

1

Introdução

No âmbito da engenharia estrutural, o principal objetivo do projeto é a concepção de uma estrutura que permaneça íntegra diante das diversas ações às quais ela possa estar submetida. O uso da mecânica dos sólidos permite estimar a resistência de uma estrutura, porém a presença de trincas, entalhes e/ou inclusões na mesma altera sua capacidade de carga. Muitos acidentes de engenharia ocorreram e ainda ocorrem pela falta de um rigoroso estudo do comportamento da estrutura diante de imperfeições. Um exemplo clássico de falha estrutural em decorrência de fraturamento na estrutura foram os acidentes com os navios cargueiros produzidos pelos EUA na época da segunda guerra mundial, os *Liberty Ships*. Os navios tiveram seus cascos partidos ao meio devido à propagação de fratura (Figura 1.1). Uma ocorrência comum de falha estrutural devido a fraturas são as rupturas de vasos (reservatórios) de pressão, como apresenta a Figura 1.2.

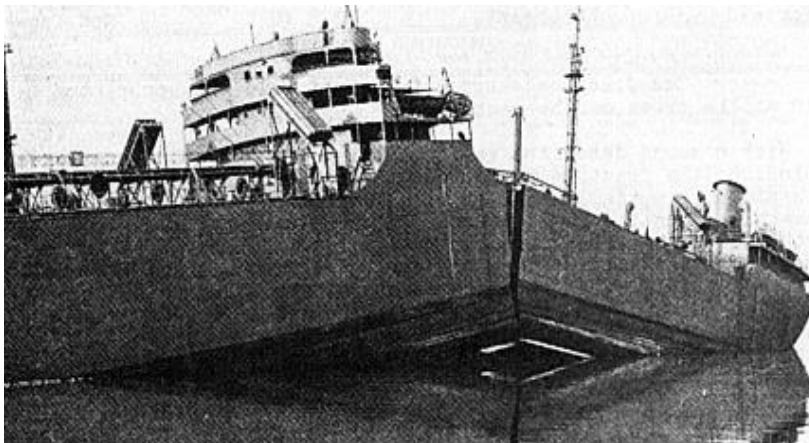


Figura 1.1 – Navio *Liberty Ship* com casco rompido ao meio devido a fraturamento.



Figura 1.2 – Fratura em vaso de pressão sob teste hídrico.

Tais acontecimentos dão importância ao conhecimento do comportamento de estruturas diante de fraturas. Um projeto com base na Mecânica da Fratura possui três importantes variáveis (Figura 1.3):

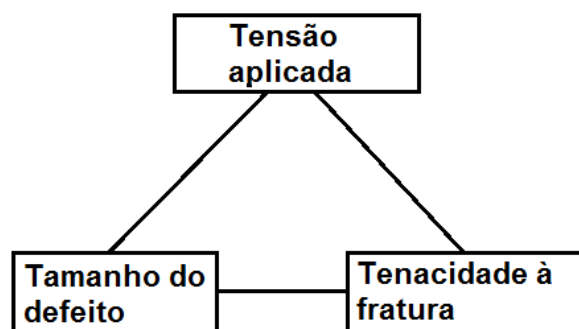


Figura 1.3 – Principais variáveis da Mecânica da Fratura (adaptada de Anderson, 2005).

Este arranjo de variáveis difere do arranjo tradicional de projeto estrutural, que é a combinação da tensão aplicada com a resistência do material, na forma que um material é tido como adequado quando sua resistência é maior que a tensão aplicada esperada. Assim, o projeto com base na MF tem o tamanho do defeito como variável adicional e a tenacidade à fratura em substituição à resistência do material. Combinações críticas das três variáveis apresentadas na Figura 1.3 são quantificadas pela MF (Anderson, 2005).

A Mecânica da Fratura surgiu para prever o comportamento de estruturas na presença de trincas. Buscava-se entender o motivo pelo qual materiais sofriam ruptura antes mesmo de atingirem suas resistências. Desde a sua formulação, a MF está presente na maioria dos projetos complexos de engenharia, o que leva à produção de diversos estudos e trabalhos. Hoje, aplicam-se os conhecimentos da MF não apenas visando a integridade da estrutura, mas também tendo outros objetivos específicos, o que acontece com o processo de fraturamento hidráulico.

Na indústria do petróleo, o processo de fraturamento hidráulico é uma técnica de estimulação de poços de petróleo para aumento da produtividade dos mesmos (Economides & Nolte, 2000; Fjaer et al., 2008). A referida técnica consiste na injeção de fluido sob alta pressão através do poço, levando ao surgimento de fraturas na rocha alvo. A Figura 1.4 mostra uma representação do fraturamento hidráulico em rochas, na área da indústria do petróleo.

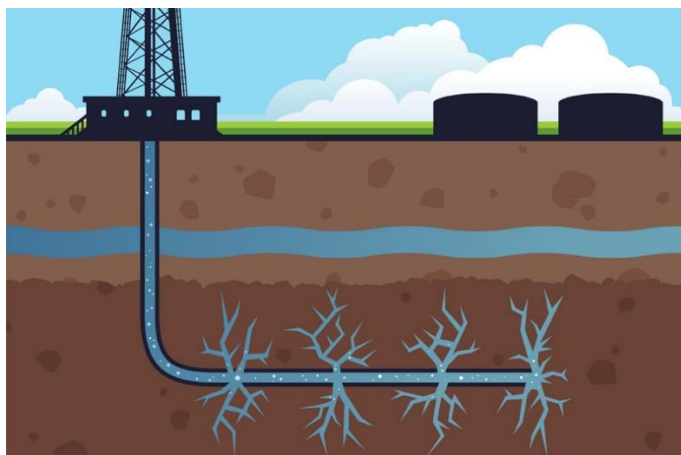


Figura 1.4 – Fraturamento hidráulico na indústria do petróleo.

Historicamente, a MF teve seu início em 1920, quando Griffith (1920) fez uma conexão quantitativa entre tensão de fratura e tamanho do defeito. O trabalho de Griffith foi aplicado a uma placa com furo elíptico anteriormente estudada por Inglis (1913). O estudo de Inglis foi realizado sete anos antes, em 1913. Ele havia quantificado os efeitos da concentração de tensão no furo elíptico, mas sem correlacionar com uma possível ruptura do material. Contudo, o campo denominado de Mecânica da Fratura ganhou corpo com Irwin (1956), que formalizou a teoria de Griffith, facilitando sua aplicação à solução de problemas de engenharia, surgindo, então, o conceito da Taxa de Liberação de Energia.

Os primeiros estudos, desde o trabalho de Griffith, eram aplicados a materiais com comportamento frágil, atendendo às limitações do ramo da MF, hoje, chamado de Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE). No entanto, materiais como o aço apresentam comportamento dúctil, comportamento esse que não segue a linha de um material linear elástico. Desta forma, houve a necessidade da definição de outras formulações que superassem os limites da MFLE, levando, então, ao surgimento dos demais ramos: Mecânica da Fratura Elastoplástica (MFEP) e Mecânica da Fratura Coesiva (MFC).

Apesar de ter sido alvo dos estudos iniciais, a MFLE ainda é alvo de muita atenção por parte dos pesquisadores, em função de ter sido dela que se derivaram as outras formulações. É essencial ter o seu entendimento consolidado, para que

se possa entender conceitos mais avançados e também porque muitos materiais e estruturas comportam-se globalmente respeitando as limitações da teoria linear elástica. Os acidentes apresentados anteriormente são exemplos de estruturas que apresentam fratura frágil. Uma fratura frágil é caracterizada pela combinação de: baixa tenacidade (propriedade do material ou condição de baixa temperatura); alta tensão; e falhas com grandes dimensões. A importância da MFLE motiva o desenvolvimento deste trabalho com base em seus conceitos.

Os principais conceitos da MFLE são pautados em formulações analíticas. No entanto, as soluções da MF foram desenvolvidas para algumas condições de geometria e carregamento específicas. Sua aplicação a problemas mais gerais de engenharia leva a resultados por vezes discrepantes. Como alternativa faz-se uso de ferramentas numéricas para a resolução de problemas complexos. Isso levou à adaptação de métodos já utilizados na mecânica dos sólidos e ao surgimento de novas ferramentas numéricas para analisar estruturas trincadas. Um método que mostra bons resultados nas previsões do comportamento de uma estrutura trincada é o Método Estendido dos Elementos Finitos (XFEM) (Moes et al, 1999). Esse método é uma extensão dos elementos finitos e traz consigo a vantagem de apresentar bons resultados aliados a um baixo custo computacional, em comparação à utilização dos elementos finitos convencionais. Este fato gera interesse em torno do seu uso.

Este trabalho apresenta uma implementação do Método Estendido dos Elementos Finitos, para análises bidimensionais de abertura e propagação de fratura via Mecânica da Fratura Linear Elástica para o programa ABAQUS®. O ABAQUS® permite a inserção de sub-rotinas de análise em seu processamento e tem a sub-rotina UEL (ABAQUS, 2011), *user element*, como a responsável pela inserção de um elemento definido pelo usuário no programa.

1.1.

Objetivos

Diante do contexto apresentado, o objetivo principal deste trabalho é o estudo e aplicação do XFEM no trato de descontinuidades fortes.

Os objetivos específicos são:

- a implementação do método XFEM para uso em análises 2D de abertura e propagação de fraturas com base na MFLE;
- a avaliação da propagação de fraturas em materiais quase-frágeis com uso do XFEM;

- conhecimento e aplicação de programas de engenharia na análise de fraturas.

1.2.

Organização da Dissertação

A dissertação está organizada em cinco capítulos, além da introdução, conforme descrito a seguir.

No Capítulo 2, são apresentados os principais conceitos da Mecânica da Fratura Linear Elástica, como Taxa de Liberação de Energia e Fator de Intensidade de Tensão, sendo este um dos principais parâmetros dentro da Mecânica da Fratura.

No Capítulo 3, inicialmente, são apresentados os principais métodos da mecânica da fratura computacional juntamente com referências de suas aplicações. Em seguida, é feito um resumo do uso do tradicional Método dos Elementos Finitos (MEF) com os conhecidos elementos singulares *quarter-points* e também se apresentam os elementos coesivos. Por fim, é então feita a introdução do Método Estendido dos Elementos Finitos, método utilizado no desenvolvimento do trabalho, apontando suas vantagens diante de outros métodos. Na sequência, o referido método tem sua formulação detalhada.

O Capítulo 4 traz aspectos relativos à implementação do XFEM através de uma sub-rotina para o ABAQUS®. Possui aspectos de pré-processamento, de processamento, como o cálculo numérico dos Fatores de Intensidade de Tensão com base no método dos elementos finitos, e de pós-processamento dos resultados.

No Capítulo 5, encontram-se os exemplos e resultados dos modelos avaliados no trabalho. Foram utilizados modelos clássicos da mecânica da fratura para mostrar o uso do XFEM e validar a implementação realizada. Foram processados também modelos que mostram o uso e vantagem do emprego do XFEM para simulação da propagação de fraturas em comparação com outros modelos numéricos.

Por fim, no Capítulo 6, são apontadas as conclusões obtidas com o trabalho, a contribuição gerada, além de sugestões para trabalhos futuros.