

1 Introdução

Este trabalho trata da simulação numérica, com verificação experimental, do processo de trincamento de componentes estruturais bi-dimensionais (2D) por fadiga sob cargas de amplitude variável. As palavras-chave dos assuntos aqui estudados são propagação de trincas por fadiga, carregamento cíclico variável e geometria 2D complexa.

De acordo com Castro & Meggiolaro (2002), “Fadiga é um tipo de falha mecânica causada primeiramente pela aplicação repetida de carregamentos variáveis, cuja característica principal é causar a geração e/ou a propagação paulatina de uma trinca, até a eventual fratura da peça. Fadiga é um problema local, que depende muito dos detalhes da geometria e do material do ponto mais solicitado da peça e da carga lá atuante, e que gera falhas localizadas, progressivas e cumulativas”. O evento terminal da propagação de trincas por fadiga é a fratura, ruptura ou quebra de uma estrutura em duas ou mais partes, quando ela atinge a carga máxima que pode suportar.

O estudo da propagação de trincas por fadiga é multidisciplinar, mas como este trabalho trata da modelagem deste problema, nele serão enfatizados os conceitos da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE). Isto porque maior parte da propagação das trincas por fadiga quase sempre ocorre sob domínio da MFLE, mesmo quando a fratura final ocorre sob grande plasticidade. A Figura 1.1 mostra algumas estruturas de grande porte onde a MFLE tem grande aplicação.

Carregamentos cíclicos variáveis são as cargas de serviço que ao longo do tempo tem variações de amplitude não desprezíveis. A Figura 1.2 mostra um exemplo de um carregamento variável numa peça aeronáutica (Divenah & Beaufils). Esse carregamento pode estar representando o avião taxiando, decolando, voando e aterrissando. Essa forma de carregamento se repete durante a vida útil do avião, e pode gerar e propagar uma trinca por fadiga. A Figura 1.3 mostra o crescimento inicial de uma trinca à medida que o número de ciclos de carga aplicados cresce. As conseqüências dessa propagação podem resultar em

acidentes como o da Figura 1.4, que mostra um avião que perdeu o teto durante o voo devido a uma falha por fadiga (após cerca de 32 mil decolagens bem sucedidas).



Figura 1.1 – Estruturas de grande porte onde a Mecânica da Fratura Linear Elástica pode ser usada para prever a vida de propagação de uma trinca por fadiga.

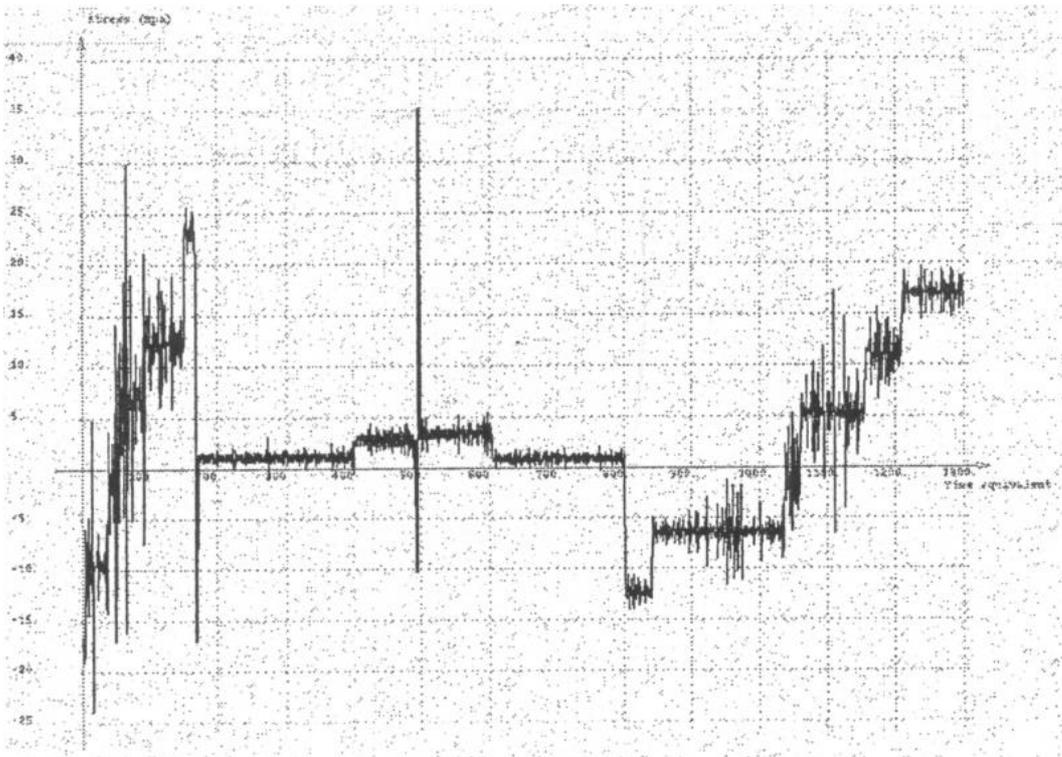


Figura 1.2 – Carregamento variável atuante em uma peça de avião durante um voo.

Por fim, deve-se mencionar o problema da geometria 2D complexa. Segundo a MFLE, as taxas de propagação das trincas por fadiga dependem

primariamente da gama do fator de intensidade de tensões atuante. Existem manuais e tabelas a literatura que tem expressões desse fator para diversas geometrias 2D e 3D (Tada, 1985; Murakami, 1987; Rooke, 1976). Porém essas geometrias estão limitadas a placas, cilindros, discos, tripas e corpos de prova normalizados. Neste contexto, uma geometria é 2D quando possa ser analisada adequadamente por um modelo bidimensional, e é complexa quando não se encontra catalogada.

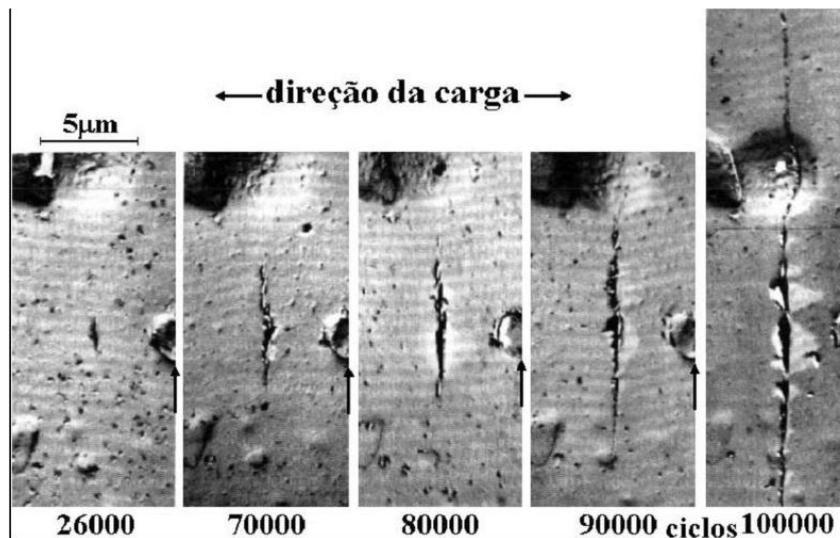


Figura 1.3 – Crescimento paulatino de uma pequena trinca por fadiga.



Figura 1.4 – Acidente de um avião causado pela propagação uma trinca por fadiga.

A MFLE resolve o problema do carregamento cíclico variável de forma consistente por uma aproximação local baseada na integração da regra de propagação da trinca. Assim, o crescimento da trinca a cada ciclo do carregamento pode ser eficientemente calculado, inclusive considerando efeitos de interação entre ciclos como retardos após sobrecargas, por exemplo. Porém, esse método requer uma expressão do fator de intensidade de tensões ao longo do caminho da trinca, que geralmente não está disponível para componentes estruturais reais. Desta forma, um engenheiro pode usar o senso comum e utilizar uma expressão aproximada, obtida de um manual, do fator de intensidade de tensão para resolver o problema real. Mas o erro envolvido nessa aproximação pode ser muito grande quando a trinca idealizada não representar adequadamente a trinca real.

1.1 Métodos dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (EF) é um método numérico largamente utilizado para simular algumas classes de problemas de engenharia, em que a solução analítica é desconhecida ou difícil de se obter. Juntamente com a utilização dos computadores pessoais, o método tornou-se um dos mais utilizados nos dias de hoje. O método permite, por exemplo, o estudo de deslocamentos e tensões em peças mecânicas, barragens, minas, bem como a determinação de fluxo de calor, pressão neutra e muitas outras análises. Basicamente, esses tipos de análise têm em comum o fato de que se baseiam na solução de um problema para o qual são estabelecidas equações diferenciais parciais relacionando variáveis de campo fundamentais dentro de um determinado domínio, e satisfazendo condições de restrições para essas variáveis fundamentais e suas derivadas na fronteira do domínio. De uma maneira geral, pode-se dizer que a idéia central do método é subdividir o domínio em pequenas regiões (elementos) onde o comportamento do campo possa ser aproximado por polinômios ou por funções harmônicas. Essas funções são expressas com base em valores do campo nos vértices (nós) dos elementos; esses valores, as incógnitas do problema discreto, são determinados através da minimização de um funcional associado à equação diferencial.

Assim como em outras áreas, a Mecânica da Fratura Linear Elástica também usa as facilidades numéricas do método dos elementos finitos. Elementos especiais foram criados para que a trinca fosse adequadamente representada de modo a obter resultados sobre o principal parâmetro que a rege, o fator de intensidade de tensões. De posse desse parâmetro, pode-se estimar a direção do crescimento incremental da trinca e fazer uma análise de sua propagação, utilizando um processo passo-a-passo. A vantagem do método dos elementos finitos em análises de fraturamento é viabilizar a modelagem de geometrias complexas onde o fator de intensidade de tensão é desconhecido na literatura.

Apesar de todas as facilidades, o método dos elementos finitos apresenta limitações quando se deseja fazer uma análise à fadiga de um componente estrutural, submetido a uma história de carregamento variável, como apresentado na Figura 1.2. O número de ciclos do carregamento pode ser muito grande, dependendo do problema. Nestes casos é preciso resolver o problema numérico tantas vezes quanto forem o número de ciclos aplicados, mas o tempo requerido para fazer tais cálculos seria inaceitavelmente grande. Existem métodos estatísticos para representar a história de carregamento de um modo simplificado, porém esses métodos não preservam a ordem da aplicação de carga e não podem prever retardos ou outros efeitos de seqüência, que podem ser muito importantes na prática.

1.2 **Objetivos da Tese**

Pode-se resolver eficientemente o problema da propagação de trincas por fadiga sob carregamentos cíclicos variáveis integrando localmente a regra de propagação do material. Mas este método requer a expressão do fator de intensidade de tensões da geometria em questão, que em geral não está catalogada. Pode-se calcular essa expressão de modo eficiente por EF, mas apenas quando o carregamentos é simples. Desta forma, estes dois métodos são complementares.

Um dos objetivos deste trabalho é unir as vantagens dos dois métodos. Primeiro calcula-se o caminho da trinca (que em geral é curvo) e o fator de intensidade de tensão ao longo de seu comprimento em geometrias 2D complexas

por EF. Uma expressão analítica em seguida é ajustada para descrever o fator de intensidade de tensão ao longo do comprimento da trinca, a qual é usada como dado de entrada num programa que resolve o problema de fadiga por uma aproximação local, tratando dos carregamentos cíclicos variáveis pela integração direta da regra de propagação, se necessário considerando efeitos de retardo causados por sobrecarga, por exemplo.

O segundo objetivo do trabalho é verificar experimentalmente a metodologia numérica proposta no parágrafo anterior, realizando ensaios de propagação de trincas por fadiga sob carregamentos simples e variáveis em corpos de prova com geometrias 2D complexas. Os caminhos de propagação real da trinca são comparados como os previstos via EF, utilizando um programa especialmente desenvolvido, chamado **Quebra2D**. A vida real de propagação obtida experimentalmente é comparada com as previsões numéricas feitas usando o programa chamado **ViDa**, que foi desenvolvido para prever a iniciação e a propagação de trincas por fadiga sob cargas complexas. A expressão do fator de intensidade de tensões, necessária para o programa **ViDa**, é obtida via o programa **Quebra2D**.

Embora a idéia seja simples, a sua implementação e a confirmação que essa metodologia realmente funciona requerem um esforço considerável de implementação numérica e testes em laboratório.

1.3 Organização do Trabalho

No Capítulo 2 são vistos os principais conceitos que regem os fundamentos da Mecânica da Fratura, desde as primeiras aproximações utilizadas para descrever o comportamento da trinca como entalhe, passando pelo fator de intensidade de tensão como principal parâmetro hoje utilizado, até os conceitos da mecânica da fratura elasto-plástica (integral J). Os conceitos da propagação de trincas por fadiga serão vistos nas seções seguintes. Alguns modelos empíricos ou regras de fadiga são descritos para representar essa propagação.

O Capítulo 3 descreve os métodos e critérios mais comumente utilizados para calcular fatores de intensidade de tensão e direções de propagação da trinca em geometrias arbitrárias por EF. Esse capítulo descreve também um programa

gráfico interativo, chamado **Quebra2D**, desenvolvido para simular os processos bidimensionais de fraturamento estrutural.

O Capítulo 4 descreve dois métodos de crescimento de trinca: o método DK_{rms} e o método do crescimento ciclo-a-ciclo. Observações sobre a implementação numérica desses métodos são descritas a fim de maximizar a eficiência dos cálculos. Modelos que tentam descrever efeitos de retardo são discutidos e por fim um fluxograma simplificado do cálculo da/dN no **ViDa** é apresentado.

No Capítulo 5 são descritos os passos envolvidos no uso conjunto dos programas **Quebra2D** e **ViDa** para se obter uma análise numérica completa da propagação de trincas por fadiga sob carregamentos variáveis em geometrias 2D complexas. Além disso, são apresentados dois usos adicionais do programa **Quebra2D**: a predição do caminho de trincas de fadiga bifurcadas e a obtenção de equações para medir o tamanho de trinca pelo método da variação da flexibilidade em testes de fadiga.

São apresentados exemplos de propagação de trincas que se curvam em corpos de prova que foram ensaiados em laboratório. As condições de execução dos ensaios também são descritas. Por fim, a análise numérica da propagação usando os programas é comparada com a análise experimental.

O Capítulo 6 descreve os resultados obtidos experimentalmente em laboratório e os compara com a análise numérica. Primeiro é exposta a metodologia experimental adotada em todos os ensaios. Depois são descritos os ensaios de propagação de trinca para o caso de carregamentos simples e variáveis. Por fim, são comentados alguns resultados que foram obtidos paralelamente aos ensaios de carregamento variável: deficiência dos modelos de interação de carga e bifurcação de trinca.

No Capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões e contribuições originais deste trabalho. Por final são sugeridas propostas para trabalhos futuros.

No Capítulo 8 são listados as referências usadas ao longo do trabalho.