

# 1 Introdução

## 1.1. Problema

A avaliação da integridade e segurança de estruturas submetidas a carregamentos variáveis requer uma análise detalhada das tensões e deformações. Esta análise é uma etapa fundamental em projetos de estruturas para se evitar falhas. Nos primeiros projetos apenas os estados limites da resistência dos materiais eram verificados. Entretanto, diversas falhas ocorreram nas estruturas sem exceder as limitações de resistência.

Conforme progressivamente aumentou-se o uso de metais em componentes estruturais, muitas dessas falhas aconteceram por fratura de componentes destes materiais. Como resultado de extensivas investigações, verificaram que tais fraturas foram originadas por defeitos e/ou concentrações de tensões. Notou-se que a partir de concentrações de tensões, iniciavam trincas. Essas trincas oriundas de concentrações de tensões ou de um defeito pré-existente, frequentemente, cresciam estavelmente.

Durante seu crescimento, a trinca alcançava comprimentos longos antes de fraturar, e por isso foi reconhecida a importância de prever a iniciação da trinca e seu crescimento estável. Apenas ao final do processo de crescimento, essas componentes falhavam por fratura.

O processo de crescimento e o carregamento variável ao longo do tempo que induzia o crescimento foram chamados, respectivamente, de propagação da trinca por fadiga e carregamento de fadiga. O principal objetivo de estudar a propagação é garantir a segurança de humanos e prevenir danos materiais. O objetivo secundário é projetar uma estrutura com economia.

Neste trabalho, estuda-se este crescimento, que, usualmente, é realizado a partir de uma trinca pré-existente. Basicamente dois dados devem ser estimados: (i) geometria da trinca e (ii) estimativa da vida útil da estrutura, que costuma-se referir apenas como 'vida'. No caso de carregamento com amplitude constante, a

vida pode ser estimada por números de ciclos de carregamento que a trinca cresce estavelmente.

Muitas observações experimentais, modelos analíticos e numéricos foram realizados para se conhecer esse crescimento por fadiga sob as hipóteses de mecânica da fratura linear elástica (MFLE). Lin & Smith (1999b) mostraram que duas trincas pré-existentes, com geometrias iniciais diferentes e sob mesmas condições de carregamento, tendem a uma distribuição similar dos parâmetros de MFLE quando a trinca atinge um comprimento longo. Com esse resultado, obtém a convergência para uma geometria similar mesmo com trincas iniciais diferentes (Wu, 2006).

Por exemplo, considere uma peça trincada que cresce sob carregamento de tração. Para comprimentos longos, a frente da trinca tende a se tornar passante e reta ou ligeiramente curva, como é ilustrada na Figura 1.1 (b). Entretanto, uma trinca pode nascer na quina da placa sob esse mesmo carregamento, como é exemplificado na Figura 1.1 (a). Predizer a geometria da trinca, enquanto não se torna passante, não é uma tarefa simples.

Além da complexidade da geometria, agem mecanismos nessas trincas (trincas de superfície) que influenciam a estimativa da vida. Avaliar as influências desses mecanismos é um desafio, por isso é extremamente importante realizar experimentos. Com experimentos melhora-se o conhecimento da física envolvida nas propagações e previsões da vida. Adicionalmente, pode-se investigar analiticamente e/ou numericamente os parâmetros de MFLE associados a essas propagações e prever a geometria da trinca, confrontando essas previsões com a geometria experimental. Essa abordagem é essencial para propor melhoras nas metodologias de crescimento da trinca por fadiga.

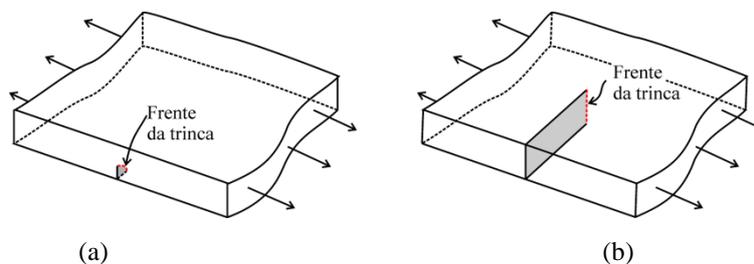


Figura 1.1 – Geometria da frente da trinca sob tração em uma placa finita: (a) trinca curta e (b) trinca longa.

Felizmente, já são disponíveis soluções para trincas de superfície submetidas a carregamento de tração cíclica. Essas soluções são baseadas em conceitos de fadiga e julgamento de engenharia. Em menor proporção, são encontradas soluções em trincas de superfície sob carregamento de flexão.

Utilizando as hipóteses de MFLE, essa condição de carregamento de flexão tende a estabilizar a geometria da trinca em uma frente variável ao longo da espessura. Entretanto, é complexo estimar a geometria exata. As dimensões finitas da peça e restrições de deslocamentos podem influenciar essa geometria. Assim, tornam-se importantes explorações experimentais.

Por essas razões, o problema tratado nesta tese é uma placa trincada sob carregamento de flexão pura, conforme ilustrado na Figura 1.2. O defeito inicial adotado é uma trinca de frente passante e reta. Entretanto, quando submetida a carregamento de flexão pura, as faces da trinca são fechadas parcialmente. Nesta região de fechamento ocorre o contato entre as faces da trinca. As hipóteses simplificadoras de crescimento da trinca são as hipóteses da mecânica da fratura linear elástica (MFLE). Embora seja conhecido que a trinca reta se torne uma trinca de superfície, a geometria exata para esse problema é desconhecida. Assim, investiga-se experimentalmente e numericamente o crescimento da trinca com faces parcialmente em contato induzido pelo carregamento de flexão pura aplicado.

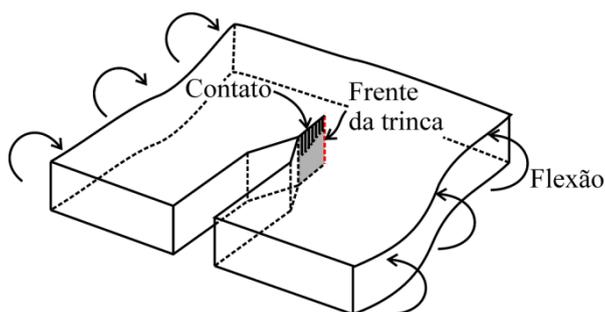


Figura 1.2 – Problema de propagação de trinca submetida à flexão pura.

## **1.2. Motivação**

Estudos mostraram que os gastos despendidos em falhas por fratura alcançavam 4% do valor total do produto interno bruto (PIB) nos EUA e na Europa (The economic effects of fracture in the United States, 1978; Faria, 1991 apud Milne, 1994). Esses estudos indicaram ainda que a pesquisa e o desenvolvimento neste campo podiam reduzir o custo a apenas uma pequena porcentagem do PIB.

Além dos encargos econômicos, falha por fadiga pode ocasionar acidentes fatais. Por exemplo, recentemente, uma falha no motor foi uma das causas que levaram a queda de uma aeronave LED-410 no Recife, matando 16 pessoas. Segundo o Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA), uma das peças do motor, a haleta, estava em processo de fadiga e se rompeu. (Agência Estado, 2012).

Essas falhas podem ocorrer numa variedade de estruturas, tais como fuselagens de avião, cascos de navios, vasos de pressão e pontes metálicas. É necessário prever crescimento de trincas por fadiga nestas estruturas, pois as solicitações atuantes são geralmente cíclicas. Além disso, pode-se dimensionar uma estrutura mais econômica.

Já existem metodologias para prever crescimento de trinca em fuselagem de avião (Potyondy et al., 1995; Zehnder et al., 2000; Furukawa et al.; 2009). Estas metodologias envolvem uma hipótese de combinação de carregamentos. Os carregamentos aplicados devem ser suficientemente altos para evitar o contato entre as faces da trinca. Entretanto, caso os carregamentos não evitem o contato, ainda é um problema aberto à questão de como essa condição afetaria a geometria da trinca e a previsão de vida.

A dificuldade em responder essa questão serviu como motivação para se executar experimentos neste trabalho. Com o domínio físico do problema, um programa computacional de mecânica da fratura é importante para fazer as previsões de propagação da trinca. Portanto, a simulação numérica da propagação da trinca à fadiga por flexão foi também uma motivação para este trabalho. Testando o problema com contato pode-se conhecer as eficiências e as deficiências do programa numérico.

### 1.3. Revisão bibliográfica

Em mecânica da fratura, as trincas que ocorrem com maior frequência apresentam geometrias complexas. Entretanto, para facilitar o tratamento analítico e numérico do problema, a geometria da trinca é muitas vezes simplificada por uma geometria da frente da trinca passante e reta em peças com pequena espessura. Essa simplificação também facilita a usinagem e a execução de experimentos.

Usando essa simplificação em placas infinitas, Griffith (1920) determinou um modelo analítico para descrever a variação de energia durante o crescimento da trinca, chamada de taxa de alívio de energia. Este modelo se tornou a base da mecânica da fratura.

Por dificuldades práticas da abordagem por energia, um grande avanço foi realizado por Irwin (1957) e por Williams (1957). Eles introduziram o conceito de fator de intensidade de tensão (FIT). O FIT é um parâmetro quantitativo que descreve a amplitude do campo de tensões elásticas na ponta da trinca. Ele pode ser usado apenas sob condições de escoamento em pequena escala do material (Anderson, 2005).

A solução de FIT em um problema com trinca passante submetida a carregamento de flexão pura, não considerando contato entre as faces da trinca, foi dada por Sih e co-autores (Sih et al., 1962). Complementarmente, soluções para tensões em uma placa com trinca passante sob carregamento de flexão foram propostas por Harthanft & Sih (1968).

Confrontando essas soluções com resultados experimentais, Erdogan e co-autores mostraram que as restrições do modelo matemático violavam a realidade em um problema com trinca passante sob flexão pura (Erdogan et al., 1962). Em outra abordagem experimental, Wynn & Smith (1969) tiveram resultados insatisfatórios para tensões. Eles compararam as tensões críticas obtidas por modelos matemáticos com as tensões experimentais em uma placa trincada com contato.

Além de o FIT descrever a amplitude das tensões elásticas na ponta da trinca, no início da década de 60, Paris e co-autores demonstraram que a mecânica da fratura pode ser usada para caracterizar o crescimento da trinca por fadiga

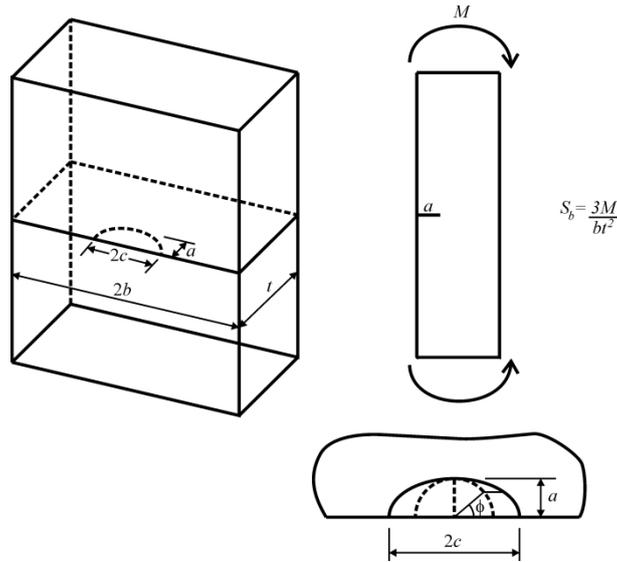
(Paris et al., 1961). Paris identificou a existência de um princípio de similaridade em função do FIT nas curvas de propagação.

Desde então, quando válidas as hipóteses da mecânica da fratura linear elástica (MFLE), o FIT também é usado para controlar o crescimento da trinca por fadiga.

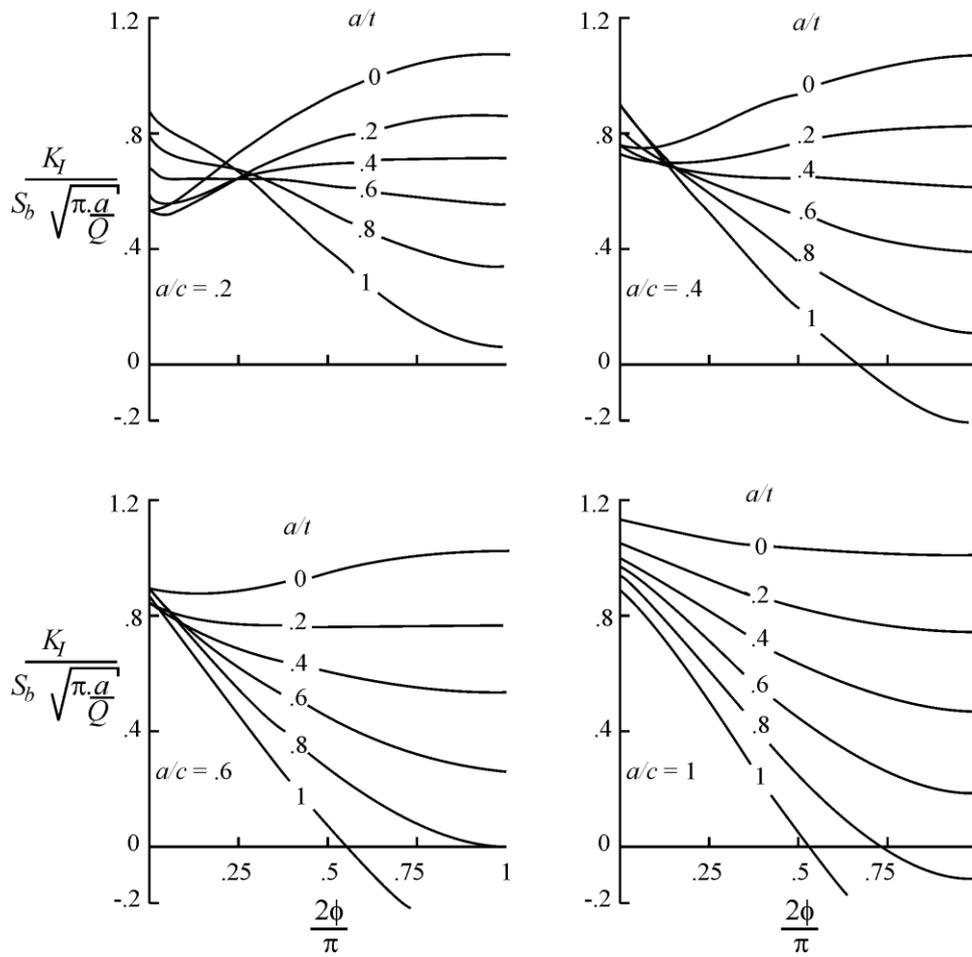
### **1.3.1. Propagação em trincas de superfície**

Diversos pesquisadores executam experimentos ou métodos analíticos aproximados para obter o FIT. Na prática pode ser difícil estimar analiticamente o FIT para geometria complexa de trinca, por exemplo, trincas de superfície ou trincas de canto (Janssen et al., 2006). Por essa razão, soluções numéricas de FIT são largamente usadas na comunidade de fadiga para prever o crescimento nessas trincas. Entre elas podem-se destacar as soluções de FIT de Newman & Raju (1981).

As soluções de Newman-Raju para FIT na frente de trincas de superfície submetidas à tração provocada por carregamento de tração e flexão são equações de ajustes obtidas em análises tridimensionais de elementos finitos. Essas soluções são escritas como uma função de ângulo paramétrico ( $\phi$ ), profundidade da trinca ( $a$ ), comprimento da trinca ( $c$ ), espessura ( $t$ ) e largura da placa ( $w$ ). Desta forma, com base na geometria de trinca de superfície ilustrada na Figura 1.3 (a) e aplicando um carregamento de flexão, onde atuam tensões de tração em toda a frente da trinca, foram determinadas soluções de FIT conforme Figura 1.3 (b).



(a)



(b)

Figura 1.3 – Resultados de FIT sob carregamento de flexão: (a) Geometria da trinca de superfície e (b) Resultados típicos de FIT (Newman & Raju, 1981).

As razões  $a/c$  utilizadas são iguais a 0.2, 0.4, 0.6 e 1 e o coeficiente  $Q$  é obtido por  $Q = 1 + 1.464(a/c)^{1.65}$ , para  $(a/c \leq 1)$ . Pode-se observar que nessas soluções ocorrem resultados negativos de FIT. Esses resultados apenas fazem sentido se combinados com FIT do carregamento de tração.

Neste caso de propagação sob carregamento de tração e flexão, Newman e Raju conseguiram representar de maneira simples as frentes de trincas aproximando a curvas elípticas. A vantagem desta abordagem é determinar o FIT utilizando apenas dois parâmetros da frente da trinca, assumindo centros concêntricos das elipses.

Existem outras propostas para se prever as geometrias da trinca de superfície durante o crescimento em Mahmoud & Hosseinis (1986), Lin & Smith (1999a) e Wu (2006). Eles determinaram as geometrias de trincas de superfície partindo de defeitos curvos sob carregamento de tração e/ou flexão pura. Estes defeitos curvos iniciam numa posição da peça onde atuam apenas tensões normais de tração. Todavia, esses autores não investigaram as taxas de propagação da trinca.

As taxas de propagação foram investigadas com medidas experimentais em Carter et al. (1990). Ele propagou trincas de superfície sob carregamento de tração e relacionou com as soluções de FIT de Irwin (1962), Dill & Saff (1978), Newman & Raju (1978, 1981).

Carter conseguiu uma reprodução satisfatória da geometria experimental das trincas usando o FIT de Newman-Raju. Todavia, as taxas de propagação da trinca de superfície foram inferiores às taxas de propagação encontradas em um corpo-de-prova sob tração. Ele alerta que esta diferença pode ser por causa de taxas diferentes de crescimento ou por incertezas nas soluções do FIT. Entretanto, não foi proposto nenhum tratamento destes resultados.

A aplicação das expressões de FIT de Newman-Raju com taxas de propagação ajustadas com equação de Paris (1960) são muito usadas na propagação de trincas curvas (Mahmoud & Hosseinis, 1986; Wu, 1985; Kim & Song, 1992; Oh & Song, 2001; Song et al., 2002). Caso não se aplique as soluções de Newman-Raju, podem-se executar análises de elementos finitos para encontrar o FIT na trinca de superfície (Riddell et al., 1997).

Entretanto, como comentado anteriormente, Paris observou mesmas taxas de crescimento da trinca relacionando o FIT em corpos-de-prova de um mesmo material. Isto significa que sob específicas condições de FIT e  $R$  (razão de tensão) existe uma única taxa de crescimento por fadiga que pode ser caracterizada como uma propriedade do material.

Todavia, existem diversos trabalhos na literatura que não mediram as mesmas taxas de crescimento em uma trinca passante e em uma trinca de superfície (Carter et al., 1990; Kim & Song, 1992; Oh & Song, 2001; Liu et al., 2010). A solução utilizada nos três últimos trabalhos citados é o conceito de fechamento da trinca. Este conceito foi descoberto acidentalmente por Elber (1970) e ocorre quando a trinca não está completamente aberta.

O conceito de fechamento associa as taxas de crescimento a um fator de intensidade de tensão efetivo que pode ser alterado por diferentes condições de tensões na frente da trinca, geometria complexa da trinca (trincas de superfície, por exemplo), espessura do material, por uma interação complexa nas faces da trinca, por aplicação de sobrecargas ou subcargas. Adicionalmente, o FIT efetivo é independente da razão de tensão  $R$ .

Kim & Song (1992), Oh & Song (2001) e Liu et al. (2010) mediram as taxas de crescimento para três diferentes  $R$  em trincas passantes e em trincas de superfícies. A condição de carregamento aplicado em cada trabalho difere (tração cíclica, flexão pura cíclica e combinação de tração e flexão pura). Em todos os trabalhos, utilizando-se o conceito de FIT efetivo na curva de taxas de crescimento da trinca, foram obtidas taxas de crescimento na trinca de superfície ligeiramente mais baixas do que as taxas de crescimento na trinca passante.

### **1.3.2. Contato parcial das faces da trinca sob flexão**

Na seção anterior (1.3.1) foram referenciados apenas trabalhos com defeito iniciando em trincas de superfície, onde as soluções de Newman-Raju podem ser aplicadas. Todavia, existem trabalhos sob carregamento de flexão que iniciam a propagação da trinca com uma frente reta e passante ao longo da espessura. A determinação do FIT nesta frente reta é mais complexa, pois existe um trecho da

face da trinca que permanece em contato ocasionado pelo carregamento de flexão. Young & Sun (1992), Dempsey et al. (1998) e Zhao et al. (2008) estudaram a influência do contato na magnitude do FIT e geometria da trinca.

Esses autores determinaram a magnitude do FIT na superfície de tração máxima da placa sob carregamento de flexão pura. Eles encontraram que o FIT nesta posição decresce 50% em relação ao FIT obtido sob tração. Entretanto, estes dados analíticos ou numéricos não foram comparados com experimentos. Estes resultados foram confirmados nas análises numéricas exploratórias durante o desenvolvimento desta tese (Corbani et al., 2010).

A propagação da trinca partindo de uma geometria complexa com contato parcial foi realizada por Joseph & Erdogan (1989). Eles examinaram analiticamente a propagação de uma geometria de frente de trinca complexa sob carregamento de flexão pura. Todavia, um método de incrementos de trinca foi usado para propagar a trinca. Esses incrementos foram extrapolados até as extremidades.

Do ponto de vista experimental, existem poucos ensaios que consideram o contato entre as faces da trinca devido ao carregamento de flexão (Erdogan et al., 1962; Wynn & Smith, 1969; Smith & Smith, 1970; Mullinix & Smith, 1974). Alguns destes ensaios foram executados sob carregamento estático. Além disso, não foram apresentadas marcas da geometria da trinca durante o crescimento e medidas experimentais de vida. Claramente, merecem mais experimentos neste tópico (Dempsey et al., 1998).

#### **1.4. Contribuições e objetivos**

O presente trabalho tem três objetivos principais:

- Executar experimentos para conhecer geometrias de trincas com contato induzido por carregamento de flexão pura em placas.
- Reproduzir os resultados experimentais em um programa de computador que realiza simulação numérica tridimensional de mecânica da fratura.

O desenvolvimento deste trabalho exigiu a solução de vários problemas e desafios. As principais atividades associadas a este desenvolvimento merecem ser enumeradas, pois correspondem a contribuições deste trabalho:

- Projetar corpos-de-prova modificados para ensaio de tração. Esse ensaio é executado durante o pré-trincamento dos corpos-de-prova usados no ensaio de flexão.

- Projetar corpos-de-prova para ensaio de flexão pura.

- Projetar um suporte de flexão a quatro pontos que garanta a condição de flexão pura.

- Desenvolver uma técnica de visualização da trinca no monitor do computador e medição da trinca.

- Marcar as frentes de trincas durante o experimento.

- Simplificar as geometrias das trincas experimentais empregando curvas quarto-elípticas.

- Tratar singularidades numéricas devidas a uma quina na frente da trinca.

Assim, são propostas três metodologias, com diferentes aplicações, para tratar esse problema.

- Testar o programa tridimensional de mecânica da fratura (FRANC3D, 2010) e verificar as hipóteses de propagação de trinca bidimensional. Primeiro o programa foi adaptado para considerar as condições de contato nas faces da trinca. Esta adaptação foi realizada por Bruce Carter (pesquisador do Grupo de Mecânica da Fratura de Cornell - CFG). As contribuições deste trabalho no FRANC3D são:

- testar a rotina de geração de malha. A frente da trinca cresce mais rapidamente na região sob tensões máximas de tração. A rotina de geração da malha deve ser eficiente para evitar elementos distorcidos durante a propagação da trinca.

- testar a hipótese de suavização da frente da trinca.

- considerar o limiar de propagação na hipótese de propagação da trinca.

- testar a hipótese de direção da propagação da trinca bidimensional.

- Testar a influência das regras de ajustes da taxa de propagação na geometria da trinca. Essa geometria da trinca ocasiona valores de FIT nulos a valores positivos. Estes valores de FIT positivos podem estar numa região com comportamento complexo da taxa de propagação. Ao contrário da regra de Paris,

o modelo de Hall (Hall et al., 1974) considera este comportamento. Desta forma, foi testada a sensibilidade da geometria da trinca usando a regra de Paris e regra de Hall.

- Propor expressões simplificadas do FIT na frente da trinca, a partir das análises numéricas. A primeira aplicação destas expressões é padronizar expressões de FIT para os corpos-de-prova sob flexão pura com contato, para poder reproduzir esses ensaios. Uma segunda aplicação dessas expressões é que elas podem ser utilizadas para prever a vida em placas sob carregamentos complexos no programa **ViDa** (Castro & Meggiolaro, 2009), por exemplo.

- Verificar a similaridade das taxas de propagação da trinca passante com as taxas da trinca de superfície.

Existe uma extensa literatura sobre trincas curvas, entretanto poucos trabalhos trataram o problema a partir de um defeito de trinca passante. Assim, são inéditos experimentos com contato das faces da trinca.

Outra contribuição deste trabalho é servir como teste em programas numéricos de propagação de trinca tridimensional. Esses programas devem reproduzir restrições do problema de contato, ter uma rotina robusta de geração de malha e ter hipóteses de propagação que eliminem singularidades por causa de uma quina.

Adicionalmente, o problema tratado nesta tese verifica as hipóteses de direção de crescimento em uma trinca bidimensional. Usualmente, são encontradas hipóteses eficientes para o crescimento da trinca unidimensional (trinca passante e reta) e para crescimento de trinca tridimensional. Entretanto, não foram encontradas pela autora hipóteses adequadas de direção de crescimento no plano de trincamento. Neste trabalho é sugerida uma nova hipótese de direção de crescimento da trinca de superfície.

## **1.5. Organização do trabalho**

No primeiro capítulo foi feita a introdução a esta pesquisa. No Capítulo 2 são selecionados tópicos com conceitos e relações importantes aplicados ao fator de intensidade de tensão, assumindo as hipóteses de mecânica da fratura linear

elástica. No Capítulo 3 são apresentados os ajustes de curva de taxa de propagação, hipóteses de similaridade e procedimento para propagação da trinca por fadiga em um plano, destacando-se a aplicação em frentes de trincas com distribuição de FIT. No Capítulo 4 são descritos o projeto dos experimentos para sua execução e são apresentados os resultados.

Nos Capítulos 5, 6 e 7 são realizadas as investigações numéricas no programa tridimensional de mecânica da fratura, o FRANC3D. No Capítulo 5 avaliam-se separadamente os parâmetros usados na reconstrução do crescimento da trinca. Complementarmente, são apresentadas as hipóteses simplificadoras usadas nestes três capítulos (Capítulos 5, 6 e 7). No Capítulo 6 reproduz-se o crescimento incremental da trinca usando dois ajustes diferentes de curva  $da/dN - \Delta K$ , permitindo-se assim conhecer a sensibilidade do crescimento incremental à curva  $da/dN - \Delta K$ . No Capítulo 7 investigam-se as distribuições do FIT nas geometrias de trincas obtidas nos corpos-de-prova ensaiados. Com base nestas distribuições, determinam-se soluções de FIT. Adicionalmente, são feitas estimativas de vida e comparações destas estimativas com a vida medida em um ensaio de flexão pura.

Finalmente, no Capítulo 8 são discutidos os avanços alcançados e recomendações de futuras pesquisas nesta área.