade e conseqüentemente a produção do parque.

Basicamente a metodologia RBI procura identificar os equipamentos de maior risco existente num parque industrial.

Todo o equipamento tem um risco associado, que é calculado considerando um cenário de falha desse equipamento.

Essa falha pode provocar uma série de consequências mais ou menos graves ou uma série de consequências sem qualquer impacto.

9.3 RBI em Síntese:

De uma maneira sintetizada pode referir-se, que o método RBI permite individualizar cada equipamento mediante as suas necessidades de conservação, evitando generalizações efectuadas tendo em atenção unicamente as características do fluido e caudal (classificação mediante o perigo).

Poderemos ter dois equipamentos de iguais características e condições de funcionamento, e os seus estados de conservação e necessidades de inspecção serem diferentes.

O RBI classifica a planta e os seus equipamentos por patamares de risco, o que permite identificar os equipamentos de maior risco.

Posteriormente tomar acções correctivas, e assim controlar sempre a probabilidade de falha, evitando surpresas indesejáveis.

9.4 Aplicabilidade do Método

A obtenção do resultado final na classificação da fiabilidade do equipamento, foi baseada na aplicação da probabilidade de falha usada no método RBI, juntamente com factores de sensibilidade de corrosão e propagação de defeitos associados à tubagem P-111.

Com a aplicação deste método demonstrado neste trabalho, pode-se mais assertivamente e eficazmente, analisar um equipamento ao nível de fiabilidade, podendo prever falhas e melhorar a eficácia da manutenção aplicada, maximizando a fiabilidade e reduzindo os custos.

9.5 Futuro Desenvolvimento

Dada a eficácia e a fiabilidade de serviço de inspecção/certificação de plantas industriais efectuado pelo RBI, é imperioso dotar a aplicação deste método da maior celeridade possível, a qual pode ser assegurada por ferramentas informáticas adequadas.

A eficácia do RBI necessita do desenvolvimento crescente, de métodos não destrutivos de inspecção. Desta forma, sugere-se como contributo futuro, o melhoramento e desenvolvimento dos métodos de inspecção Não Destrutiva, e a sua transmissão automática de dados para um programa central, gerindo as estratégias de inspecção a efectuar.