

4. Integridade Estrutural e Metodologias *Fitness for Service*

No presente capítulo serão apresentados alguns conceitos relacionados ao processo de avaliação de Integridade Estrutural. Também será feita uma descrição dos principais procedimentos que avaliam a integridade de componentes estruturais com defeito (*Fitness for Service*).

4.1. Integridade Estrutural

“Diz-se que um componente estrutural está íntegro quando atende às funções para as quais foi projetado, suporta os carregamentos máximos de trabalho, e apresenta um comportamento confiável, previsível e repetitivo por tantos ciclos quanto forem necessários para a sua vida em serviço [49]”.

4.2. Avaliação da Integridade Estrutural (AIE)

“A AIE é o resultado da aplicação de técnicas e procedimentos que permitem estabelecer a situação de dano de uma estrutura, para prever seu comportamento futuro e indicar suas necessidades de inspeção, monitoração, recuperação e reforço [49]”.

4.3. Falha

A falha de uma estrutura ou elemento desta é definida como qualquer situação que impeça o elemento de cumprir a função de transmissão de cargas ou esforços, tal como se prevê no projeto deste, ou seja, a falha é produzida quando o elemento torna-se incapaz de resistir às forças ou esforços previstos no projeto [50].

4.4. A metodologia *Fitness for Service* (FFS)

A metodologia “*Fitness for Service* - FFS” (adequação ao serviço) é uma abordagem multidisciplinar para determinar se o componente estrutural está apto para o serviço contínuo. O equipamento ou sistema pode conter falhas ou outros

tipos de dano, ou pode ser submetido a condições de operação mais severas do que as previstas pelo projeto inicial. Ela usa os conceitos da Resistência dos Materiais, Mecânica da Fratura e técnicas de monitoramento e reparação de componentes estruturais, aplicáveis a maioria dos componentes industriais.

O resultado de uma avaliação FFS é uma decisão de como reavaliar as condições de operação, executar uma reparação, alterar ou retirar o equipamento. Uma análise de vida residual também pode ser realizada como parte da avaliação, que pode ser usada para definir intervalos de inspeção futura. Usada corretamente, esta metodologia pode proporcionar um bom equilíbrio entre a economia e a segurança, evitando reparos desnecessários durante a vida em serviço da maquinaria.

Uma avaliação FFS típica pode envolver várias disciplinas de engenharia, e exige uma quantidade de dados de entrada de acordo com o nível de exigência da avaliação. As metodologias podem variar a sua complexidade, desde avaliações simples até simulações computacionais altamente sofisticadas. O nível de complexidade varia de uma situação para outra. Em alguns casos uma análise avançada é necessária quando uma avaliação simples não é capaz de demonstrar que o equipamento em questão está apto para o serviço contínuo. Procedimentos padronizados FFS incluem uma variedade de opções de avaliação, as quais cobrem uma alta faixa de complexidade.

Apesar de ter conseguido avanços significativos nos últimos anos, ainda existem problemas que impedem a total aceitação destes métodos. O maior problema sempre foi a falta de unificação e homogeneização dos diferentes procedimentos existentes. Com certeza, o usuário que quiser realizar uma AIE aplicando a metodologia FFS se encontrará com uma não pequena gama de documentos, normas, códigos, metodologias ou procedimentos, sem saber com certeza qual deles é o mais adequado para a situação requerida.

Estas metodologias podem ser classificadas em em dois grandes grupos: Os Procedimentos Simplificados, que não exigem grande quantidade de dados, e que geram uma avaliação rápida; e os Procedimentos Detalhados, que requerem além de uma maior quantidade de dados (com procedimentos e exigências mínimas para garantir a qualidade), um estudo detalhado da estrutura e do mecanismo de falha.

4.4.1. Procedimentos Simplificados

4.4.1.1. J-T

É um procedimento de aplicação geral muito utilizado na avaliação de instabilidade de trincas em tubulações e vasos de pressão. Consiste no cálculo simplificado da curva J-T (integral J vs. módulo de rasgamento) aplicada sob o componente, e na sua comparação com a curva J-T de resistência à fratura do material. A carga de instabilidade é avaliada a partir da interseção de ambas curvas [21]. A Figura 4.1 ilustra o procedimento.

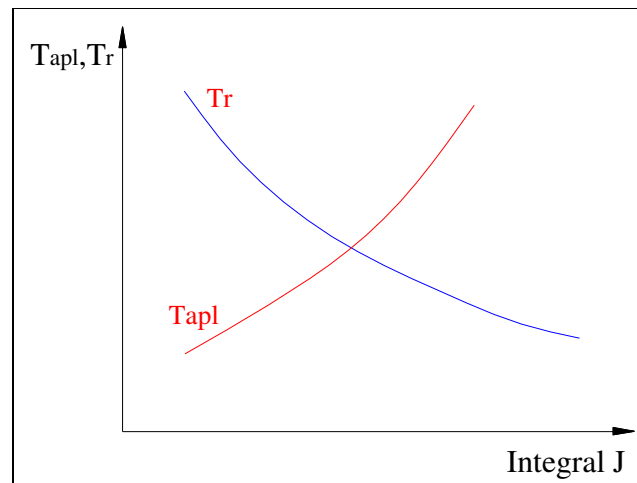


Figura 4.1 – Procedimento J-T.

A instabilidade é dada quando a curva $J-T_{apl}$ corta a curva $J-T_r$. Os módulos de rasgamento são definidos como:

$$T_{apl} = \frac{E}{\sigma_f^2} \left(\frac{\partial J_{apl}}{\partial a} \right) \quad (4.1)$$

$$T_r = \frac{E}{\sigma_f^2} \left(\frac{\partial J_r}{\partial a} \right) \quad (4.2)$$

4.4.1.2. Batelle

Este procedimento proporciona um critério de plastificação de seções trincadas, de tal forma que se é cumprido pode-se assumir que o componente é capaz de alcançar a carga de colapso plástico. Caso contrário, não pode ser prevista a forma nem a causa da fratura da estrutura, mas pode-se afirmar que será produzida numa carga inferior à carga de esgotamento plástico. Este método é aplicável somente em dutos com trincas circunferenciais [21].

4.4.1.3. KWU

Este procedimento é aplicado a sistemas de dutos e é baseado nos resultados do ensaio Charpy. Nesta técnica é afirmado que os componentes que superem o valor de 45 J sempre alcançarão a carga de colapso plástico. Esse valor tem sido confirmado por muitos autores através da análise de uma quantidade considerável de casos. Todavia, a carga de colapso plástico adotada tem que ser um valor suficientemente conservativo [21].

4.4.2. Procedimentos Detalhados

Este tipo de procedimentos é subdividido em dois grupos: Os baseados no uso do diagrama de avaliação de falha - FAD (Failure Assessment Diagram), e os baseados no diagrama da força motriz de trincamento – CDFD (*Crack Driving Force Diagrams*).

4.4.3. Procedimentos baseados no FAD

4.4.3.1. R6 [6]

Em 1976, o Central Electricity Generating Board (CEGB) do Reino Unido publicou a primeira versão do seu próprio método para a avaliação de integridade de estruturas, o chamado procedimento R6. Este procedimento foi o primeiro a empregar a metodologia FAD para avaliação de fraturas de componentes estruturais. Este diagrama reproduz duas regiões bem definidas: uma região onde o ponto da estrutura analisada, considerando uma dada resistência e certa configuração de defeito, é considerada segura; e outra cujas condições que podem levar a uma falha da estrutura no ponto analisado. Originalmente a curva FAD do procedimento R6 foi baseada no modelo proposto por Dugdale, onde se propõe uma solução para o problema de estado plano de tensões de uma trinca em uma placa infinita com material elasto-perfeitamente plástico sujeita à tração. A seguir é feita uma breve descrição da filosofia básica desta metodologia.

Considerando-se o efeito de plasticidade na ponta da trinca, é necessário definir um valor de intensidade de tensão efetivo. Este fator de intensidade foi proposto por Burdekin & Stone (1966), a partir de uma versão modificada do modelo de Dugdale, e é dado por:

$$K_{\text{eff}} = \sigma_y \sqrt{\pi a} \left[\frac{8}{\pi^2} \text{Insec} \left(\frac{\pi \sigma}{2 \sigma_y} \right) \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

onde σ_{ys} é o limite de escoamento do material e a é a metade do comprimento de uma trinca passante da placa de Dugdale. O primeiro passo para a obtenção da curva é a modificação da equação anterior para estruturas reais, com a substituição de σ_y pela tensão de colapso, σ_c , da estrutura. Isto para garantir que o modelo seja capaz de prever a falha da estrutura à medida que a tensão aplicada se aproxima da tensão de colapso. Para uma estrutura sob tração, o colapso ocorre quando a tensão na seção transversal remanescente atinge a tensão de escoamento do material. Portanto, σ_c depende das propriedades de resistência à tração do material e do tamanho de trinca relativo à dimensão total da seção transversal da estrutura. O segundo passo é a normalização do fator de intensidade de tensão efetivo K_{eff} , pelo fator de intensidade de tensão elástico $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$. Chega-se, então, à seguinte equação:

$$\frac{K_{\text{eff}}}{K_I} = \frac{\sigma_c}{\sigma} \left[\frac{8}{\pi^2} \text{Insec} \left(\frac{\pi \sigma}{2 \sigma_c} \right) \right]^{1/2} \quad (4.3)$$

Esta normalização não somente expressa a força motriz da trinca numa forma adimensional, como também elimina o termo que faz referência ao tamanho da trinca ($\sqrt{\pi a}$). Portanto, fica removida a dependência da geometria da trinca. Como passo final, definem-se as razões K_r e L_r :

$$K_r = \frac{K_I}{K_{\text{eff}}} \quad (4.4)$$

$$L_r = \frac{\sigma}{\sigma_c} \quad (4.5)$$

Tomando-se as equações de K_r e L_r obtém-se a equação do diagrama FAD que representa o lugar geométrico da curva que define os campos de operação segura e insegura da estrutura.

$$K_r = L_r \left[\frac{8}{\pi^2} \text{Insec} \left(\frac{\pi}{2} L_r \right) \right]^{1/2} \quad (4.6)$$

A Figura 4.2 apresenta o diagrama FAD proposto pelo procedimento R6, definindo regiões de operação segura da estrutura. O eixo vertical do FAD (K_r) representa a razão entre o fator de intensidade de tensão aplicado e a tenacidade à

fratura do material. O eixo horizontal (L_r) representa a razão entre a tensão aplicada e a tensão de referência. A estrutura falhará por colapso plástico quando $L_r = 1$. Um material frágil falhará quando $K_r = 1$. Nos casos intermediários, o colapso e a fratura interagem e ambos valores são inferiores a 1. Todos os pontos no interior da curva FAD são considerados seguros e os externos ao diagrama potencialmente inseguros.

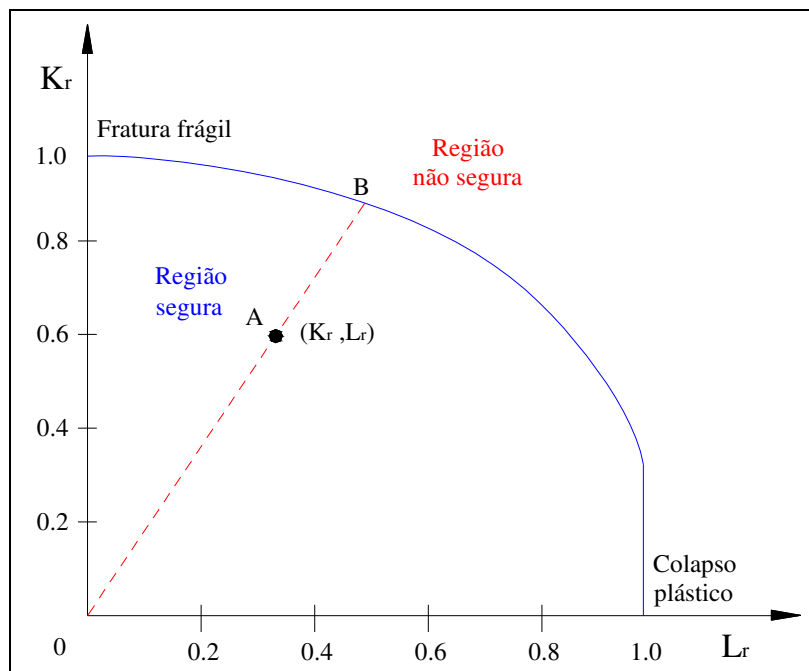


Figura 4.2 – FAD R6.

Além da facilidade de uso, outra vantagem para o emprego do diagrama FAD é que permite avaliar a situação atual da estrutura em relação à falha à medida que a tensão é aplicada, ou à medida que o defeito presente na estrutura aumenta. Esta característica permite estimar quão longe se está da situação de falha, e em que extensão a falha será dominada por um modo de fratura. O diagrama FAD original mostrou-se, entretanto, inadequado para representar efeitos geométricos da estrutura trincada e o comportamento de materiais com capacidade de encruamento (apesar de desenvolvido com base no modelo de Dugdale para material elasto-perfeitamente plástico, o procedimento R6 pode considerar o encruamento do material utilizando-se uma resistência tomada como uma média entre o limite de escoamento e a resistência à tração do material). Atualmente se encontra na revisão 4 (2000). No entanto, esta revisão é continuamente atualizada e melhorada. O procedimento é subdividido em três

categorias de análise, os quais vão desde uma análise simples e preliminar até um estudo completo do processo de crescimento dúctil do defeito.

Categoria 1: Iniciação da propagação da trinca. Este nível de análise é apropriado se o material do componente tem um comportamento frágil, ou se a falha não é acompanhada de um crescimento estável da trinca.

Categoria 2: É usado em casos em que a fratura é acompanhada de uma pequena propagação estável. Este nível não é tão simples quanto o primeiro, pois permite levar em conta o processo de rasgamento dúctil (aumento da resistência à fratura do material em processos controlados pela integral J).

Categoria 3: Este nível é recomendado para casos onde a fratura acontece após um crescimento estável da trinca. Para usar este tipo de análise deve-se dispor da curva de resistência à fratura do material, J_R . A partir desta curva e das condições de solitação da estrutura se obtém uma curva a qual será comparada com a curva de condição crítica. Este nível de análise requer a solução da integral J para a geometria do problema.

As três categorias usam o diagrama FAD para a avaliação do componente, seja usando a curva limite genérica (opção 1), ou usando uma curva específica dependente das características do material (opções 2 e 3). As opções de FAD são mencionadas a seguir:

$$\text{Opção 1 : } K_r = \left[1 + 0,5L_r^2 \right]^{-0,5} \left[0,3 + 0,7 \exp(-0,6L_r^6) \right] \quad (4.7)$$

$$\text{Opção 2 : } K_r = \left[\frac{E \varepsilon_{ref}}{L_r \sigma_y} + \frac{L_r^3 \sigma_y}{2E \varepsilon_{ref}} \right]^{-0,5} \quad (4.8)$$

$$\text{Opção 3 : } K_r = \left(\frac{J_{app}}{J_c} \right)^{-0,5} \quad (4.9)$$

Onde ε_{ref} é a deformação verdadeira obtida a partir da curva tensão-deformação uniaxial na tensão verdadeira $L_r \sigma_y$.

4.4.3.2. API 579-1/ASME FFS-1 [7]

Em 1990 um projeto industrial foi organizado pelo *Materials Properties Council* (MPC) para desenvolver um standard FFS para a indústria de refino. A

maior parte das empresas multinacionais da indústria do petróleo foram parte do grupo patrocinador inicial, incluindo Exxon, Shell, BP, Mobil, Chevron, Texaco, Pennzoil e Arco. Algumas destas empresas tinham desenvolvido seus próprios procedimentos FFS, mas reconheceram que um padrão industrial era necessário. Uma das principais razões por trás desse esforço foi que as melhorias em tecnologia de ensaios não destrutivos (END) permitiu a detecção de maior quantidade de falhas nos equipamentos. Inspeções em serviço foram muitas vezes mais rigorosas do que as inspeções iniciais na etapa de fabricação, e muitas falhas de fabricação não detectadas anteriormente foram encontradas em equipamentos de refinaria durante programas de inspeção.

No total de quatro versões deste relatório foram divulgadas para o grupo patrocinador da MPC ao longo dos anos seguintes. A versão final do relatório foi entregue a uma comissão da API. Essa comissão consistia principalmente dos mesmos membros envolvidos no projeto inicial MPC FFS. O relatório evoluiu muito rápido e se tornou o conhecido procedimento API 579, o qual foi publicado no início do ano 2000. A API 579 recebeu imediata e ampla aceitação, tanto dentro como fora da indústria do refino.

Nesse meio tempo, o Comitê de Pós-construção do ASME *Boiler and Pressure Vessel Code Main Committee* formou o grupo de trabalho em avaliação de falhas, o qual desenvolveu um standard FFS para equipamentos sob pressão em aplicações fora da indústria de refino. Este grupo de trabalho fez pequenos progressos, e foi dissolvido logo após a publicação da API 579. Uma norma conjunta foi publicada no verão de 2007 com o nome API 579-1/ASME FFS-1.

Este documento é dividido em 11 seções independentes dedicadas à avaliação de integridade de estruturas, abordando aspectos relativos à fratura frágil, corrosão, distorções de soldagem, efeitos de altas temperaturas, e defeitos tipo trinca. Em sua seção 9, dedicada a defeitos tipo trinca, existem três níveis de avaliação. Em geral cada um deles apresenta um balanço entre o grau de conservadorismo envolvido, a quantidade de informação necessária na análise, a capacitação do técnico na utilização do procedimento, e a complexidade da análise a ser realizada. Os níveis são os seguintes:

Nível 1: Esta é uma avaliação simples, sensivelmente conservador, um critério seletivo somente válido para certos componentes, certas geometrias de

defeito, condições de cargas, e em determinados materiais. Seu uso é muito restrito, mas como não requer o uso do FAD, pode envolver cálculos simples.

Nível 2: É uma avaliação mais complexa e detalhada do que o nível 1, menos conservativa e utiliza propriedades mecânicas do material extraído da estrutura.

Nível 3: Exige uma análise mais avançada e dados atualizados de inspeção e propriedades do material da estrutura, e pode exigir análise numérica.

4.4.3.3. EXXON

O procedimento publicado pela EXXON é composto por um grupo de seções e apêndices que vão além de um procedimento de cálculo, já que incluem seções voltadas à inspeção direta de componentes. Este método é baseado na BS 7910, e é aplicável apenas na avaliação de vasos de pressão, gasodutos e tanques de armazenamento. Ele só considera duas categorias de avaliação do BS 7910 (nível 1 e 2), sendo que no nível 2 é considerado unicamente o diagrama generalizado.

4.4.3.4. SAQ [8]

Inicialmente foi desenvolvido para a indústria nuclear, mas também é usado em outras aplicações. O procedimento SAQ é baseado na metodologia R6, e procura uma análise rápida e conservativa. No processo existe apenas uma opção de FAD correspondente à curva padrão do R6 (Opção 1) [16].

4.4.4. Procedimentos baseados no CDFD

4.4.4.1. EPRI-GE

Proposta em 1981 pelo EPRI (Electric Power Research Institute) e pela GE (General Electric), apresenta uma metodologia para calcular a força motriz da trinca baseada no conceito de crescimento de trinca controlado pela integral J. O chamado procedimento EPRI-GE propõe alguns métodos gráficos para previsão do início de crescimento, crescimento estável e crescimento instável de trinca, combinando estimativas da força motriz da trinca (J aplicado) com a curva J_R de resistência à fratura do material obtida experimentalmente [51].

Esta metodologia de avaliação parte das premissas fundamentais de que J pode ser separado em uma parte elástica e uma parte plástica como mostrado:

$$J=J_{el}(a_{eff},P)+J_{pl}(a,P,n) \quad (4.10)$$

J_{el} é a parte elástica baseada no comprimento efetivo de trinca de Irwin e pode ser obtida através da seguinte equação:

$$J_{el}=\frac{K_I^2}{E'} \quad (4.11)$$

J_{pl} é a parte plástica baseada na teoria da plasticidade da deformação. A sua obtenção é feita admitindo-se que o ligamento da estrutura trincada está completamente plastificado, e que o material tem um comportamento que pode ser representado por uma equação do tipo Ramberg Osgood:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}=\frac{\sigma}{\sigma_0}+\alpha\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n \quad (4.12)$$

onde α é uma constante do material, ε_0 é a deformação de escoamento, σ_0 é a tensão de escoamento e n é o expoente de encruamento do material. Desta forma J_{pl} pode ser expresso como:

$$J_{pl}=\alpha.\sigma_0.\varepsilon_0.b.h_1\left(\frac{a}{W},n\right)\left(\frac{P}{P_0}\right)^{n+1} \quad (4.13)$$

onde P é o carregamento aplicado, P_0 é a carga limite, a é o comprimento de trinca, b é a espessura, $b = W - a$ é o ligamento, e h é uma função adimensional que depende da geometria e de n .

O procedimento do EPRI prevê a utilização de métodos gráficos simples onde são confrontadas as estimativas de força motriz da trinca com a curva de resistência do material, determinada a partir de ensaios de corpos de prova padronizados. Dependendo da aplicação, podem ser usados os seguintes diagramas: o diagrama da força motriz da trinca (*crack driving force diagram – CDFD*), mostrado na Figura 4.3, o qual permite uma análise global do crescimento da trinca desde o início até a instabilidade; e o diagrama para avaliação de estabilidade (*stability assessment diagram – SAD*), mostrado na Figura 4.4, o qual define regiões de carregamento onde ocorre comportamento estável e comportamento instável.

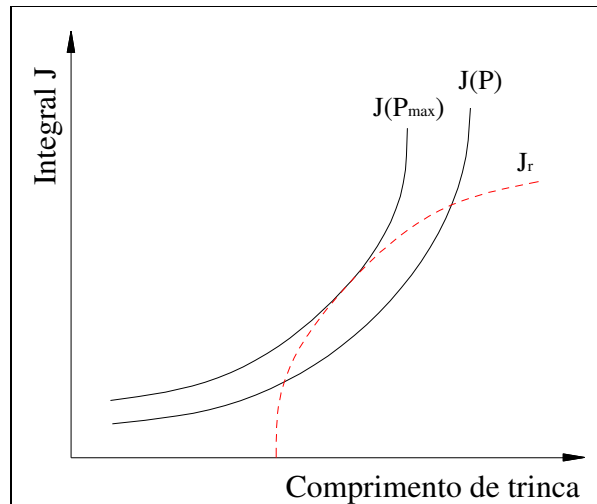


Figura 4.3– Crack driving force diagram[52].

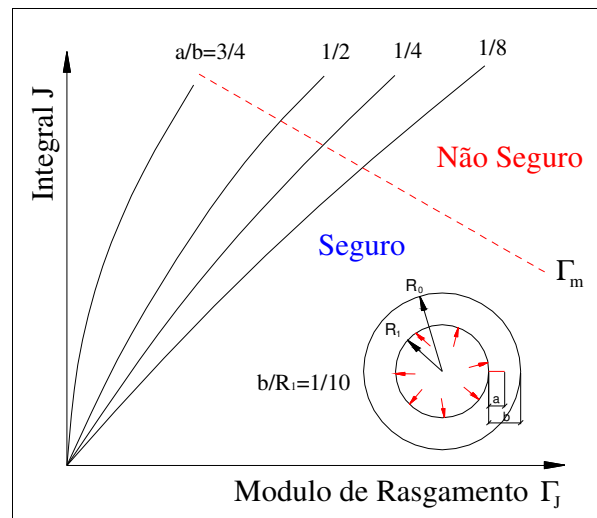


Figura 4.4 – Stability assessment diagram[52].

4.4.4.2.ETM

O procedimento ETM (*Engineering Treatment Model*) foi desenvolvido pelo instituto alemão *GKSS Research Centre* e publicado na primeira versão no ano de 1995. A metodologia é baseada numa simplificação do uso da integral J . Ao contrário do método EPRI, a parte plástica de J é calculada a partir do fator de intensidade de tensão K_I , ou seja, de sua própria componente elástica. As expressões para cálculo de K_I são muito mais fáceis de obter, logo o procedimento de cálculo é simplificado notavelmente. Similarmente ao EPRI, é usado um ajuste da curva tensão-deformação do material, assim como a curva de resistência à

fratura J_R . Pode-se afirmar que o procedimento ETM é um esforço notável em favor do uso prático dos diagramas CDFD.

4.4.5. Procedimentos baseados em ambas as metodologias

4.4.5.1. SINTAP [9]

O SINTAP (*Structural Integrity Assessment Procedures of European Industry*) é um projeto multidisciplinar co-financiado pela União Europeia, com o objetivo de elaborar um procedimento unificado para avaliação do comportamento à fratura de equipamentos estruturais. O projeto teve início no ano 1996 e foi concluído em abril de 1999. Embora muitos métodos de avaliação da fratura já fossem usados quando o projeto SINTAP começou, existiam muitas abordagens conflitantes e uma quantidade não especificada de empirismo. O SINTAP cobriu tanto a modelagem como o trabalho experimental, e uma grande parte do projeto dedicou-se à transferência de conhecimentos e de dados entre as indústrias e organizações científicas, junto com a sua compilação e interpretação para fornecer as soluções necessárias. O produto final deste projeto foi um procedimento que pode ser aplicado a uma ampla gama de usuários, devido a sua capacidade de oferecer rotas de complexidade variada. Tendo em conta a natureza compreensiva do projeto e a necessidade de considerar cuidadosamente os requisitos do usuário final, um consórcio de grande alcance foi estabelecido para o projeto. Este foi composto por um fornecedor de material (British Steel), um gerador de eletricidade (British Energy), um fornecedor de petróleo e gás (Shell), um processador químico (EXXON), assessores de segurança (Health & Safety Executive and SAQ Inspection Ltd), instituições de pesquisa (GKSS, Fraunhofer IWM, Institut de Soudure, TWI, VTT, JRC), duas universidades (Cantabria e Ghent), um desenvolvedor de software (Marine Computation Services) e uma empresa de consultoria (Integrity Management Service). O projeto foi coordenado pela Swinden Technology Centre, Corus (UK), com as cinco áreas principais mencionadas a seguir:

- Tarefa 1: *Mismatch* (Líder: GKSS): Quantificar o comportamento da resistência de juntas *mismatch* (grau de heterogeneidade mecânica) e apresentar recomendações para o seu tratamento no procedimento.

- Tarefa 2: *Falha de componentes com defeito (Líder: British Energy)*: Ampliar a compreensão do comportamento dos componentes trincados nas áreas específicas de restrição, influência da razão entre resistência a escoamento e resistência à ruptura, *leak before break* (vazar antes de quebrar) e soluções do fator de intensidade de tensão e carga de escoamento.
- Tarefa 3: *Tratamento e otimização de dados (Líder: VTT)*: Desenvolver um método de avaliação de defeitos baseado em confiabilidade aplicável na indústria.
- Tarefa 4: *Tensões Secundárias (Líder: IdS)*: Determinar e validar o método mais apropriado para quantificar as tensões residuais, incluindo um compêndio de perfis de tensões residuais.
- Tarefa 5: *Desenvolvimento do Procedimento (Líder: Corus)*: Desenvolvimento e validação do procedimento

Cada tarefa compreende um número de sub-tarefas, conforme mostrado na

Tabela 4.1:

Tarefa 1 <i>Mismatch</i>	Tarefa 2 <i>Componentes trincados</i>	Tarefa 3 <i>Tratamento de dados</i>	Tarefa 4 <i>Tensões secundárias</i>	Tarefa 5 <i>Desenvolvimento do Procedimento</i>
1.1 Revisão	2.1 Revisão	3.1 Revisão	4.1 Revisão	5.1 Revisão
1.2 Bi-materiais	2.2 Restrição	3.2 Tenacidade	4.2 Comparar perfis	5.2 Procedimento
1.3 Solda multipasse	2.3 Razão Sy/Su	3.3 Correlações Charpy	4.3 Modelagem e ensaios	5.3 Software
1.4 Modelagem	2.4 Sobrecarga	3.4 Guia END	4.4 Biblioteca de perfis	5.4 Validação
1.5 Procedimento	2.5 Leak before Break	3.5 Probabilidades	4.5 Procedimento	5.5 Documentação
	2.6 FIT e carga de escoamento	3.6 Procedimento		
	2.7 Procedimento			

Tabela 4.1 – Tarefas e subtarefas do projeto[53].

Cabe mencionar que o procedimento SINTAP é aplicável somente aos modos de falha por fratura frágil, colapso plástico ou combinações destes. Outros modos de falha não são abrangidos por este procedimento [53]. O procedimento SINTAP é muito usado na indústria europeia hoje em dia, nasceu também com o objetivo de formar parte da futura norma europeia de integridade estrutural, cujo desenvolvimento começou no ano 2002 com o lançamento do projeto FITNET.

4.4.5.2. FITNET

O FITNET (*Fitnet for Service Network*) foi uma rede temática europeia que funcionou durante quatro anos, a partir de fevereiro de 2002 a maio de 2006. O

objetivo foi desenvolver e estender o uso de procedimentos de AIE na Europa, harmonizar os diferentes procedimentos existentes e incorporar avanços produzidos no conhecimento das áreas afins na avaliação da integridade estrutural. O projeto FITNET foi parcialmente financiado pela Comissão Europeia no âmbito do seu quinto Programa marco e foi constituído por 47 organizações de 17 países da Europa, mas também teve contribuição de organismos nos EUA, Japão e Coreia. Mesmo já existindo uma grande quantidade de procedimentos FFS (API 759, BS 7910, SINTAP, R6, etc), todos eles abrangiam basicamente um único modo de falha (fratura) ou eram documentos de uso nacional, por tanto existia uma grande necessidade de desenvolver um procedimento Europeu Unificado, como último passo para alcançar o grau de norma europeia [54]. A estrutura do projeto FITNET é matricial e está formada por grupos de tarefas encaminhados à criação do procedimento (Work Packages), e por grupos associados aos diferentes problemas da integridade estrutural (Working Groups). Como responsável por cada um dos Work Packages ou dos Working Groups encontra-se um dos líderes de projeto, que conta com o apoio do restante dos membros para o desenvolvimento dos trabalhos. Na tabela 4.2 é mostrada a estrutura matricial do projeto e os líderes das diferentes atividades, assim como as relações entre Work Packages e Working Groups [55].

Work Packages (WP)	Working Groups (WG)			
	WG1 - Fratura (Corus - G.B., Holanda)	WG2 - Fadiga (Caterpillar - França)	WG3 - Fluência (British Energy - G.B.)	WG4 - Corrosão (Shell - Holanda, G.B.)
WP1 - Coordenação (GKSS - Alemanha)				
WP2 - Estado da Arte (JRC - EU)				
WP3 - Desenvolvimento do Procedimento (GKSS - Alemanha)				
WP4 - Implementação e estudo de casos (VTT - Finlândia)				
WP5 - Divulgação (TWI - Grã-Bretanha)				
WP6 - Treinamento e Educação (U. de Cantabria - Espanha)				
WP7 - Normalização (CESI - Itália)	↓	↓	↓	↓

Tabela 4.2 – Estrutura matricial do projeto FITNET[54].

O conteúdo do módulo de fratura do FITNET foi baseado principalmente sobre os desenvolvimentos anteriores realizados no âmbito do projeto SINTAP bem como os avanços posteriores em outros documentos, tais como a revisão 4 do

procedimento R6 e alterações à norma britânica BS 7910. Além disso, os resultados de outros projetos da União Europeia foram usados para estender o tratamento de diversas áreas problemáticas, tais como os efeitos da restrição e tratamento de estruturas de paredes finas. Existem outros procedimentos, os quais não usam os diagramas estudados anteriormente (FAD e CDFD), tais como o ASME XI, EN J e DPFAD. A seguir será apresentada uma descrição detalhada de um dos procedimentos mais usados atualmente, o britânico BS 7910.

4.4.6. Procedimento BS 7910:2005 [10]

O primeiro procedimento a ser publicado pela BSI (British Standards Institution) foi o PD6493: 1980. A designação PD (documento publicado) reflete o fato de que o documento não foi destinado para ser um padrão, mas sim um documento de orientação. O Procedimento foi publicado em um momento em que a construção de vasos de pressão, tubulações e jaquetas offshore no Reino Unido atingiu um nível muito grande. Ao mesmo tempo, falhas catastróficas de algumas destas estruturas tornaram importante a criação de procedimentos para garantir a qualidade dos materiais, e dos procedimentos de fabricação e de manutenção. A PD6493 foi valiosa para ajudar os engenheiros a distinguir entre falhas “críticas”, que podem levar as estruturas ao colapso, e falhas “toleráveis”, não catastróficas, em grande medida inevitáveis devido principalmente aos processos de solda. A PD6493 inicialmente abordava os modos de falha fratura frágil e fadiga.

Enquanto isso, a indústria nuclear do Reino Unido já tinha desenvolvido (1976) sua própria técnica de avaliação de falhas, designada R6. Ao contrário do PD6493, o método R6 considerou a possibilidade de falha devido à fratura frágil e ao colapso plástico, e introduziu o conceito de diagrama de análise da falha (FAD) para mostrar a interação entre os dois, como já foi detalhado. Embora os procedimentos PD6493 e R6 fossem métodos desenvolvidos em paralelo, e estivessem dirigidos a necessidades de diferentes setores da indústria, tornou-se claro que a tecnologia usada por eles era muito similar. Por isso, a abordagem FAD foi adotada na segunda edição da PD6493 em 1991. Para cálculos simplificados, um FAD equivalente baseado na PD6493: 1980 foi adotado. Este foi chamado de nível 1, inclui um fator de segurança inerente, e assume que não existe interação entre a plasticidade e a força motriz da trinca.

Em 1999, mudanças mais radicais foram feitas no documento, tais como incluir métodos de avaliação de corrosão para dutos, soluções para o cálculo do fator de intensidade de tensão e tensões de referência para diferentes geometrias, e distribuição de tensões residuais para vários processos de solda. O documento passou a ser chamado de guia BS 7910. Desde então o conteúdo técnico da BS 7910 manteve-se estável, embora a segunda edição do documento (2005) adicione algumas correções em algumas partes. A versão atual do procedimento inclui a emenda 1, publicada em 2007. O procedimento contém três níveis de avaliação :

- Nível 1: Procedimento de avaliação preliminar, simples e conservativo. É muito utilizado quando a informação ou dados do componente e material são limitados, e está subdividido em 1A, que utiliza um FAD genérico e 1B, que não utiliza o FAD para avaliação.
- Nível 2: Considerado como um procedimento “normal” ou comum de avaliação, e está subdividido em 2A, que utiliza um FAD genérico e 2B, que utiliza um FAD específico para cada material.
- Nível 3: Utiliza os mesmos procedimentos do Nível 2, mas a grande diferença é que considera na análise o crescimento estável do defeito antes da fratura. É subdividido em 3A, que usa um FAD genérico, 3B que usa um FAD específico para cada material.

Trincas consideradas inseguras por um nível 1 conservativo podem ser seguras por um nível 2 mais preciso. Da mesma forma, trincas inseguras por um nível 2 podem ser seguras no nível 3, se uma quantidade pequena de crescimento estável de trinca é permitida. A BS-7910 é constituída por 10 seções e 21 anexos como mostrado na tabela 4.3. Os tipos de defeito avaliados são:

- Defeitos planares
- Defeitos volumétricos
- Imperfeições de forma

Os modos de falha considerados são:

- Falha por fratura e colapso plástico.
- Danos por fadiga.
- Danos por fluência-fadiga.
- Danos por vazamento de contaminantes.
- Danos por erosão-corrosão.

- Danos por trincamento assistido pelo meio.
- Falha por instabilidade.

A informação essencial requerida para a avaliação considera:

- Natureza, posição e orientação do defeito.
- Geometria da estrutura, da solda e procedimento de fabricação.
- Tensões a considerar, temperaturas e transientes.
- Propriedades mecânicas do material.
- Dados de fadiga, corrosão-fadiga e propagação de trinca.
- Tenacidade do material.
- Dados de fluência.
- Dados de corrosão sobre tensão.

A informação requerida dos ensaios não destrutivos deve incluir:

- Comprimento e profundidade do defeito.
- Posição do defeito.
- Orientação do defeito em relação às tensões principais.
- Tipo de defeito.

Seção	Descrição
1	Escopo
2	Referências normativas
3	Simbolos e definições
4	Tipo de defeito
5	Modos de falha e mecanismos de dano
6	Informações requeridas para avaliação
7	Avaliação da resistência à fratura
8	Avaliação de fadiga
9	Avaliação de defeitos sob condição de fluência
10	Avaliação de outros modos de falha
Anexo	Descrição
A	Avaliação em condição de tensões normais e de cisalhamento combinadas ou modos de carregamento I,II e III combinados
B	Procedimentos de avaliação para juntas soldadas em estruturas tubulares offshore
C	Procedimentos para avaliação de fratura para vasos de pressão e dutos
D	Tensões devido a desalinhamento
E	Re-categorização de defeitos
F	Procedimento para avaliação leak for break
G	Avaliação de corrosão em dutos e vasos de pressão
H	Registro das avaliações de fratura, fadiga e fluência
I	A significancia de soldas de resistência dissimilares sobre o comportamento à fratura de juntas soldadas
J	Uso do teste de impacto Charpy-V para estimar a tenacidade à fratura
K	Confiabilidade, fatores de segurança parciais, nº de testes e fatores de reserva
L	Determinação da tenacidade à fratura para soldas
M	Soluções para fatores de intensidade de tensão
N	Procedimentos simplificados para definição de critérios de aceitação para defeitos conhecidos ou para estimativa do tamanho aceitável de defeito usando Nível 1
O	Considerações sobre teste de pressão e "warm prestressing"
P	Cálculo da tensão de referência
Q	Distribuições de tensão residual em juntas soldadas
R	Determinação dos efeitos de interação de plasticidade para tensões primária e secundária combinadas
S	Métodos de integração numérica para estimativa de vida à fadiga
T	Informações para avaliação de propagação de trincas a alta temperatura
U	Exemplo para demonstração do procedimento de avaliação de falha a alta Temperatura

Tabela 4.3 – Estrutura da BS 7910 [10].

4.4.6.1. Tensões

As tensões a serem consideradas são aquelas que seriam calculadas por uma análise de tensões em uma estrutura sem defeito. Elas são divididas em tensões primárias e secundárias. As tensões primárias são induzidas por carregamentos externos e contribuem para o colapso plástico, enquanto que as tensões secundárias não contribuem para este modo de falha.

4.4.6.2. Tensões Primárias (P)

As tensões primárias são aquelas que contribuem para o colapso plástico, e podem também contribuir para as falhas por fratura, fadiga, fluência ou corrosão sob tensão. Incluem as tensões resultantes de pressões internas e cargas externas. As tensões primárias são subdivididas em componentes de membrana P_m e componentes de flexão P_b . P_m é a tensão uniforme através da seção da espessura necessária para garantir o equilíbrio da estrutura. P_b varia linearmente através da seção da espessura, e equilibra o momento de flexão aplicado na estrutura. A tensão total primária é $P = P_m + P_b$.

4.4.6.3. Tensões Secundárias (Q)

Tensões residuais e térmicas são consideradas secundárias. Elas não contribuem para o colapso plástico, uma vez que surgem a partir de cargas com deformação ou deslocamento limitado. Mas contribuem na severidade local em pontas de trinca e entalhes, portanto devem ser incluídas nos cálculos de K_I , ΔK_I , J , e δ_m , assim como devem multiplicadas por fatores de concentração adequados para a análise de tensão respectiva. As tensões secundárias também podem ser divididas em componente de membrana Q_m e de flexão Q_b .

4.4.6.4. Procedimento Nível 1

Nível 1A é desenvolvido usando um FAD geral (Figura 4.5). Ele aceita cargas que induzem K_r ou $\sqrt{\delta_r} \leq \sqrt{2}/2$ e $S_r \leq 0,8$. O diagrama FAD tem um fator de segurança intrínseco de 2 em tamanho de defeitos, portanto não necessita de fatores adicionais de segurança.

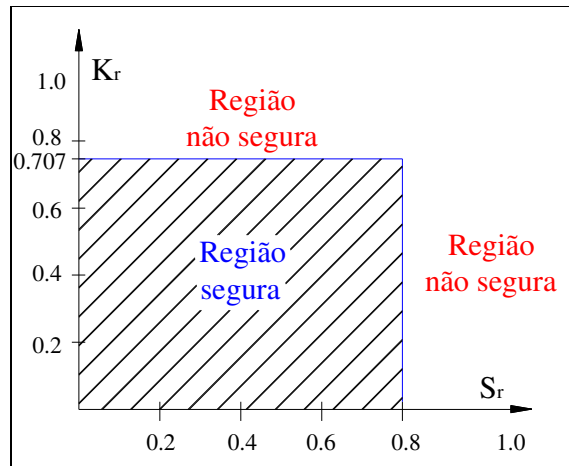


Figura 4.5 – FAD Nível 1.

Nível 1B é baseado em um tamanho aceitável de trinca, não em um FAD. A Figura 4.7 mostra um diagrama de fluxo com os passos a seguir para realizar uma avaliação de Integridade Estrutural do nível 1 segundo a BS 7910. Em seguida são descritos cada um desses passos.

- 1) **Definir Tensões:** Determinar e classificar as tensões (primárias ou secundárias) devido aos carregamentos aplicados no local de análise. As tensões são determinadas supondo a estrutura sem a presença do defeito. A distribuição de tensão real poderá ser usada na avaliação, contudo, a linearização torna-se mais conveniente para a avaliação.
- 2) **Dados de tenacidade:** Os valores de tenacidade à fratura devem ser determinados a partir dos requerimentos da norma BS 7448. Quando os dados de tenacidade não podem ser calculados, uma estimativa de K_{mat} é determinada a partir de dados do teste de impacto Charpy-V conforme o anexo J da BS 7910.
- 3) **Determinar propriedades do teste de tração:** Testar CPs da estrutura avaliada e calcular a resistência ao escoamento (S_y), resistência à ruptura (S_u) e módulo de elasticidade (E) à temperatura apropriada.
- 4) **Caracterizar o defeito:** Defeitos planares devem ser caracterizados por uma altura (ou profundidade) e um comprimento que são medidos dos lados de um retângulo que o envolve. Múltiplas trincas em uma mesma seção transversal podem causar danos mais severos do que a soma dos efeitos causados por cada uma em separado. A norma estabelece critérios de

interação de trincas e propõe dimensões efetivas quando múltiplas trincas estão presentes em uma mesma seção.

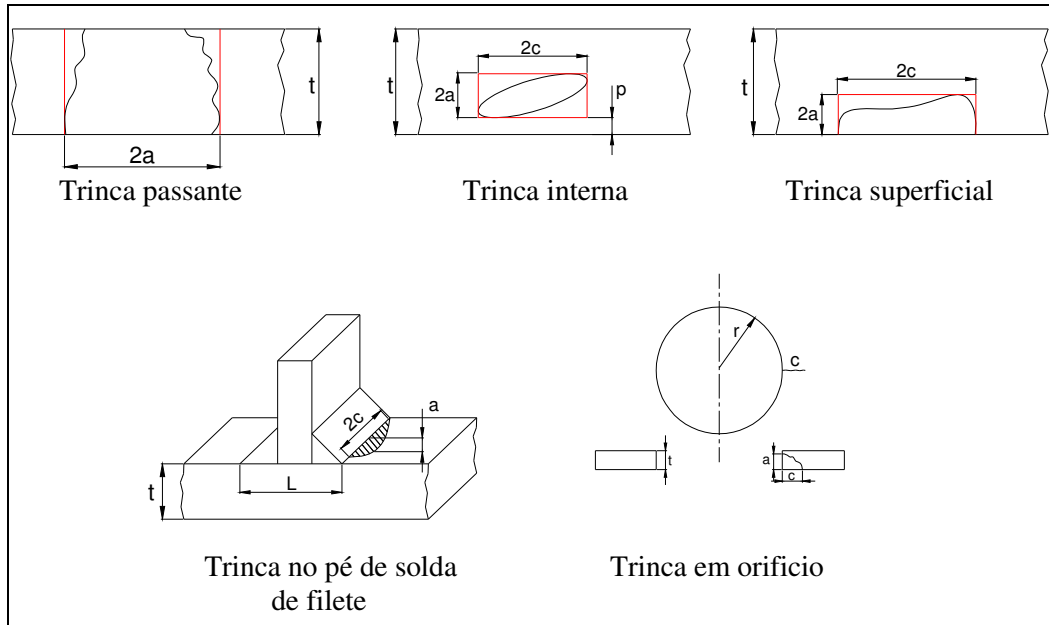


Figura 4.6 – Tipos de defeito.

- 5) **Selecionar Método de Análise:** Se o nível 1B for escolhido (não utiliza FAD) seguir os passos do Anexo N do procedimento, se for escolhido o nível 1A continuar a sequência apresentada.

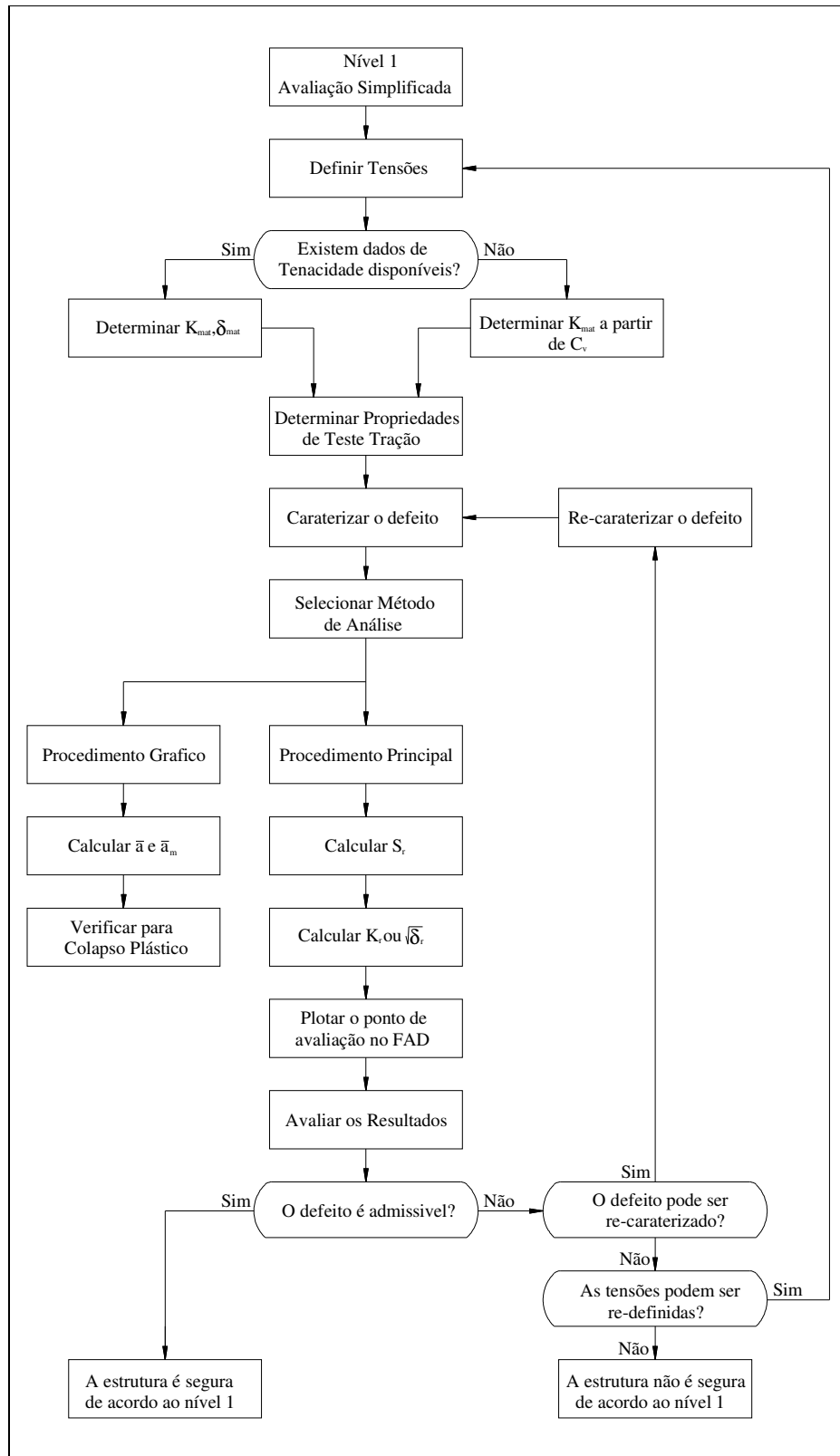


Figura 4.7 – Diagrama de fluxo Nível 1 [10].

6) **Calcular S_r** : A razão de colapso plástico (S_r) é definida como segue :

$$S_r = \frac{\sigma_{ref}}{S_f} \quad (4.14)$$

$$S_f = \frac{S_y + S_u}{2} \quad (4.15)$$

S_f é usado ao invés de S_y para considerar os efeitos de encruamento do material. O valor máximo de S_f é $1,2 S_y$. A tensão de referência (σ_{ref}) descreve o colapso plástico do ligamento residual adjacente ao defeito, ou pela seção líquida de colapso da seção estrutural que contém o defeito. O colapso de toda a estrutura que ocorre longe, ou então não é afetado pela seção de falhas, deve ser considerado por boas práticas de projeto. Formulas para σ_{ref} são fornecidas para vários componentes estruturais na norma, na Figura 4.8 são apresentadas algumas delas.

7) **Calcular K_r ou $\sqrt{\delta_r}$** : A razão de intensidade K_r é definida como segue:

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} \quad (4.16)$$

onde K_I é o fator de intensidade de tensões aplicado e K_{mat} é a tenacidade à fratura do material. Se a abordagem CTOD é usada, então:

$$\delta_I = \kappa \frac{K_I^2}{S_y E} \quad (4.17)$$

onde

$$\kappa \left(\frac{\sigma_{max}}{S_y} \leq 0,5 \right) = 1 \text{ ou } \kappa \left(\frac{\sigma_{max}}{S_y} > 0,5 \right) = \left(\frac{\sigma_{max}}{S_y} - 0,25 \right) \left(\frac{S_y}{\sigma_{max}} \right)^2 \quad (4.18)$$

Mas este fator $0,86 \leq \kappa \leq 1$ aplica-se apenas para aços e ligas de alumínio, para outros materiais $\kappa = 1$. Assim o valor de $\sqrt{\delta_r}$ é dado por:

$$\sqrt{\delta_r} = \sqrt{\frac{\delta_I}{\delta_{mat}}} \quad (4.19)$$

Para o cálculo de K_I a máxima tensão de tração deve ser calculada por:

$$\sigma_{max} = k_{tm} P_m + k_{tb} [P_b + (k_m - 1) P_m] + Q \quad (4.20)$$

onde k_{tm} e k_{tb} são os fatores de concentração de tensão devido às tensões de membrana e flexão na localização do defeito, e k_m é um fator de concentração de tensão devido ao desalinhamento.

Mas σ_{max} pode ser demasiado conservativo para trincas profundas, que são menos afetadas por K_t e por desalinhamentos de P_m . Para trincas dentro ou perto de estruturas soldadas, uma (grande) tensão trativa residual $Q_m = S_y$ pode ser incluída em σ_{max} . Para trincas perpendiculares às soldas com frentes parcialmente dentro delas, S_y é o maior entre a solda e o metal de base. Se eles são paralelos à solda, S_y é o menor. Para aços ao carbono, C-Mn, e 2,25Cr1Mo e tensões aliviadas numa faixa de temperatura 580-620 °C, $Q_m = 0,3S_y$ para trincas perpendiculares e $Q_m = 0,2S_y$ para trincas paralelas às soldas. Reduções de tensões residuais devido a alguns tipos de pré-cargas mecânicas podem também ser consideradas. Na verdade, desde que muitos detalhes afetam as predições do código, é indispensável seguir religiosamente os procedimentos. O fator de intensidade de tensões, K_I , deve ser calculado como segue:

$$K_I = (Y\sigma) \sqrt{\pi a} \quad (4.21)$$

$$(Y\sigma) = M f_w M_m \sigma_{max} \quad (4.22)$$

onde M é o fator de correção para curvatura, f_w é o fator de correção para largura finita do componente, e M_m é o fator geométrico para as tensões de membrana. Esses fatores dependem da geometria e do tipo de defeito..

- 8) **Plotar o ponto de avaliação no FAD:** Plotar o ponto de avaliação, coordenadas (S_r , K_r ou $\sqrt{\delta_r}$) no FAD genérico
- 9) **Avaliar os Resultados:** Se o ponto de avaliação encontra-se no interior do diagrama, o defeito é aceito pelo nível 1 da norma. Caso contrario, o defeito não é aceito e as seguintes ações poderão ser tomadas:
 - Recaracterizar o defeito e repetir o procedimento
 - Redefinir as tensões e repetir o procedimento
 - Reparar o componente

Se depois de aplicar uma ou várias destas ações o defeito ainda não é aceito pelo nível 1, recomenda-se avaliação pelo nível 2 ou 3.

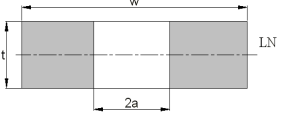
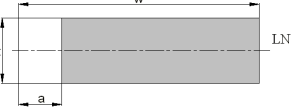
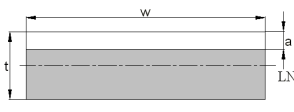
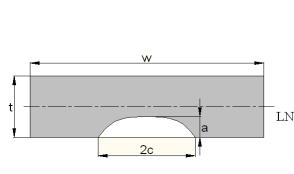
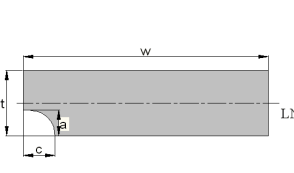
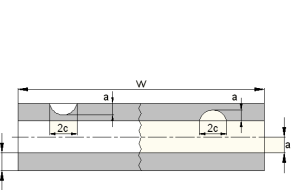
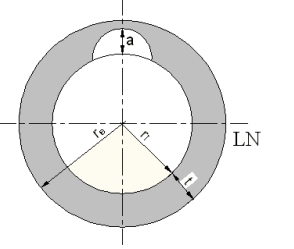
	$\sigma_{ref} = \frac{P_b + \sqrt{P_b^2 + 9P_m^2}}{3 \left[1 - 2a/w \right]}$
	$\sigma_{ref} = \frac{P_b + \sqrt{P_b^2 + 9P_m^2}}{3 \left[1 - a/w \right]}$
	$\sigma_{ref} = \frac{P_b + \sqrt{P_b^2 + 9P_m^2 \left(1 - a/t \right)^2}}{3 \left(1 - a/t \right)^2}$
	$\sigma_{ref} = \frac{P_b + \sqrt{P_b^2 + 9P_m^2 \left(1 - \alpha \right)^2}}{3 \left(1 - \alpha \right)^2}$ $\alpha = \frac{a/t}{1 + t/c}, w \geq 2(c+t), \alpha = \frac{2a/t}{c/w}, w < 2(c+t)$
	$\sigma_{ref} = \frac{P_b + \sqrt{P_b^2 + 9P_m^2 \left(1 - \alpha \right)^2}}{3 \left(1 - \alpha \right)^2}$ $\alpha = \frac{a/t}{1 + 2t/c}, w \geq c + 2t, \alpha = \frac{a/t}{c/w}, w < c + 2t$
	$\sigma_{ref} = 1, 2P_m \frac{1 - \frac{a}{t}}{t \sqrt{1 + 1,6 \left(\frac{c^2}{r_i t} \right)}} + \frac{2P_b}{3 \left(1 - \alpha \right)^2}$ $\alpha = \frac{a/t}{1 - t/c}, w \geq 2(c+t), \alpha = \frac{2ac}{\pi r_i}, w < 2(c+t)$
	$\sigma_{ref} = P_m \frac{\pi - \frac{\pi a}{t} + \frac{2a}{t} \sin \frac{c}{r_i}}{\left(1 - \frac{a}{t} \right) \left(\pi - \frac{ac}{r_i t} \right)} + \frac{2P_b}{3 \left(1 - \alpha \right)^2}$ $\alpha = \frac{a/t}{1 + t/c}, \pi r_i \geq c + t, \alpha = \frac{ac}{\pi r}, \pi r_i < c + t$

Figura 4.8 – Formulas para σ_{ref} [10].

4.4.6.5. Procedimento Nível 2

O Nível 2 é caracterizado por dois métodos (2A e 2B) onde cada exige uma curva FAD e uma linha de corte, a qual é localizada no ponto $L_r = L_{rmax}$, onde:

$$L_{rmax} = \frac{S_f}{S_y} = \frac{S_y + S_u}{2S_y} \quad (4.23)$$

Para definir esta linha de corte as propriedades mínimas podem ser usadas. Fatores inerentes de segurança não estão incluídos. Avaliações são feitas com um único valor de tenacidade, o qual pode ser associado com algum rasgamento limitado. O FAD nível 2A aplica para metais de solda e de base, e para zona termicamente afetada. A curva (Figura 4.10) é mostrada com valores da linha de corte para diferentes materiais e é definida por:

$$K_r \text{ ou } \sqrt{\delta_r} = (1 - 0,14L_r^2) \left[0,3 + 0,7 \exp(-0,65L_r^6) \right], L_r \leq L_{rmax} \quad (4.24)$$

$$K_r \text{ ou } \sqrt{\delta_r} = 0, L_r > L_{rmax} = \frac{S_y + S_u}{2S_y} \quad (4.25)$$

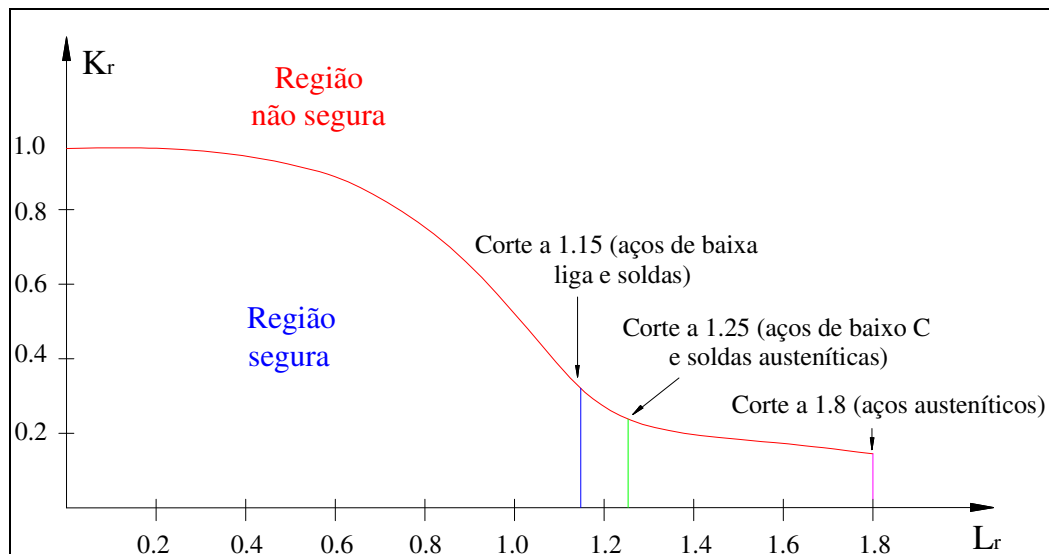


Figura 4.9 – FAD Nível 2A.

Para materiais que exibem patamar de escoamento na curva tensão-deformação o valor da linha de corte é usualmente igual a 1. FAD nível 2B se aplica apenas para metal de base e de solda, que tenham bem definidas as curvas $\sigma\epsilon$. Eles geralmente são mais precisos do que o nível 2A, mas requerem de mais

dados, pois eles usam curvas $\sigma\varepsilon$ específicas, que devem ser particularmente precisas para $\varepsilon < 1\%$. Curvas FAD nível 2B são definidas como :

$$K_r \text{ ou } \sqrt{\delta_r} = \left(\frac{E\varepsilon_{\text{ref}}}{L_r S_y} + \frac{L_r^3 S_y}{2E\varepsilon_{\text{ref}}} \right)^{-0,5}, L_r \leq L_{\text{rmax}} \quad (4.26)$$

$$K_r \text{ ou } \sqrt{\delta_r} = 0, L_r > L_{\text{rmax}} = \frac{S_y + S_u}{2S_y} \quad (4.27)$$

onde ε_{ref} é a deformação verdadeira na tensão verdadeira $\sigma_{\text{ref}} = L_r S_y$, obtida da curva uniaxial tensão×deformação do material.

A Figura 4.10 mostra um diagrama de fluxo com os passos a seguir para realizar uma avaliação de Integridade Estrutural do nível 2 segundo a BS 7910, a seguir serão descritos cada um desses passos.

- 1) **Definir Tensões:** Determinar e classificar as tensões da mesma forma que no nível 1. As tensões podem ser multiplicadas por fatores apropriados de segurança, se for necessário. As tensões residuais podem ser assumidas como não uniformes seguindo o procedimento do código, ou uniformes, como no nível 1. Neste caso,

$$Q_m = \min \left[S_y, \left(1,4 - \frac{\sigma_{\text{ref}}}{S_f} \right) S_y \right] \quad (4.28)$$

- 2) **Dados de tenacidade:** Similar ao nível 1.

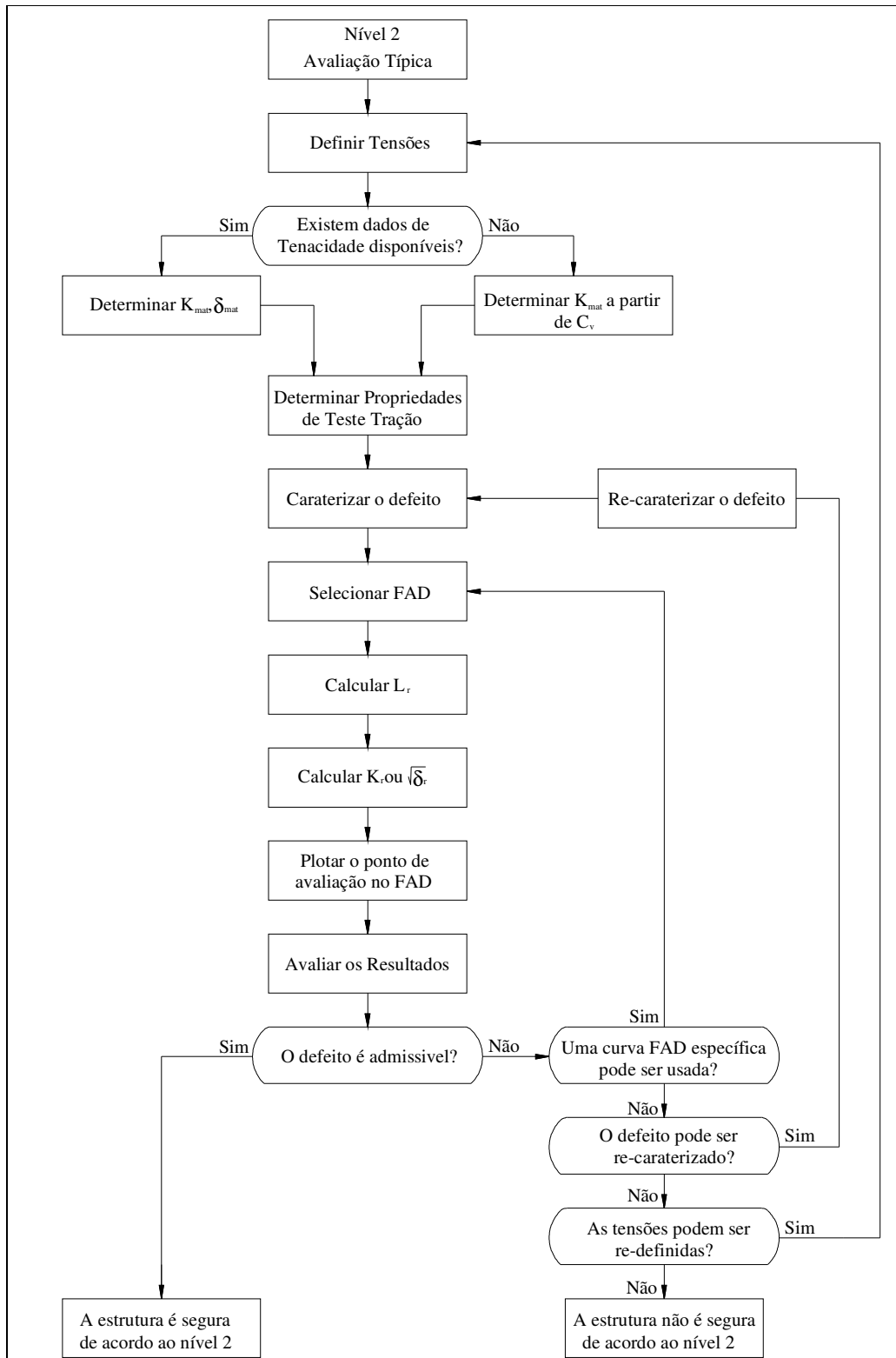


Figura 4.10 – Diagrama de fluxo Nível 2[10].

- 3) **Determinar propriedades do teste de tração:** Similar ao nível 1.
- 4) **Caracterizar o defeito:** Similar ao nível 1.

5) **Selecionar FAD:** Dependendo dos dados disponíveis e as características do material deve-se selecionar entre o diagrama FAD nível 2A ou 2B.

6) **Calcular L_r :** A razão de colapso plástico (L_r) é definida como segue:

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{S_y} \quad (4.29)$$

7) **Calcular K_r ou $\sqrt{\delta_r}$:** A razão de intensidade K_r é definida da mesma forma que para o nível 1

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} \quad (4.30)$$

Isto é sem considerar as tensões secundárias. Quando estas são levadas em conta, um fator de correção adicional de plasticidade ρ é especificado para as tensões secundárias, e a equação é modificada da seguinte forma:

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} + \rho \quad (4.31)$$

$$\delta_I = \frac{K_I^2}{XS_y E'} \quad (4.32)$$

O procedimento para a determinação do fator de correção de plasticidade (ρ) é indicado no anexo R da norma e X é um fator influenciado pela ponta da trinca. Assim o valor de $\sqrt{\delta_r}$ é calculado da mesma forma que no nível 1:

$$\sqrt{\delta_r} = \sqrt{\frac{\delta_I}{\delta_{mat}}} \quad (4.33)$$

Quando tensões secundárias são consideradas a expressão é a seguinte :

$$\sqrt{\delta_r} = \sqrt{\frac{\delta_I}{\delta_{mat}} + \rho} \quad (4.34)$$

O fator de intensidade de tensões é também calculado da seguinte forma:

$$K_I = (Y\sigma) \sqrt{\pi a} \quad (4.35)$$

$$(Y\sigma) = (Y\sigma)_p + (Y\sigma)_s \quad (4.36)$$

onde $(Y\sigma)$ é a tensão atuante e $(Y\sigma)_p$ e $(Y\sigma)_s$ as suas componentes primaria e secundaria.

$$(Y\sigma)_p = M f_w \left[k_{tm} M_{km} M_m P_m + k_{tb} M_{kb} M_b \{ P_b + (k_m - 1) P_m \} \right] \quad (4.37)$$

$$(Y\sigma)_s = M_m Q_m + M_b Q_b \quad (4.38)$$

onde f_w é o fator de correção para largura finita do componente; k_m é o fator de concentração de tensão devido a desalinhamentos; k_t , e k_{tb} são os fatores de concentração de tensão devido às tensões de desalinhamento de membrana e flexão; M é o fator de correção para curvatura; M_m e M_b são os fatores geométricos para as tensões de membrana e flexão; M_{km} e M_{kb} são os fatores de concentração de tensão na margem da solda aplicado à tensão de membrana e de flexão; P_m e Q_m são as componentes de membrana da tensão primária e secundária; e P_b e Q_b são as componentes de flexão da tensão primária e secundária. Todos estes fatores estão listados para diversas geometrias.

- 8) **Plotar o ponto de avaliação no FAD:** Plotar o ponto de avaliação, coordenadas (L_r ; K_r ou $\sqrt{\delta_r}$) no diagrama FAD 2A ou 2B.
- 9) **Avaliar os Resultados:** Se o ponto de avaliação encontra-se abaixo da curva e a esquerda da linha de corte que define o limite de carregamento, então o defeito é aceito pelo nível 2. Caso contrario, o defeito não é aceito e as seguintes ações poderão ser tomadas:
 - Se a avaliação foi feita considerando o nível 2A, utilizar um FAD específico para o material do componente e repetir o procedimento
 - Recaracterizar o defeito e repetir o procedimento
 - Redefinir as tensões e repetir o procedimento
 - Reparar o componente

Se depois de aplicar uma ou várias destas ações ainda o defeito não é aceito pelo nível 2, recomenda-se avaliação pelo nível 3.

4.4.6.6. Procedimento Nível 3

O Nível 3 é apropriado para materiais dúcteis e materiais que falham depois de uma significativa propagação estável. Mas pode também ser aplicado para

outros materiais, desde que os dados de tenacidade sejam obtidos de espécimes de restrição adequada. Uma vez que nenhum fator de segurança inerente é incluído, coeficientes parciais de segurança podem ser aplicados, se for necessário. Níveis 3A e 3B são essencialmente iguais aos níveis 2A e 2B respectivamente, exceto que eles usam as curvas de resistência J_R ou δ_R para determinar K_{mat} ou δ_{mat} . O código diz explicitamente que tal FAD representa aplicações com uma alta restrição estrutural (deformação plana dominante). Quando a tenacidade é medida usando os procedimentos padronizados, é possível modificar o FAD para tomar em conta mais baixas restrições, ou é possível utilizar um FAD de alta restrição e contar com estruturas de baixa restrição usando geometrias apropriadas nos testes para medir K_{mat} .

Para o nível 3C, um FAD específico para uma geometria e material em particular é obtido pela determinação da integral J, usando análises elásticas e elastoplásticas para a estrutura defeituosa. A Figura 4.11 mostra um diagrama de fluxo com os passos a seguir para realizar uma AIE do nível 3 segundo a BS 7910, a seguir serão descritos cada um desses passos.

- 1) **Definir Tensões:** Os procedimentos para definir e calcular as tensões são idênticos aos do nível 2
- 2) **Dados de Tenacidade:** Os valores de tenacidade à fratura são definidos em função da extensão da trinca Δa , e a curva de resistência deve ser desenvolvida de acordo com os requerimentos da norma BS 7448-4. Quando o método de espécime único é usado, ao menos 3 testes idênticos deverão ser realizados, e a menor das curvas deverá ser considerada. Se o método de múltiplos espécimes é usado ao menos 6 espécimes deverão ser testados. Para aumentar a confiabilidade, um maior número de espécimes pode ser testado em ambos casos. O plano da trinca e da propagação deverão ser consistentes com os da estrutura. Considerações a respeito da espessura do CP em relação à espessura do componente devem ser levadas em conta.
- 3) **Determinar propriedades do teste de tração:** Similar ao nível 2.
- 4) **Caraterizar o defeito:** Similar ao nível 2.

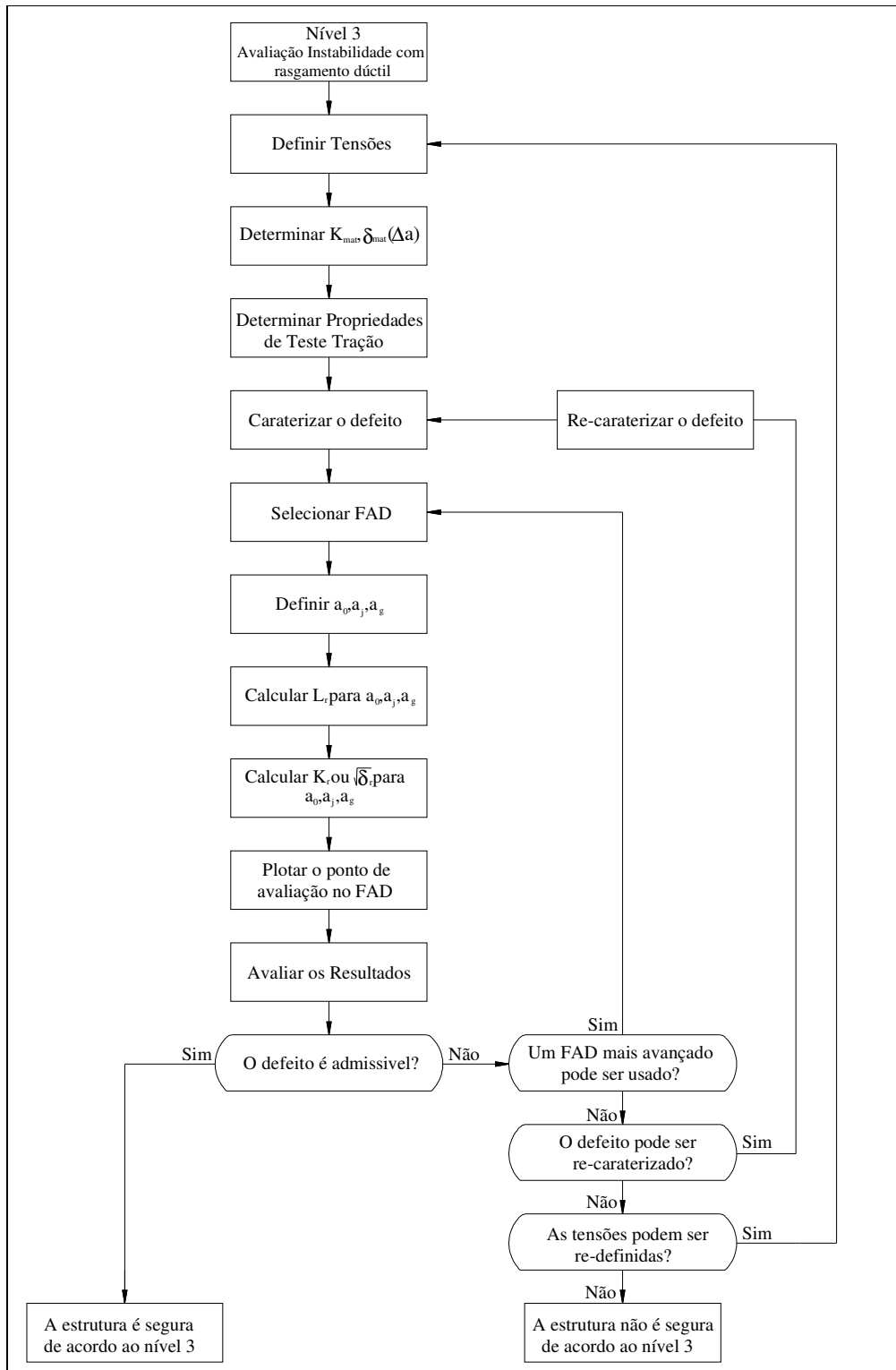


Figura 4.11 – Diagrama de fluxo Nível 3 [10] .

- 5) **Selecionar FAD:** Dependendo dos dados disponíveis e as características do material deve-se selecionar entre o diagrama FAD nível 3A ou 3B ou 3C.

6) **Definir a_0 , a_j , a_g :** Medir o comprimento inicial da trinca a_0 , o tamanho intermediário da propagação estável da trinca a_j , e o limite de propagação estável a_g . Δa_g é o limite de propagação estável dentro do qual a análise é desenvolvida, e é definido como se segue:

- Para CPs de espessura igual ao componente, é o limite dos dados experimentais.
- Para CPs mais finos que o componente, é o limite de validação de J para uma geometria de CP em particular.

7) **Calcular L_r , K_r ou $\sqrt{\delta_r}$ para a_0, a_j, a_g :** As propriedades de tenacidade K_{mat} e δ_{mat} são definidas e calculadas segundo o passo 2 e em função do avanço da trinca Δa , entre Δa_0 e Δa_g .

- Se $\Delta a_g < 1\text{mm}$ então calcular L_r da mesma forma que no nível 2 e K_r ou δ_r são calculados usando as expressões :

$$K_r = \frac{K_l}{K_g} + \rho \quad (4.39)$$

$$\sqrt{\delta_r} = \sqrt{\frac{\delta_l}{\delta_g}} + \rho \quad (4.40)$$

onde K_g e δ_g são os valores de K_{mat} e δ_{mat} referentes a Δa_g , K_l , δ_l e σ_{ref} são determinados no tamanho de defeito $a = a_0 + \Delta a_g$, incluindo fatores de segurança apropriados da mesma forma que no nível 2.

- Se $1\text{mm} < \Delta a_g < 5\text{mm}$, então definir intervalos de extensão de trinca (Δa_g) como $\Delta a_0 = 0$, $\Delta a_1 = 1\text{mm}$, $\Delta a_2 = 2\text{mm}$, etc.

Se $\Delta a_g > 5\text{mm}$ então definir intervalos de extensão de trinca (Δa_g) como $\Delta a_0 = 0$, $\Delta a_1 = 1\text{mm}$, $\Delta a_2 = 0,2\Delta a_g$, $\Delta a_3 = 0,4\Delta a_g$, etc. K_l e δ_l , K_{mat} , δ_{mat} e σ_{ref} são determinados no tamanho de defeito $a = a_0$, $a_0 + \Delta a_1$, $a_0 + \Delta a_2$, etc.

8) **Plotar o ponto de avaliação no FAD:** Plotar as coordenadas L_{ri} e K_{ri} ou $\sqrt{\delta_{ri}}$ no diagrama FAD, como mostrado na Figura 4.12.

9) **Avaliar os Resultados:** Se o lugar geométrico dos pontos em avaliação encontra-se completamente fora da linha de avaliação do FAD, o defeito não é aceito. Se algum ponto cruza a linha, uma propagação estável pode ocorrer, está é prevista para estabilizar e o defeito é aceito.

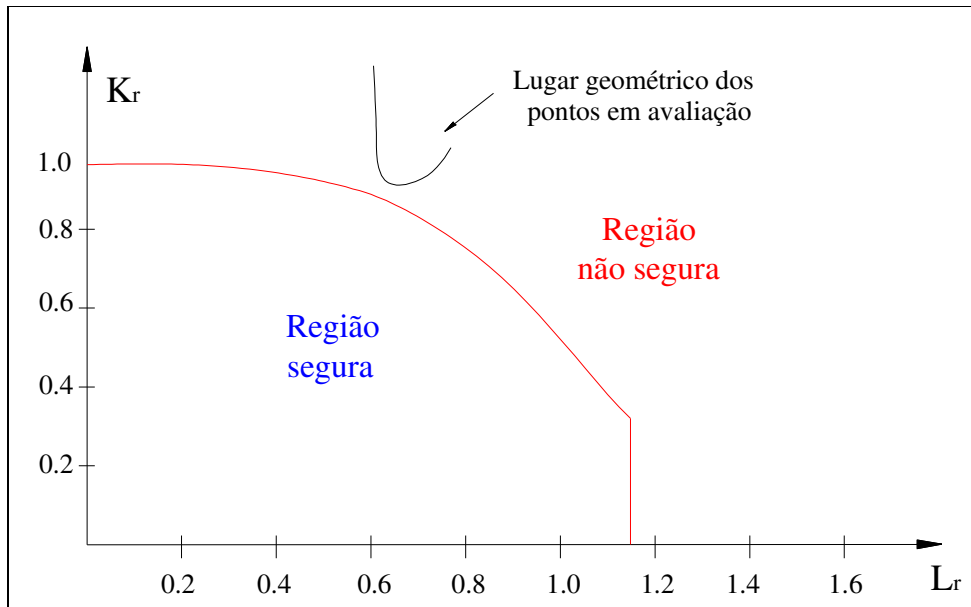


Figura 4.12 –Lugar geométrico no Nível 3.