

## 6

### Conclusão

#### 6.1. Conclusões

Este trabalho abordou o uso de um método numérico em análise de propagação de fraturas bidimensionais seguindo os conceitos da Mecânica da Fratura Linear Elástica. Adotou-se o XFEM, Método Estendido dos Elementos Finitos para a representação da fratura no modelo numérico. Este método é uma extensão do tradicional método dos elementos finitos e possui a capacidade de gerar bons resultados no cálculo dos fatores de intensidade de tensão e na avaliação de propagação de fratura mesmo com uso de malhas não muito refinadas. Foram apresentadas suas principais vantagens em comparação aos modelos usuais de elementos finitos com uso de elementos singulares ou com uso de elementos coesivos: a não conformidade da fratura com a malha e a manutenção da mesma durante a propagação. Para análise de suas aplicações, foi feita a implementação de uma sub-rotina UEL para análises de propagação de fraturas no programa ABAQUS®.

O XFEM tem como característica um baixo custo computacional, uma vez que a malha inicial é mantida até o final da análise e que não há necessidade de um denso refinamento no entorno das descontinuidades. Neste trabalho, foi realizado um estudo qualitativo e quantitativo da resposta de estruturas sujeitas a fraturas que se desenvolvem sob Modo I e modo misto de carregamento. Não foi feita uma análise da eficiência computacional da implementação. O uso de uma sub-rotina para o ABAQUS® gera muitas limitações à eficiência do código. Todas as informações da fratura e das propriedades do XFEM precisam ser repassadas continuamente, a cada passo da análise, para o ABAQUS®. Isso se dá através de arquivos externos que precisam ser abertos e lidos a cada passo, tornando o processamento lento.

A implementação realizada traz algumas contribuições para análises no ABAQUS®. Além de possibilitar o entendimento do processamento de uma análise de estrutura com fratura, ela possibilita o uso de um critério de fratura diferente daquele empregado pelo programa em análises lineares elásticas. Esta

implementação faz uso de um critério de fratura com base nos fatores de intensidade de tensão, enquanto o programa faz uso de um critério com base em energia em seu pacote padrão de análise com XFEM. Uma outra importante característica desta implementação é a consideração dos enriquecimentos de ponta de trinca em seu campo de deslocamentos. O ABAQUS não considera os enriquecimentos de ponta em sua formulação, impondo que a fratura sempre termine em um bordo do elemento. Esta contribuição permite maior liberdade na modelagem dos problemas de propagação de fratura, não sendo necessário ajuste na malha, para que a trinca inicial tenha suas pontas localizadas em bordos de elementos, e permite também a manutenção do padrão de crescimento da fratura, não forçando ou manipulando, no decorrer da análise, o uso de acréscimos de  $\Delta a$  de comprimento à fratura de forma que a nova posição da sua ponta coincida com algum bordo de elemento. Em comparação com outras implementações do XFEM através de uma sub-rotina UEL já realizadas, a implementação feita neste trabalho possibilita a propagação da fratura de forma automática seguindo os passos de incremento da análise. Outras implementações fazem a avaliação da propagação externamente à rotina e depois repetem o processo de análise com a nova configuração do problema.

Na aplicação do XFEM e da implementação realizada, primeiramente, foram usados modelos com respostas já estabelecidas na literatura, a fim de se avaliar o uso do método em análises de estruturas com descontinuidades fortes e, conseqüentemente, validar a implementação feita. Foram avaliados casos de fraturas em Modo I e em modo misto de carregamento, tendo bons resultados no cálculo dos fatores de intensidade de tensão  $K_I$  e  $K_{II}$ , assim mostrando a qualidade do método e validando a implementação. Posteriormente, foram feitos modelos para a análise da propagação de fraturas. Também foram feitas análises de fratura em Modo I de carregamento e em modo misto. Avaliaram-se modelos clássicos da literatura e modelos físicos de estruturas de concreto, material considerado quase-frágil. As respostas do modelo com uso do XFEM foram comparadas a respostas experimentais e/ou numéricas com uso de modelos de elementos finitos convencionais. As conclusões obtidas com os modelos em Modo I e em modo misto de carregamento seguem abaixo:

- Modo I:

Para avaliação do modelo com uso do XFEM sob a teoria da MFLE em um caso de propagação de fratura em Modo I, foram analisadas a propagação de uma trinca de aresta em uma placa submetida à tração e a propagação de fratura em

corpos de prova de concreto submetidos a ensaio de flexão monotônica. Em ambos os casos, a fratura seguiu trajetória no plano de sua trinca inicial, como era esperado por se tratar de casos de Modo I de propagação. Ressalta-se para o exemplo de flexão a necessidade da introdução de uma trinca inicial no modelo numérico, a fim de possibilitar a análise.

No primeiro exemplo, foi avaliada a evolução do valor de  $K_I$  com a sequência da propagação. Foram alcançados bons resultados. Os resultados foram comparados com as respostas analíticas até uma relação de  $a/w = 0,6$ , limite de validade da equação analítica, obtendo-se erros abaixo de 4% no cálculo do FIT. Os resultados também foram comparados com respostas calculadas através do programa Quebra2D, programa de elementos finitos com uso de elementos singulares, obtendo-se também boa concordância. Foi evidenciada a vantagem do método de apresentar bons resultados mesmo com uma malha não tão refinada e sem um denso refinamento ao redor da fratura, fator necessário em uma malha de elementos finitos com uso de elementos singulares.

No exemplo do teste de flexão, foram feitas análises a partir do gráfico carga x deslocamento, resposta do ensaio da referência adotada. O erro no valor da carga de pico foi menor que 1%, enquanto que o erro no valor do deslocamento referente a essa carga ficou em torno de 20%. Foi realizado também um modelo em elementos finitos com uso dos elementos coesivos. As curvas do XFEM e do modelo em elementos finitos convencionais tiveram boa concordância na parte elástica do problema. Na fase pós-pico da resposta, a concordância não foi mantida. Este é um comportamento esperado, visto que se trata de dois modelos constitutivos diferentes. O modelo com XFEM é linear elástico, enquanto que o modelo com o MEF tem como base um modelo coesivo contendo dano. Com este exemplo, pode-se concluir que o modelo XFEM linear elástico teve uma boa aproximação para o problema em questão, que trata de um material não linear, em relação à previsão da carga de pico. Ressalta-se que não foi possível fazer uma comparação dos resultados da fase pós-pico, pois a curva experimental é interrompida na carga de pico.

- Modo misto:

Na avaliação da formulação implementada em casos de fratura em Modos I e II combinados, foram utilizados dois exemplos clássicos da literatura e um exemplo físico de teste de flexão em quatro pontos em vigas de concreto.

O primeiro exemplo avaliou o cálculo do ângulo crítico de propagação de uma trinca centralizada, posicionada com diversas inclinações, em uma placa

“infinita”. Os resultados foram muito satisfatórios, justificados com erros menores que 1% em relação às respostas analíticas.

Em seguida, fez-se um exemplo para ilustrar capacidade do modelo de prever a trajetória de propagação da fratura. Foi avaliada a propagação de uma trinca excêntrica em uma viga em balanço. Neste exemplo, foi feita uma avaliação quanto ao tamanho do incremento de fratura  $\Delta a$  adotado no procedimento de propagação. As trajetórias obtidas tiveram excelente concordância com respostas da literatura para o mesmo problema. Constatou-se que o resultado do problema é sensível ao tamanho do incremento de fratura, este adicionado ao comprimento da fratura à medida que ela se propaga. Conclui-se que a escolha do tamanho do incremento não deve ser deixada por conta do analista. Um cálculo adaptativo, calculando-se uma tolerância para a diferença entre os valores obtidos em uma primeira estimativa e o valor com um incremento menor, é uma sugestão para aprimoramento do código.

O último exemplo de propagação de fratura em modo misto e último exemplo analisado neste trabalho trata de um teste de flexão em quatro pontos em uma viga de concreto. Foram avaliados dois modelos físicos contendo condições de apoio distintas. Os modelos tratam de carregamento não simétrico e não proporcional. A trajetória de propagação teve uma excelente predição com a implementação do XFEM realizada neste trabalho. A resposta do XFEM esteve dentro da envoltória experimental para os dois tipos de modelo. Também se comparou o resultado do modelo XFEM com o resultado numérico de referência obtido com programa de elementos finitos, obtendo-se uma trajetória quase idêntica para ambos os tipos de modelo analisados. A segunda análise foi quanto às curvas de resposta da estrutura carga x CMOD e carga x deslocamento. A formulação com base na MFLE não foi capaz de representar essas respostas para ambos os casos analisados. Foram obtidas cargas de pico muito superiores às cargas de referência. A fim de se compreender e melhor representar o problema, foi utilizado um modelo de zona coesiva com uso de uma lei constitutiva bilinear. O modelo foi gerado no próprio ABAQUS® com uso de elementos de interface para representar a fratura. Com uso do modelo coesivo, foram alcançados melhores resultados em relação aos valores de carga de pico. Uma observação importante é que tanto o modelo XFEM quanto o modelo coesivo tiveram suas tangentes iniciais da fase de carregamento das curvas carga x CMOD com inclinações bem semelhantes às apresentadas pela referência, em ambos os testes. O mesmo comportamento não acontece nas curvas carga x deslocamento dos testes. Ainda neste exemplo, foram feitos estudos comparativos quanto à escolha do critério de

fratura e do valor de  $K_{IIc}$  a serem adotados para análise. Os estudos mostram a importância de uma correta escolha do critério de fratura e da determinação do valor de  $K_{IIc}$ , de acordo com cada caso a ser avaliado. Nem todos os critérios são capazes de gerar uma boa aproximação para qualquer caso em estudo. O valor de  $K_{IIc}$  também pode influenciar diretamente no comportamento do problema.

Em conclusão às análises dos exemplos abordados neste trabalho, constata-se que o método XFEM aliado com os conceitos da MFLE apresenta bons resultados no cálculo dos fatores de intensidade de tensão, assim como mostra ser uma poderosa ferramenta para predição da trajetória de propagação de fraturas bidimensionais. Foi possível verificar que mesmo para estruturas de concreto, um material com comportamento não linear, é possível prever com excelente aproximação o caminho de propagação de fraturas com uso da teoria linear elástica da mecânica da fratura. Os resultados foram obtidos com malhas estruturadas sem refinamento no entorno das trincas. Tal fato mostra a capacidade do método XFEM de obter bons resultados diante de malhas relativamente grosseiras.

Por fim, conclui-se que a ferramenta numérica desenvolvida possibilita a realização de análises de propagação de fraturas bidimensionais com base nos fatores de intensidade de tensão no programa ABAQUS®.

## 6.2.

### Sugestões para trabalhos futuros

Inúmeras possibilidades de trabalhos futuros surgem a partir desta implementação do modelo XFEM. Para a realização de análises de casos mais complexos, algumas melhorias na formulação do método podem ser sugeridas, tais como: possibilitar o uso de elementos de alta ordem, fazer tratamento para os elementos de transição, *blending elements*, (elementos que não são cortados pela fratura, mas possuem nós enriquecidos), pois estes geram erros nos resultados por não satisfazerem a lei da partição da unidade (Ahmed, 2009), avaliar o uso de método robusto para a integração numérica dos elementos (Santana, 2004), avaliar o uso do método dos nós fantasmas, avaliar a utilização do método *Level Set* na descrição da geometria da fratura e permitir a aplicação de carregamento nas superfícies da fratura. Melhorias no algoritmo de propagação são também necessárias para tratar o domínio da integral de interação que atinge os limites do modelo. Melhorias no pré-processamento de malhas são necessárias para permitir a análise de problemas com geometria qualquer, como por exemplo, a inserção de furos e outras imperfeições no modelo.

O desenvolvimento da formulação para outros modelos constitutivos, tais como: elastoplástico, coesivo, poro-elástico e poro-elastoplástico, surge também como opção de continuação deste trabalho. Esta sugestão é de especial interesse para aplicações em geomecânica, como o problema de fraturamento hidráulico.

A otimização do algoritmo de propagação com o XFEM e a execução de análises comparativas de eficiência computacional do método em relação à simulação numérica com análise adaptativa com o MEF e a MFLE e, alternativamente, modelos adaptativos de fratura coesiva, formam uma sugestão para trabalhos futuros.

Por fim, ressalta-se que a implementação realizada é uma primeira versão. Uma otimização deste código inicial faz-se necessária. Além disso, sugere-se criar um programa independente para análises de fratura com uso do XFEM, a fim de se superar limitações impostas pela implementação do método através de uma sub-rotina UEL do ABAQUS®.