

8. Comentários e conclusões

O propósito deste trabalho foi realizar um estudo numérico e experimental do crescimento de uma trinca a partir de um defeito inicial que fecha parcialmente as faces da trinca sob ação do carregamento remoto de flexão pura. Por causa deste fechamento, a geometria inicial se altera durante seu crescimento, tornando-se uma trinca de superfície.

O carregamento remoto induz compressão e tração nas faces da trinca. Sob compressão, as faces da trinca se fecham. Portanto, em uma parte das faces da trinca que ocorre problema de contato. Por outro lado, sob tração, a trinca cresce, mudando gradativamente de geometria, tornando-se uma trinca de superfície.

Para conhecer a geometria dessa trinca de superfície, foram executados ensaios em corpos-de-prova de aço ASTM A-36. Esses ensaios foram reproduzidos em um programa computacional com as hipóteses de mecânica da fratura linear elástica em um problema tridimensional para avaliação da distribuição do FIT, pois trinca de superfície é o caso mais simples que deve ser tratado tridimensionalmente. Complementarmente, foram feitas as hipóteses de crescimento de trinca de superfície, que envolvem dados de taxas de crescimento da trinca, distribuição de FIT, incremento máximo de trinca e direção de crescimento.

Ao final deste trabalho foi possível conhecer a eficiência do programa numérico de mecânica da fratura e avaliar as hipóteses simplificadoras usadas. Desta forma, na Seção 8.1 são listadas as principais conclusões e contribuições deste trabalho e na Seção 8.2 são sugeridos futuros trabalhos nesta área.

8.1. Principais conclusões e contribuições

Em relação aos ensaios executados neste trabalho, foram obtidas as seguintes conclusões:

- Após os ensaios, observou-se que a trinca cresceu predominantemente no trecho de sua frente sob tração. De acordo com o esperado, a trinca não cresce no trecho sob compressão, onde ocorre o contato. Além disso, por causa das redistribuições de esforços internos, a trinca cresce inicialmente no trecho sob tração, mas alcança profundidade superior à superfície média da placa.
- Após quebrar o corpo-de-prova, foram observadas duas geometrias distintas da trinca: trinca reta (com geometria remanescente da pré-trinca) e trinca de canto. Na transição dessas duas geometrias existe uma quina.
- Essa geometria de trinca de canto é bem conhecida e esperada em frentes de trincas sob tensões variáveis, mostrando a tendência das trincas procurarem geometrias curvas. Adicionalmente, também pode ser observado outro comportamento bem conhecido em fadiga, que trincas crescem em modo I de fratura. Portanto, durante seu crescimento, a trinca permaneceu em um plano de trincamento que é perpendicular às superfícies da placa.
- Verificou-se que a geometria da trinca de canto não é bem simplificada por curva quarto-elíptica concêntrica, como usualmente aproximada em trincas de canto sob tração cíclica ou tração e flexão cíclica. Por esta razão, neste trabalho, foram propostas simplificações de geometria apenas aplicadas em trincas longas, no caso de corpos-de-prova inicialmente com uma trinca de borda, a partir 25.96 mm de comprimento de trinca na superfície inferior da placa. A simplificação da geometria da trinca foi feita com a combinação de uma curva quarto-elíptica não concêntrica e um trecho de trinca com profundidade constante e igual ao semi-eixo a da curva quarto-elíptica.
- Foi proposta uma expressão empírica para relacionar a profundidade da trinca com o comprimento da trinca, facilitando futuramente o acompanhamento da geometria da trinca de canto durante seu crescimento.

- Blocos de carregamento marcaram nitidamente as frentes curvas da trinca durante seu crescimento e puderam ser usados para relacionar os ciclos medidos com as marcas das frentes, depois de quebrar o corpo-de-prova.

Em relação à avaliação dessas frentes de trincas obtidas nos experimentos, por causa da complexidade da geometria da trinca, não foi possível utilizar soluções fechadas de FIT, por exemplo, as soluções de Newman-Raju. A frente da trinca inicia como uma frente passante e reta e sob carregamento de flexão pura ocasiona fechamento parcial de suas faces, tornando-se uma trinca de canto com um trecho remanescente da trinca inicial.

Para obter a distribuição de FIT na frente da trinca, foi realizado em um programa tridimensional de MFLE empregando a metodologia incremental. Complementarmente, utilizando as geometrias das marcas nos corpos-de-prova, foram investigadas apenas distribuições de FIT. Utilizando a geometria das marcas das trincas, foram desenvolvidas equações aproximadas para o FIT, facilitando a aplicação destas análises na previsão de vidas. Com essas análises, dois assuntos importantes para predição de crescimento puderam ser executados com sucesso: (i) predição da geometria da trinca e (ii) previsão de vida à fadiga. As conclusões sobre os resultados obtidos com as simulações tridimensionais são apresentadas a seguir.

- Diversos testes foram realizados com o intuito de avaliar na geometria da trinca subsequente a influência da distribuição do FIT e a influência dos parâmetros usados nas hipóteses de crescimento. Estes testes serviram para desenvolver sensibilidade a cada variável e/ou hipótese de crescimento. Com estes teste verificou-se que a magnitude do carregamento remotamente aplicado não interfere na predição de geometria da trinca subsequente, pois para incrementos máximos de trinca de 0.25 mm, apenas utiliza a região II da curva $da/dN - \Delta K$.
- Na posição da quina, que é a transição entre a trinca reta remanescentes e trinca de canto, observou-se singularidade numérica. No Capítulo 5, evidenciou a necessidade do tratamento desta singularidade na quina, pois ocasionam geometrias de trinca

inconsistentes com as geometrias obtidas nos corpos-de-prova. Assim, foram propostas três metodologias de tratamento que devem ser incorporadas nas hipóteses de crescimento em um programa numérico.

- Empregando o tratamento de suavização de geometria da frente da trinca no crescimento incremental da trinca inicialmente passante, obtiveram-se geometrias finais da trinca coerentes com a geometria do corpo-de-prova, com desvio máximo de 6% (ver Capítulo 6). Foram realizados dois crescimentos de trinca incrementalmente, avaliando-se as influências da curva $da/dN - \Delta K$ na predição da geometria. Nesta avaliação, obteve-se que caso as curvas $da/dN - \Delta K$ sejam mal estimadas, a distribuição do FIT corrige incrementalmente a geometria da trinca, convergindo para a geometria do corpo-de-prova, mostrando a robustez e eficiência do programa numérico tridimensional.
- Na previsão de vida, são necessárias boas estimativas de curvas $da/dN - \Delta K$ e precisão no FIT.
- No Apêndice 7, são apresentadas as comparações das funções de geometria em C utilizando o FIT normalizado obtido em um crescimento incremental no FRANC3D e o FIT obtido com a geometria das marcas das trincas nos corpos-de-prova. Os resultados são próximos com erro de aproximadamente 10%.
- A previsão da vida foi satisfatória quando se admitiu a hipótese de fechamento elberiano (Elber, 1970). Entretanto, isto não afirma existência deste fechamento, pois não foram medidos em ensaios nestes corpos-de-prova. Todavia, o fechamento proposto por Eber é uma boa técnica para ajustar os resultados numéricos aos resultados dos ensaios.
- Complementarmente, uma hipótese mais geral deve ser usada para o crescimento de uma trinca de superfície, com a direção de propagação que considere o gradiente de tensões.

8.2. Sugestões para futuros trabalhos

Com o suporte de flexão usinado durante esta tese, podem-se realizar experimentos com outros materiais, por exemplo, alumínio. No alumínio podem ser observadas estrias na superfície de trincamento, evitando-se o uso de blocos de cargas para marcar as frentes de trinca.

Futuras investigações serão necessárias para generalizar o coeficiente de correção U_{sup} e as expressões de FIT, utilizando diferentes espessuras de corpos-de-prova, comprimentos de entalhe e comprimentos de pré-trinca.

Na análise numérica, deve-se ainda utilizar a hipótese de comportamento do material elasto-plástico sob compressão. Mesmo assim, sob tração, o crescimento da trinca deve ser tratado com as hipóteses de mecânica da fratura linear elástica. Esta análise deve ser feita quando forem disponíveis frentes de trinca que atravessem duas regiões com comportamento distinto do material no programa FRANC3D.

Adicionalmente, o caminho da trinca no plano de trincamento deve ser cuidadosamente investigado em trabalhos numéricos e experimentais.