

## 8 Conclusões

Este trabalho mostrou a ineficiência das estimativas de zonas plásticas que usam o Fator de Intensidade de Tensão ( $K$ ) para descrever o campo de tensões que representam corpos trincados. O  $K$  foi originalmente utilizado como o principal parâmetro da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE). A ineficiência de  $K_I$ , Fator de Intensidade de Tensão em modo I de trincamento, para descrever o campo de tensões foi mostrada no Capítulo 1, em que se estimou as zonas plásticas presentes na ponta da trinca de uma placa infinita uniaxialmente tracionada (placa de Griffith). Foi mostrado nesse exemplo que as zonas plásticas normalizadas são insensíveis à relação  $\sigma_r/S_Y$ .

O Capítulo 2 apresentou a revisão bibliográfica do trabalho. Nessa revisão se comentou sobre o trabalho de Inglis (1913) que deu origem à Mecânica da Fratura (MF). Foi mostrado nesse capítulo que o Fator de Intensidade de Tensão foi obtido, independentemente, por Irwin (1957) que usou a função de Westergaard, e por Williams (1957) que utilizou uma série trigonométrica com infinitos termos. Série que ficou conhecida como série de Williams. Em seguida, comentou-se que a função de tensão de Westergaard e a série de Williams são maneiras diferentes de expressar a solução para o problema linear elástico de corpos trincados. O Capítulo 2 também apresentou alguns trabalhos que tentaram gerar funções de tensões de Westergaard para outras condições de contorno. Em seguida, comentou-se sobre a tentativa de estender a aplicabilidade da MFLE a partir do uso conjunto de  $K_I$  e da  $T$ -stress para representar o campo tensões na MFLE. Por último, o Capítulo 2 comentou sobre os trabalhos que se propuseram a obter medidas experimentais das zonas plásticas.

Como o Capítulo 1 mostrou que as zonas plásticas normalizadas são insensíveis à relação entre a tensão nominal e a tensão de escoamento do material ( $\sigma_r/S_Y$ ), o Capítulo 3 avaliou as estimativas de zonas plásticas normalizadas a partir dos campos de tensões obtidos por  $K_I$ ,  $K_I$  com adição da  $T$ -stress, pela série de Williams e pela função de tensão de Westergaard. Além disso esse capítulo

confirmou, em termos de estimativa de zonas plásticas normalizadas, que a *T-stress* corresponde ao primeiro termo constante de ordem zero da série de Williams. Em seguida, analisando o exemplo da placa de Griffith, mostrou-se que o campo de tensões gerado a partir da série de Williams nada mais é do que escrever a função de tensão de Westergaard em forma de uma série infinita. A equivalência entre a série de Williams e a função de tensão de Westergaard foi mostrada em termos de estimativa de zonas plásticas normalizadas, pois, independentemente do valor  $\sigma_r/S_Y$ , as duas estimativas são idênticas conforme se aumenta o número de termos da série. Como a solução linear elástica de corpos trincados é obtida a partir da série de Williams ou da função de tensão de Westergaard correspondente ao problema estudado, o Capítulo 3 mostrou para o exemplo da placa de Griffith que os campos de tensões obtidos a partir de  $K_I$  e de  $K_{II}$  mais *T-stress* são válidos apenas em regiões bem próximas à ponta das trincas. Para finalizar, o Capítulo 3 identificou que o problema de utilizar o campo de tensões linear elástico completo obtido a partir da função de tensão de Westergaard ou da série de Williams é o fato de que esses campos geram tensões singulares na ponta das trincas. Essa singularidade é característica do problema matemático. Entretanto, ela não reproduz o comportamento mecânico, pois nenhum material suporta tensão infinita.

Para tentar contornar o problema da singularidade dos campos de tensões lineares elásticos, o Capítulo 4 apresentou, baseado nos trabalhos de Irwin (1958) e de Rodriguez (2007), três propostas de correção das zonas plásticas obtidas por um campo de tensões linear elástico e que consideram materiais perfeitamente plásticos. Essas correções partem da hipótese de que as forças que estariam associadas à tensões superiores ao limite de escoamento do material devem ser redistribuídas. Para que isso aconteça, é necessário que uma quantidade maior de material deforme plasticamente. Com isso, foi mostrado que as zonas plásticas originais, obtidas por campos de tensões lineares elásticos, dobram de tamanho após a correção. Esse fato já tinha sido verificado por Irwin (1957). Além disso, esse capítulo apresentou, fundamentado nas ideias de Kujawski & Ellyin (1985), uma proposta de fazer as correções nas zonas plásticas normalizadas de tal forma que se considere também os efeitos do encruamento do material. Esses efeitos do encruamento nas zonas plásticas foram estimados a partir da análise da placa de Griffith para dois materiais diferentes. Conforme o esperado, o material com

maior encruamento apresentou zonas plásticas menores do que o material com o menor encruamento. Isso aconteceu devido ao fato de que, com maior encruamento, o material suporta tensões mais elevadas dentro da zona plástica.

Como alternativa para casos em que não se conhece a solução linear elástica completa do problema estudado, o Capítulo 5 mostrou que tanto o Método dos Elementos Finitos (MEF) quanto o Método Híbrido dos Elementos de Contorno (MHEC) são ferramentas poderosas para estimar as zonas plásticas lineares elásticas presentes na ponta de trincas. Esse fato foi mostrado primeiramente para o exemplo da placa de Griffith, em que as zonas plásticas normalizadas geradas pelos campos de tensões lineares elásticos analíticos foram reproduzidas pelos dois métodos numéricos. Em seguida, esse capítulo mostrou, a partir do exemplo de uma placa retangular com uma trinca central sob flexo tração, que os campos de tensões obtidos numericamente pelo MHEC geram zonas plásticas sensíveis ao nível de  $\sigma_n/S_Y$ , ao tipo de carregamento e aos parâmetros geométricos, como a relação de  $a/W$ , diferentemente do que acontece quando se utiliza o campo de tensões LE gerados por  $K_I$ . O tópico mais importante desse capítulo foi o estudo sobre as estimativas das zonas plásticas feitas para três espécimes diferentes sujeitos a um mesmo  $K_I$  e a um mesmo valor de  $\sigma_n/S_Y$ . Foi mostrado que para baixos valores de  $\sigma_n/S_Y$  ( $\sigma_n/S_Y < 0,5$ ) as zonas plásticas dos três espécimes são diferentes, mas bem próximas das zonas plásticas obtidas a partir do campo de tensões determinado por  $K_I$ . Contudo, à medida que a relação  $\sigma_n/S_Y$  cresce, as zonas plásticas dos três espécimes começam a ficar cada vez mais diferentes entre si e maiores que a zona plástica obtida pelo campo de tensões obtido por  $K_I$ .

Todas as estimativas de zonas plásticas feitas no Capítulo 5 não consideraram nenhuma das propostas de correção apresentadas no Capítulo 4. A implementação e os resultados das estimativas de zonas plásticas corrigidas numericamente foram feitas no Capítulo 6. Entretanto, apenas os casos em que se considera material perfeitamente plástico e que utiliza a componente  $\sigma_{yy}$  e a tensão de Mises na correção foram implementados. Essa implementação foi feita somente no programa de Lopes (2002) que usa o MHEC. Três exemplos foram estudados nesse capítulo. Para os exemplos da placa de Griffith e da placa retangular com uma trinca central sob tração, foi mostrado que zonas plásticas corrigidas numericamente são praticamente iguais às zonas plásticas corrigidas

analiticamente. O terceiro exemplo, que não apresenta uma solução analítica conhecida, foi o caso de uma placa retangular com uma trinca central sob flexo tração. Nos três exemplos estudados, foi verificado que as zonas plásticas corrigidas são bem maiores que as zonas plásticas normalizadas obtidas apenas pelo campo de tensões obtido por  $K_I$  para todos os níveis de  $\sigma_r/S_Y$ .

Ainda no Capítulo 6, foi levantada a questão de que todas as zonas plásticas corrigidas consideradas neste trabalho são fundamentadas na hipótese feita por Irwin (1958) para o caso da placa de Griffith, pois elas partem das estimativas lineares elásticas para depois sim levar em consideração os efeitos do escoamento do material. Entretanto, devido à singularidade da formulação matemática, essas estimativas possuem um carácter apenas qualitativo, pois o problema da estimativa das zonas plásticas à frente da ponta de trincas é intrinsecamente não linear. Com base nessa ideia da não linearidade, o Capítulo 7 apresentou estimativas de zonas plásticas obtidas numericamente via o MEF e a partir de uma análise não linear. Todas as análises não lineares são feitas a partir da utilização do programa ANSYS (2001) e da consideração do modelo constitutivo bilinear, que possui duas fases. A primeira fase desse modelo é determinada pela tensão de escoamento e pelo módulo de Young ( $E$ ). A segunda fase é determinada pela deformação plástica e pelo coeficiente de encruamento ( $H$ ). Dois exemplos foram estudados nesse capítulo. O primeiro exemplo foi o de uma placa retangular com uma trinca central sob tração e o segundo exemplo foi o de uma placa retangular com uma trinca central sob flexo tração. Dois valores de  $a/W$  e seis valores de  $\sigma_r/S_Y$  foram utilizados em ambos os exemplos. Foi estudado, em cada um dos exemplos, os efeitos de  $H$  nas estimativas das zonas plásticas normalizadas. A conclusão obtida foi que a variação de  $H$  pareceu alterar mais a forma do que o tamanho das zonas plásticas. Além do estudo dos efeitos de  $H$  nas zonas plásticas, a principal contribuição desse capítulo foi a comparação entre as zonas plásticas lineares elásticas corrigidas numericamente e que consideram materiais perfeitamente plásticos com as zonas plásticas obtidas a partir de uma análise não linear e que usa  $H = 1\%E$ , situação que mais se assemelha ao caso de um material perfeitamente plástico. A constatação que se obteve foi que as correções resultam em zonas plásticas bem diferentes das zonas plásticas geradas a partir de uma análise não linear. Entretanto, para alguns valores de  $\sigma_r/S_Y$  e para determinados

valores de  $a/W$ , as zonas plásticas corrigidas são bem próximas das zonas plásticas obtidas por análise não linear na direção paralela ao plano da trinca. Esse resultado é coerente com o que já tinha sido proposto por Irwin (1958).

É possível destacar os seguintes itens como as principais conclusões e as principais contribuições deste trabalho:

- Os campos de tensões gerados a partir da utilização de  $K_I$  ou de  $K_I$  mais  $T$ -stress não são suficientes para se estimar zonas plásticas quando o nível de  $\sigma_t/S_Y$  for alto.
- A conclusão de que os campos de tensões gerados por  $K_I$  e por  $K_I$  mais  $T$ -stress não são suficientes para se estimar zonas plásticas para altos níveis de  $\sigma_t/S_Y$  pode ser obtida a partir do momento que se mostrou que esses dois campos são na verdade partes do campo de tensões completo, que pode ser obtido analiticamente por uma função de tensão de Westergaard ou numericamente a partir do MHEC ou do MEF.
- A incompletude dos campos de tensões gerados por  $K_I$  e por  $K_I$  mais  $T$ -stress também foi mostrada em termos de estimativa de zonas plásticas quando se analisou a placa de Griffith. Nesse exemplo, que possui uma função de tensão de Westergaard conhecida, mostrou-se que  $K_I$  e a  $T$ -stress são termos da expansão da função de tensão de Westergaard em termos da série de Williams. Nessa verificação foi constatado que quanto maior o valor  $\sigma_t/S_Y$ , mais termos são necessários na série de Williams para se reproduzir as estimativas de zonas plásticas obtidas pelo campo de tensões gerado pela função de tensão de Westergaard.
- Com base na ideia de Irwin (1958) que utiliza o campo de tensões gerado por  $K_I$  e que corrige as zonas plásticas na direção paralela ao plano da trinca a partir da consideração de um material perfeitamente plástico, e na ideia de Rodriguez (2007) que utiliza o campo de tensões gerado pela função de tensão de Westergaard e que corrige as zonas plásticas em todas as direções a partir da consideração de um material perfeitamente plástico, este trabalho apresentou três formas de correção das zonas plásticas lineares elásticas que partem da consideração de um material perfeitamente plástico e uma proposta de correção que levam em consideração os efeitos do encruamento nessas zonas plásticas.

- Este trabalho mostrou, em termos de estimativa de zonas plásticas, que o MHEC que utiliza a função de tensão de Westergaard como solução fundamental (Lopes, 2002) e (Dumont & Lopes, 2003) pode ser utilizado de forma eficiente para se calcular valores de  $K$  para geometrias arbitrárias que apresentem trincas internas. Essa constatação é feita partir da verificação que as zonas plásticas obtidas pelo MHEC são praticamente iguais às zonas plásticas obtidas pela função de tensão de Westergaard.
- A partir da utilização do programa DEMO-IMO, este trabalho mostrou que o MEF gera estimativas de zonas plásticas iguais às estimativas obtidas pelo MHEC.
- Com a comparação entre as zonas plásticas normalizadas corrigidas numericamente e as zonas plásticas elastoplásticas obtidas pelo programa ANSYS (2001), foi possível constatar que as propostas de correção só geram bons resultados nas direções paralelas ao plano das trincas. Esse fato já tinha sido constatado por Irwin (1958). Entretanto, Irwin utilizou o campo de tensões obtido a partir de  $K_I$ . Este trabalho utilizou a proposta feita por Rodriguez (2007) que usa o campo de tensões linear elástico completo.
- Por mostrar que os campos de tensões obtidos a partir de  $K_I$  ou por  $K_I$  mais  $T$ -stress são partes da solução linear elástica completa, e que por isso, esses campos de tensões não devem ser utilizados para estimar o tamanho de zonas plásticas em altos níveis de  $\sigma_t/S_Y$ , este trabalho apresenta como conclusão o fato de que o fraturamento de peças trincadas não deve ser previsto, de forma indiscriminada, a partir da comparação entre  $K$  e uma medida de tenacidade,  $K_{IC}$  por exemplo.
- Este trabalho também apresenta como grande contribuição na área de pesquisa na qual ele está inserido, a extensa quantidade de estimativas de zonas plásticas obtidas linearmente de forma analítica e numérica e de zonas plásticas obtidas a partir de uma análise numérica não linear.

Como sugestão para trabalhos futuros, este trabalho propõe:

- A realização de estimativas numéricas lineares e não lineares de zonas plásticas para corpos com trincas tridimensionais.

- O estudo do efeito da espessura nas zonas plásticas tridimensionais e a comparação dessas zonas plásticas com as zonas plásticas correspondentes aos estados planos apresentadas neste trabalho.
- A obtenção de medidas de zonas plásticas obtidas a partir de ensaios laboratoriais. Área de pesquisa que tem sido desenvolvida no laboratório de fotoelasticidade do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.
- O desenvolvimento de pesquisa que consiga relacionar as estimativas de zonas plásticas obtidas linearmente e das zonas plásticas obtidas a partir de uma análise não linear com a tenacidade das peças trincadas.
- O desenvolvimento de pesquisa que consiga relacionar as medidas das zonas plásticas obtidas experimentalmente com a tenacidade das peças trincadas.