

7 Conclusão

Uma metodologia eficiente e segura é proposta para prever a propagação de trincas de fadiga sob carregamento de amplitude variável em estruturas bidimensionais com geometria 2D complexa. Primeiro, o caminho da trinca (em geral curvo) e os fatores de intensidade de tensão $K_I(a)$ e $K_{II}(a)$ ao longo do comprimento da trinca a são calculados num programa de elementos finitos especialmente desenvolvido para este fim, chamado **Quebra2D**. Estes cálculos são feitos usando pequenos incrementos especificáveis no tamanho da trinca e técnicas de remalhamento automatizadas. Os valores de $K_I(a)$ são usados como dados de entrada num programa de previsão de vida à fadiga, o **ViDa**. Esse programa foi desenvolvido para prever a iniciação e a propagação de trincas 1D e 2D sob carregamento complexo por todos os métodos clássicos, incluindo SN , eN e IIW (estruturas soldadas) para a iniciação da trinca, e o método da/dN para a propagação. Em particular, o módulo que propaga a trinca aceita qualquer expressão de $K_I(a)$ e qualquer regra da/dN , e usa o método DK_{rms} ou CCC (crescimento ciclo-a-ciclo) para prever a propagação de trincas uni e bidimensionais sob carregamento de amplitude variável.

A análise numérica proposta foi verificada através de vários experimentos representativos, cuja metodologia experimental é discutida em detalhes.

7.1 Principais Contribuições Originais

A principal contribuição deste trabalho é a proposta de um procedimento numérico para automatizar a previsão da vida à fadiga de peças 2D trincadas utilizando os programas **Quebra2D** e **ViDa**. Primeiro, o **Quebra2D** é usado para calcular o caminho da trinca, em geral curvo, e o fator de intensidade de tensão ao longo de seu comprimento. Uma expressão analítica é ajustada para descrever o fator de intensidade de tensões ao longo comprimento da trinca, a qual é usada como um dado de entrada no **ViDa**, que ataca o problema de fadiga pela

metodologia local. Finalmente, a história do carregamento variável é eficientemente tratada pela integração direta regra de propagação, considerando os efeitos de retardo causados por sobrecargas caso necessário.

Dois outros usos eficientes e práticos do programa **Quebra2D** foram também apresentados: a predição do caminho de trincas de fadiga bifurcadas e a obtenção de equações para a medição do tamanho de trinca pelo método da variação da flexibilidade em testes de fadiga. A geração da malha EF e a modelagem das trincas bifurcadas é particularmente não trivial, pois a parte bifurcada em geral tem um tamanho muito pequeno comparado aos parâmetros geométricos da peças.

Outra parte muito importante deste trabalho foi a validação dos procedimentos numéricos através de resultados experimentais confiáveis. Usou-se CPs SENB e CTS modificados para estudar os casos de carregamentos simples e trincas curvas. Os caminhos das trincas modelados via EF em geral concordaram muito bem com os caminhos obtidos experimentalmente. Também foi mostrado que pequenas modificações na geometria do CP podem gerar caminhos muito diferentes para a trinca. As previsões numéricas e experimentais de vida a fadiga foram também comparadas, em geral com boa concordância.

Foram testados dois CPs sob carregamentos variáveis: um CTS padrão para propagar uma trinca reta e outro CTS modificado para propagar uma trinca curva. Os parâmetros de retardo de vários modelos de interação entre os ciclos de cargas complexas foram obtidos da história de propagação da trinca reta. Em seguida, esses parâmetros foram usados para prever a vida à fadiga da trinca curva, com excelentes resultados.

Entretanto, os modelos de interação entre cargas não conseguem simular por completo os resultados reais de todos os testes. Por isso, foram estudadas algumas das suas deficiências.

Por fim, um modelo alternativo é proposto para explicar os retardos de trinca. Resultados obtidos por EF mostraram que o retardo provocado por bifurcação pode ser bastante expressivo.

7.2

Principais Realizações

O programa **Quebra2D** vem sendo desenvolvido durante anos ao longo da linha de pesquisa da Computação Gráfica Aplicada da PUC/Rio-Engenharia Civil. Nele estão inseridos trabalhos sobre análise auto-adaptativa de elementos finitos (Cavalcante Neto, 1998), geração automática de malha (Miranda, 1999), calculadores de fatores de intensidade de tensão (Araújo, 1999) e estimadores da direção de propagação da trinca (Carvalho, 1998). Apesar de suas respostas estarem de acordo com resultados obtidos experimentalmente e na literatura, o programa em si não apresentava robustez e organização de código. Em vista disso, o código foi revisto para obter as seguintes melhorias:

- Organização do programa em módulos reutilizáveis e independentes. Esses módulos foram divididos em estrutura de dados da malha de elementos finitos, visualização de malha de EF, geração de malha de EF, topologia da malha, calculadores de fatores de intensidade de tensões, tipos de rosetas de ponta de trinca, estrutura de dados do modelo geométrico, visualização do modelo geométrico, interface com o usuário. A maioria desses módulos foi reescrita em programação orientada a objetos, que é uma filosofia de programação mais moderna.

- Construção de um Editor para o programa **Quebra2D**. Este programa inclui toda a interface necessária para a coleta de primitivas gráficas para a construção do modelo de elementos finitos e seus atributos, como cargas, materiais, restrições de apoio, etc.

- Substituição de uma tolerância estática por tolerâncias dinâmicas. Dentro do programa existia uma tolerância estática, um valor fixo de 10^{-6} que realizava o teste se um ponto se encontrava na mesma posição geométrica. Um tipo de tolerância como este funciona apenas para certos casos. Agora a tolerância é função do tamanho geométrico do modelo e é proporcional à menor aresta do modelo de EF ou da quadratura de tolerância da tela gráfica. Logo, assim que a malha de elementos finitos é redefinida a tolerância muda automaticamente para refletir a discretização do novo modelo. Isto permite um funcionamento mais global para uma gama maior de modelos.

– Organização do código C e Lua. O programa **Quebra2D** utiliza uma interface com usuário que é baseada na linguagem Lua (Ierusalimsky, 1996). Tudo o que se refere à interface com o usuário deveria ser programado em Lua. Porém, o programa misturava códigos de interface em linguagens C e Lua. Uma reorganização foi feita a fim de manter apenas o código Lua comandando a interface com usuário. Isto torna o código C, em parte, independente de como é construído o ambiente de interface. Apenas uma camada de comunicação é montada para os códigos interagirem.

– Filtros internos no programa. Foram inseridos filtros dentro do programa para avaliar os dados de entrada e saída. Caso um haja algum erro dos dados internos, o programa tenta fazer a correção necessária, isto é, tentar validar os dados. Por exemplo, se o laço de curvas do dado de entrada estiver trocado, o programa o coloca na posição correta.

Com relação à parte experimental, foram realizadas algumas tarefas com a finalidade de colocar o sistema em funcionamento. Isto porque, a princípio, a máquina de teste MTS não funcionava de modo estável e o sistema, como um todo, apresentava super-aquecimento do óleo. As seguintes tarefas foram realizadas :

- Troca do óleo que circula no sistema.
- Substituição e limpeza dos filtros de óleo.
- Substituição da torre de resfriamento que permite fazer o resfriamento da água que faz a troca de calor com o óleo do sistema de ensaio. Se o resfriamento não é feito de modo eficiente há super-aquecimento do óleo e por consequência o desligamento do sistema.
- Confecção de acessórios a serem utilizados no ensaio, como parafusos, extensores e tiradores de folga.
- Instalação e calibragem de uma nova célula de carga de duas toneladas para ser utilizada nos ensaios com carga baixa.

7.3

Sugestões para Trabalhos Futuros

Dentre as várias possibilidades de trabalhos futuros são sugeridos:

- Realizar alguns ensaios para verificação mais detalhada dos modelos de interação entre cargas. Esse trabalho deve avaliar a aplicabilidade e a validade dos modelos de retardo usando vários tipos de carregamentos.
- Estudo de trincas elasto-plásticas. Para esse estudo será necessário fazer algumas implementações no **Quebra2D** e, como foi feito neste trabalho, validações experimentais.
- Implementação dos procedimentos numéricos de cálculo de fatores de intensidade de tensões e direção de propagação de trincas em cascas.
- Aprofundar o estudo das trincas bifurcadas.