

1 Introdução

Este trabalho trata da influência da tensão nominal no tamanho da zona plástica em volta das pontas das trincas de fadiga, que é desprezada nas estimativas tradicionais do tamanho da zona plástica. Para resolver este problema, são propostas novas soluções para mapear as fronteiras das zonas plásticas partindo dos campos de tensão exatos de Inglis e de Westergaard.

As trincas (também chamadas de fissuras, rachaduras, fendas ou frestas) são muito comuns em estruturas, e podem ser geradas por vários tipos de mecanismos como:

- Defeitos gerados durante a fabricação do material devido a diferentes causas, tais como falta de caldeamento na laminação ou no forjamento, vazios e inclusões alongadas, têmpera brusca, etc.
- Fabricação ou montagem da peça, tais como soldas defeituosas ou de penetração incompleta, tensões residuais excessivas geradas por soldagem ou tratamento térmico, aperto ou interferência severa demais na montagem, etc.
- Dano por sobrecargas, fadiga, desgaste, corrosão, etc.
- Características operacionais, como no caso do concreto que é tão frágil que várias normas de projeto assumem que a parte tracionada das estruturas sempre trinca, e consideram que toda a carga trativa é resistida apenas pela armadura.

As trincas são defeitos estruturais particularmente danosos porque podem (e devem) ser idealizadas como entalhes muito afiados, cujo raio de ponta tende a zero, fazendo que a tensão se modelada como linear elástica tenda para infinito na raiz da trinca. Mas mesmo as estruturas trincadas mais frágeis (como o vidro) têm resistência residual (toleram tensão nominal maior que zero). Portanto, a análise de tensões linear elástica tradicional não pode ser aplicada às peças trincadas, pois sob qualquer tensão nominal maior que zero, a tensão na ponta da trinca ideal,

com um raio que tende a zero, é singular, a tensão tende ao infinito. Por isto não pode ser comparada às resistências do material (S_E e S_{ut}).

Como as tensões na ponta da trinca são muito elevadas, devido ao seu alto fator concentrador de tensão, quando se solicita uma peça trincada uma região muito próxima à ponta da trinca escoava e a ponta é cegada. Esta região é conhecida com o nome de zona plástica.

O efeito estrutural das trincas tem que ser tratado por uma mecânica própria, que é chamada mecânica da fratura. Como a segurança das estruturas trincadas decresce à medida que as trincas crescem durante a sua vida, os objetivos da mecânica da fratura são quantificar (Castro & Meggiolaro, 2002):

1. A maior carga que uma estrutura trincada pode suportar em serviço (a carga crítica da estrutura).
2. A maior trinca tolerada por uma estrutura em serviço (o tamanho crítico da trinca).
3. A taxa de propagação de trincas e a vida residual das estruturas trincadas sob cargas reais de serviço.

Quando a zona plástica frente à ponta da trinca é suficientemente pequena, há uma região fora desta onde as equações lineares elásticas ainda podem ser aplicadas. Nesta região há predominância do fator de intensidade de tensões K , e pode-se dizer que o campo de tensões é controlado por K .

A existência desta região é necessária para que a Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) possa ser aplicável. O K -campo rodeia e controla o comportamento da zona plástica e a área em torno da ponta da trinca. Desta maneira, K continua caracterizando a severidade do dano induzido pela trinca, apesar de ocorrer um limitado escoamento na sua ponta. Todavia, quando a zona plástica é muito grande, o campo de tensões não é controlado por K . A Figura 1.1 mostra algumas grandes estruturas onde a MFLE pode ter muita aplicação.

Como um assunto prático, para garantir a dominância de K é necessário que a zona plástica na ponta da trinca seja pequena em comparação às outras medidas da peça, tais como tamanho do ligamento residual, largura da peça e comprimento da trinca (ver Figura 1.2). **O uso de boas estimativas do tamanho da zona plástica garante a possibilidade de aplicação da MFLE** (Dowling, 1999).



Figura 1.1 - Diferentes estruturas onde a MFLE pode ter muita aplicação.

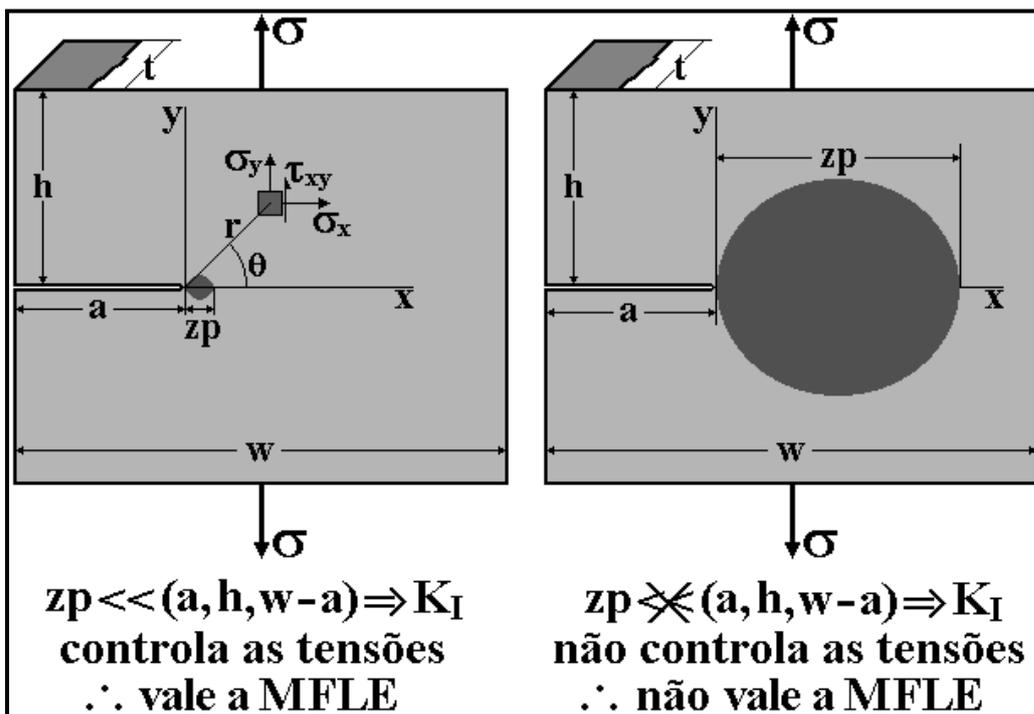


Figura 1.2 - Validação das previsões da MFLE. (Castro & Meggiolaro 2002).

1.1. Falhas por fadiga do material

Fadiga é o tipo de falha mecânica que é caracterizada pela geração e/ou pela propagação paulatina de uma trinca, causada primariamente pela aplicação repetida de cargas variáveis. A trinca é gerada pela gama das deformações $\Delta \varepsilon$ ou das tensões $\Delta \sigma$ atuantes no ponto crítico da peça, mas a propagação da trinca em

geral é perpendicular à máxima tensão normal trativa e é controlada por ΔK , a gama do fator de intensidade de tensões, que descreve a magnitude do campo de tensões em torno da trinca (Castro & Meggiolaro, 2002).

Fadiga é uma causa comum de falha causada pelo carregamento repetitivo, em geral uma ou mais trincas começam no material, e estas crescem até que a falha completa ocorra (Dowling, 1999).

Como se pode ver na Figura 1.3, o trem direito de aterrissagem de um avião fraturou fragilmente devido à presença de uma trinca iniciada e propagada por fadiga, que não foi detectada a tempo. Por ser o material pouco tolerante aos pequenos defeitos tais como trincas de fadiga, esta atingiu seu tamanho crítico rapidamente antes de ser achada pelo pessoal que faz inspeção.



Figura 1.3 - Falha por fadiga no trem de aterrissagem de um avião. (Reporte de acidente de avião No: EW/C2001/5/1).

Está bem estabelecido que o processo de iniciação de uma trinca por fadiga é muito sensível ao estado superficial da peça. A vida à fadiga é muito influenciada por fatores como o acabamento superficial e o tratamento térmico superficial, entre outros. A razão desta sensibilidade é que a trinca de fadiga quase sempre é iniciada na superfície do material ciclicamente carregado. A iniciação e todo o processo de fadiga do material são controlados pela deformação cíclica. Portanto é esperado que a trinca inicie em uma posição onde a deformação plástica cíclica é maior que a média, isto quer dizer em lugares onde haja concentração de deformação plástica; estes concentradores de deformação plástica são associados aos concentradores de tensões (Klesnil & Lukás, 1992).

Em fadiga, em geral as trincas crescem perpendiculares à maior gama de tensão trativa sob plasticidade cíclica localizada, a qual pode ser bem descrita pela MFLE. A taxa de propagação das trincas $\frac{da}{dN}$ é controlada primariamente pela gama do fator de intensidade de tensões em modo I, ΔK_I .

Foi Paris quem primeiro propôs (em 1961) que a taxa de propagação das trincas por fadiga dependia da gama do fator de intensidade de tensões ΔK , e pouco depois demonstrou que é ΔK (e não a gama das tensões $\Delta\sigma$) o parâmetro que controla $\frac{da}{dN}$. Logo, Paris propõe uma relação parabólica entre $\frac{da}{dN}$ e ΔK , chamada de regra de Paris, para prever a curva de propagação do material:

$$\frac{da}{dN} = A \cdot \Delta K^m, \quad (1.1)$$

onde A e m são propriedades do material, que devem ser medidas em testes de propagação de trincas por fadiga. O método $\frac{da}{dN}$ de projeto à fadiga é usado para prever a vida residual de peças trincadas a partir da integração da curva de propagação:

$$N = \int \frac{da}{A \cdot \Delta K^m}. \quad (1.2)$$

Como é bem sabido, a regra de Paris tem uma série de limitações importantes, pois ela não reconhece os efeitos de carga média, de limiar de propagação ΔK_{th} , de sobrecargas e de muitos outros mais. Por isto, várias outras regras foram propostas para melhor descrever a forma da curva $\frac{da}{dN} \times \Delta K$ e os efeitos de ΔK_{th} , da carga de abertura K_{ab} e de carga média entre outros.

Todas estas regras podem ser chamadas de fenomenológicas, pois são úteis para ajustar as curvas $\frac{da}{dN} \times \Delta K$, não para prever seu comportamento. Apesar disso, elas têm grande importância prática, pois a previsão da vida residual das estruturas trincadas, que é o objetivo daquelas curvas, depende da sua precisão; mas as regras tradicionais em geral não ajustam bem o comportamento completo das curvas $\frac{da}{dN} \times \Delta K$, logo não se pode esperar uma boa precisão das previsões de vida residual a fadigas feitas a partir de sua integração (Castro & Meggiolaro, 2002).

1.2. Modelo do Dano Crítico para a propagação de trincas por fadiga

O espaçamento entre estrias geradas sob ΔK constante nas faces das trincas de fadiga durante a fase de propagação estável é quase uniforme, indicando que elas crescem por incrementos aproximadamente iguais ao longo da frente da trinca a cada ciclo de carga, num processo contínuo e repetitivo. Assim, é razoável modelar a propagação das trincas por fadiga usando uma mecânica macroscópica e contínua, supondo que ela é causada pelo dano acumulado pelas deformações cíclicas que atuam à frente de suas pontas a cada reversão das cargas de fadiga.

O versátil modelo do dano crítico assume que a trinca cresce pela fratura sucessiva, a cada ciclo da carga, de pequenos corpos de prova tipo ϵN (ou elementos de volume EV), fixos no plano que será cortado pelo avanço da trinca, como pode ser visto na Figura 1.4. O dano causado pela deformação cíclica pode ser calculado a partir de parâmetros ϵN , os conceitos de iniciação de trincas por fadiga do modelo ϵN podem ser usados para prever a taxa de propagação das trincas por fadiga com um modelo **livre de parâmetros ajustáveis**.

A deformação produzida em cada elemento de volume situado ao longo da frente da trinca depende da distância que há desde a ponta da trinca até o pequeno elemento de volume, e deve ser calculada a partir de um raio de ponta finito para não prever dano infinito muito perto da ponta da trinca, como é previsto pelos modelos tradicionais singulares.

Em realidade, o dano total acumulado por cada elemento de volume não só depende da distância deste até a ponta da trinca, também depende do tamanho da zona plástica que sempre acompanha as trincas de fadiga (ver Figura 1.5), e onde acontece a maior parte do dano.

Este modelo de propagação de trincas por fadiga assume que o dano acumulado fora da zona plástica cíclica é desprezível e supõe que sob ΔK constante a trinca avança uma distância constante δa (o comprimento de um pequeno elemento de volume situado à frente da ponta da trinca) por ciclo.

Como a zona plástica à frente da ponta da trinca avança à medida que a trinca propaga, em cada ciclo de carga o elemento de volume que está à frente da ponta da trinca é quebrado e a ponta avança uma distância igual ao comprimento do elemento de volume. Quando a trinca avança, a amplitude da deformação cíclica em cada elemento de volume à frente da ponta da trinca aumenta, portanto

a intensidade do dano em cada um destes aumenta também, e um pequeno elemento de volume é adicionado à zona plástica, isto é, à zona de acumulo de dano.

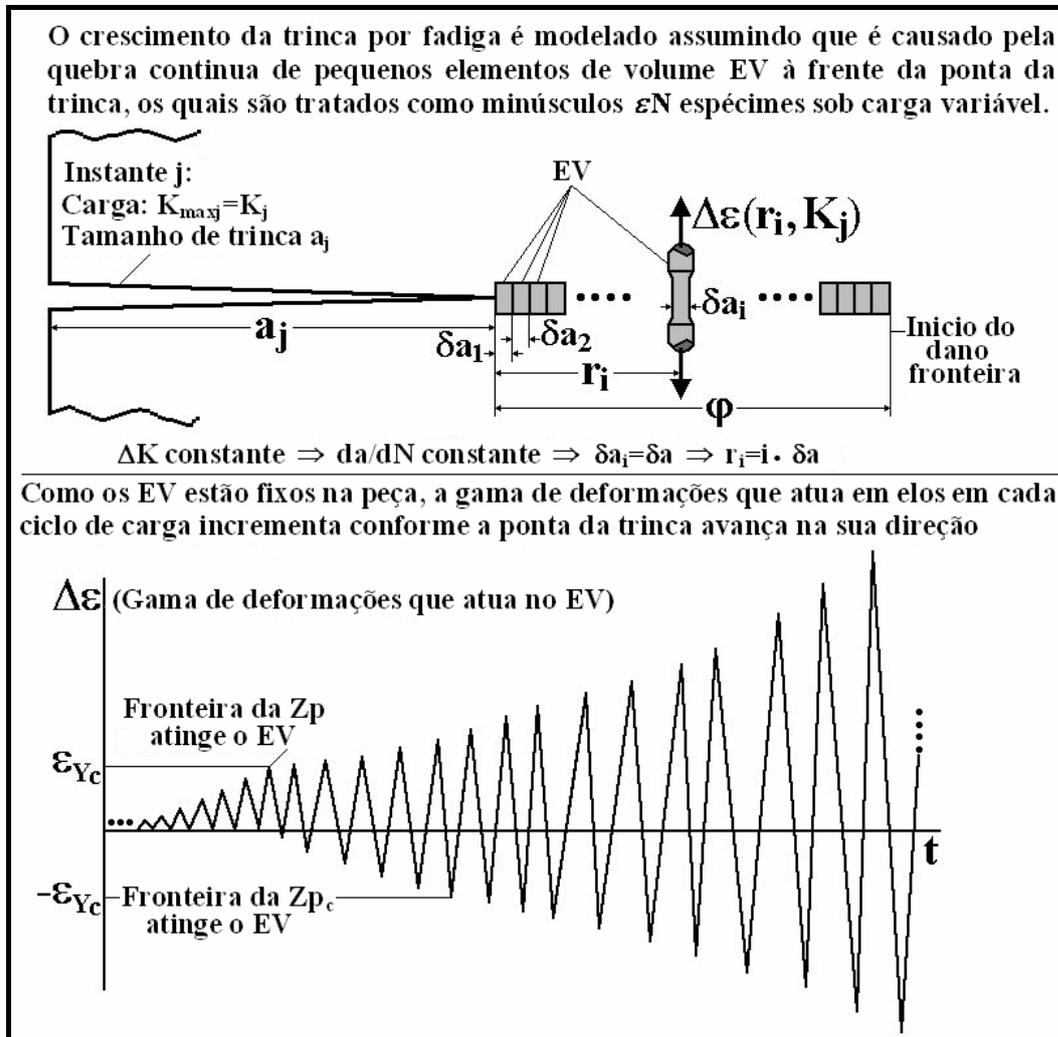


Figura 1.4 - Esquema do modelo de dano crítico. (Castro & Meggiolaro 2002).

Fica claro que a estimativa da taxa de propagação das trincas de fadiga que o modelo de Dano Crítico pode fazer depende da estimativa da zona plástica que o modelo usar. Uma boa estimativa da zona plástica que acompanha todas as trincas de fadiga em seu caminho é necessária para se ter bons resultados neste modelo (Castro & Meggiolaro, 2002).

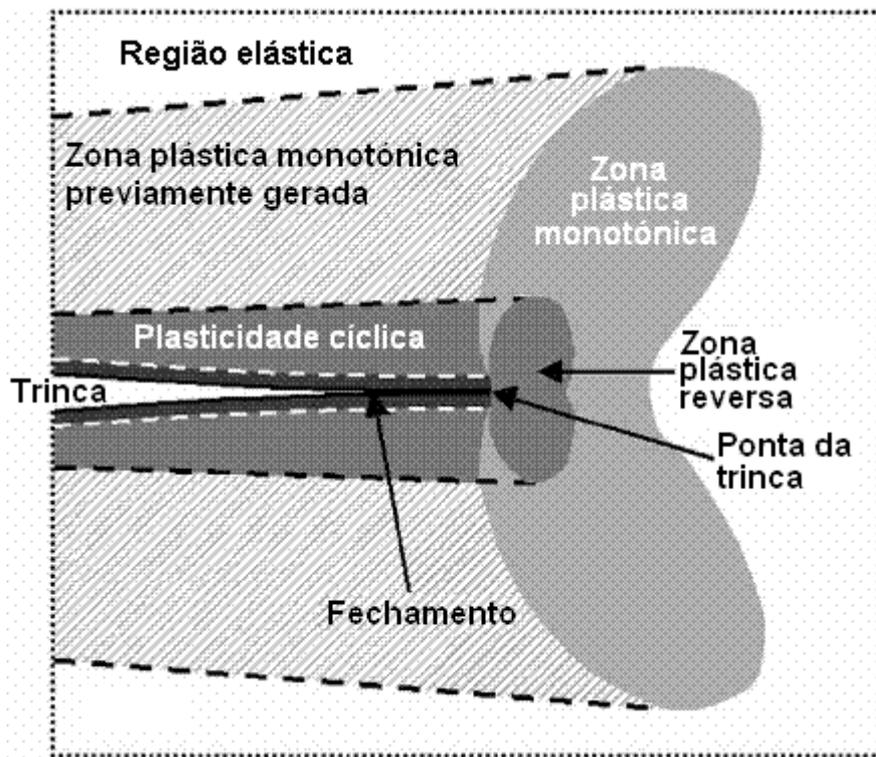


Figura 1.5 - Zona plástica à frente da ponta da trinca. (Castro & Meggiolaro 2002).

1.3. Objetivos da Dissertação

Estimativas da zona plástica, feitas a partir de soluções lineares elásticas tradicionais do campo próximo à ponta da trinca, não levam em consideração o efeito não desprezível da tensão nominal. De fato, supor que a ZP só depende do fator de intensidade de tensões K não basta para reproduzir as condições de contorno da peça.

1. O primeiro objetivo deste trabalho é demonstrar que a tensão nominal tem uma grande influência no tamanho e forma da zona plástica em torno da ponta da trinca, e não pode ser desprezada na prática.
2. O segundo objetivo do trabalho é obter melhores estimativas da zona plástica à frente da ponta da trinca a partir de soluções que reproduzam as condições de contorno da peça.
3. O terceiro objetivo é mapear a fronteira da zona plástica garantindo o equilíbrio das forças atuantes na peça.

1.4. Descrição da Dissertação

O presente trabalho é composto por seis capítulos. O primeiro capítulo refere-se à introdução e à apresentação dos objetivos da dissertação.

No capítulo dois são vistos os principais conceitos que regem os fundamentos da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE). Começando com o estudo das tensões na ponta dos entalhes, apresenta-se a solução de Inglis para o campo de tensões linear elástico numa placa infinita com um furo elíptico. Em seguida introduz-se a solução de Williams para o campo linear elástico de tensões em torno de uma trinca, e a solução completa de Westergaard para uma placa infinita com uma trinca central. Por fim discute-se a correção de Irwin para equilibrar as tensões na placa trincada devido à plastificação do material dentro da zona plástica.

No capítulo três são apresentadas as zonas plásticas em volta da ponta da trinca estimadas a partir das soluções de Williams, Inglis e Westergaard; e desenvolvidas as equações que permitem mapeá-las. Além disso, é proposta uma

modificação da solução de Williams para forçá-la a cumprir as condições de contorno.

As zonas plásticas mapeadas tendo em consideração a redistribuição das tensões, devido a escoamento do material dentro da zona plástica na ponta da trinca, são apresentadas no Capítulo quatro.

As principais conclusões, recomendações e contribuições originais deste trabalho são apresentadas no Capítulo cinco.

No Capítulo seis são listadas as referências usadas ao longo do trabalho.