

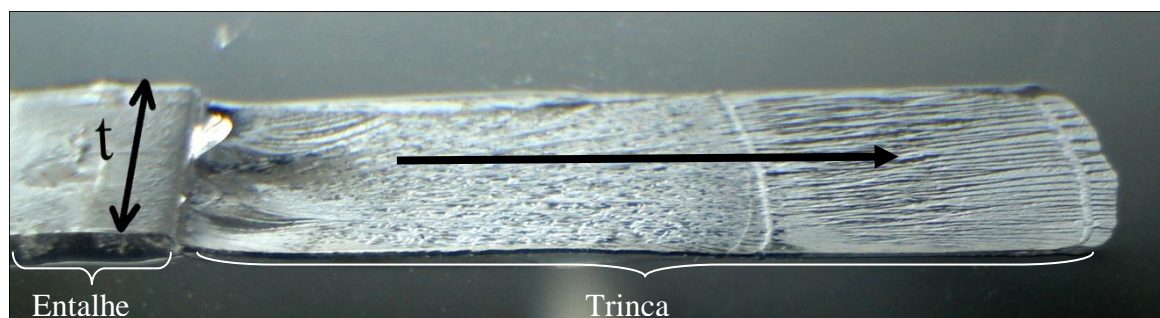
# 1 Introdução

Este trabalho trata da propagação das trincas por fadiga que inicialmente têm uma abordagem de trinca bidimensional e depois, com a propagação, passa por uma fase de transição até apresentar um comportamento de trinca unidimensional. Quando uma trinca bidimensional é gerada, ela se propaga crescendo em duas direções. Ainda nessa fase, existem soluções analíticas para representar o crescimento da trinca. Na fase de transição, da trinca bidimensional para unidimensional, ainda não existem soluções que permitam calcular a forma da frente de trinca, assim como a sua vida à fadiga. Esse é o problema abordado por esta dissertação. Para isso, são realizados testes experimentais para verificar essa transição do comportamento dessas trincas. Como as trincas bidimensionais crescem para dentro do material, é utilizado aqui um material transparente que permite acompanhar o crescimento da trinca internamente no material.

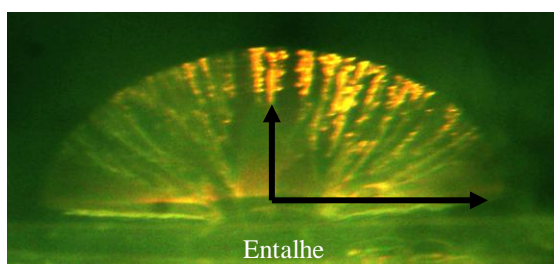
A falha por fadiga em estruturas metálicas é um fenômeno já conhecido em engenharia. Ao longo do último século, a engenharia tem aprendido que a aplicação de carregamento cíclicos variáveis ao longo do tempo pode dar início ao mecanismo de fadiga num material. Uma estrutura submetida a uma tensão cíclica pode romper a uma tensão inferior do que aquela necessária para produzir fratura devido a uma única aplicação de carga estática, ou seja, inferior ao limite de resistência estático do material, ou, em ocasiões, inferior à tensão de escoamento. Fadiga é caracterizada pela geração e/ou pela propagação paulatina de uma trinca num corpo. A trinca é gerada pela gama das deformações  $\Delta\varepsilon$  ou das tensões atuantes  $\Delta\sigma$  atuantes em algum ponto crítico da peça. No entanto, o fenômeno da propagação da trinca é relacionado com a gama do fator de intensidade de tensões  $\Delta K$ , um parâmetro que fornece a intensidade das tensões em torno da ponta da trinca, o qual é perpendicular a máxima tensão normal trativa (Castro & Meggiolaro, 2009). Usualmente, a trinca de fadiga é iniciada em um entalhe, um furo, uma descontinuidade geométrica ou defeito produzido por dano mecânico que provoca um ponto de concentração de tensões.

Quanto maior a concentração de tensões na estrutura, menor será o número de ciclos para a iniciação da trinca. Depois do surgimento da trinca, o efeito da concentração de tensão se torna maior e a trinca começa então a crescer de tamanho rapidamente ou propagar. O processo de fadiga termina quando o valor do máximo fator de intensidade de tensões,  $K_{max}$ , atinge o valor da tenacidade a fratura do material. Fatores como carregamento, geometria, propriedades dos materiais e ambiente externo afetam a resistência de componentes estruturais e da fadiga.

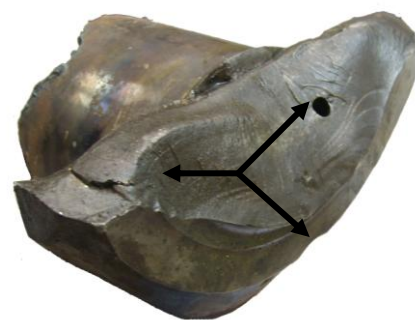
O crescimento das trincas bidimensionais por fadiga comparado com as unidimensionais é comum nas estruturas. Por exemplo, elas podem aparecer em vasos de pressão, dutos, tanques, componentes de carros, estruturas metálicas, usinas nucleares, navios, etc. A Figura 1.1 mostra três diferentes tipos de trincas, unidimensional ou passante, bidimensional (também dita superficial) e tridimensional.



a)



b)



c)

Figura 1.1- a) Trinca 1D ou passante propagando dentro um material transparente (poli-carbonato). b) Trinca 2D ou bidimensional, PMMA. c) Trinca 3D ou tridimensional, falha por fadiga em um virabrequim de motor de navio. (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

Uma trinca 2D pode surgir através de distintos tipos de mecanismos de falha, tais como defeitos gerados durante a fabricação do material (vazios, inclusões, impurezas), fabricação ou montagem da peça (soldas defeituosas ou tensões residuais excessivas), descontinuidade geométrica (seções afiadas, mudanças abruptas de seção, aberturas, buracos, entalhes), dano (sobrecarga, corrosão).

Quando as trincas crescem, elas tendem a manter um padrão elíptico independente da forma original do entalhe (Castro & Meggiolaro, 2009). A Figura 1.2 mostra um trinca de fadiga gerada e propagada a partir de um entalhe retangular inicial mudando após alguns ciclos para um formato semi-elíptico (isso também será demonstrado no capítulo 4).

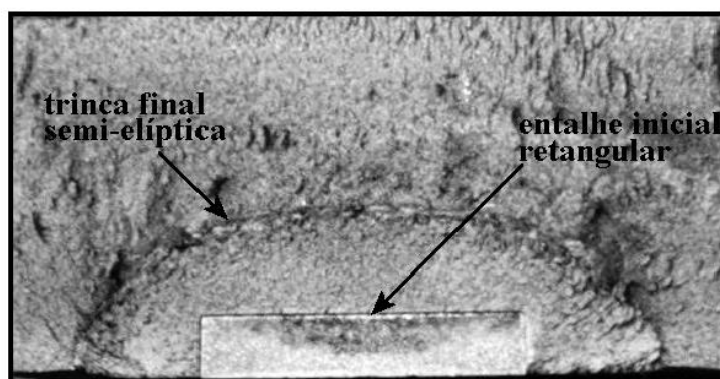


Figura 1.2- Trinca semi-elíptica gerada a partir de um entalhe retangular (Fadiga sob Cargas de Serviço, Castro & Meggiolaro, 2009)

A Figura 1.3 mostra exemplos de trincas bidimensionais localizadas em componentes estruturais industriais (vaso de pressão, válvula e tubulação) que trabalham sob pressão cíclica. Esses componentes são candidatos para o crescimento de trincas bidimensionais por fadiga devido à pressão cíclica que é submetida a eles.

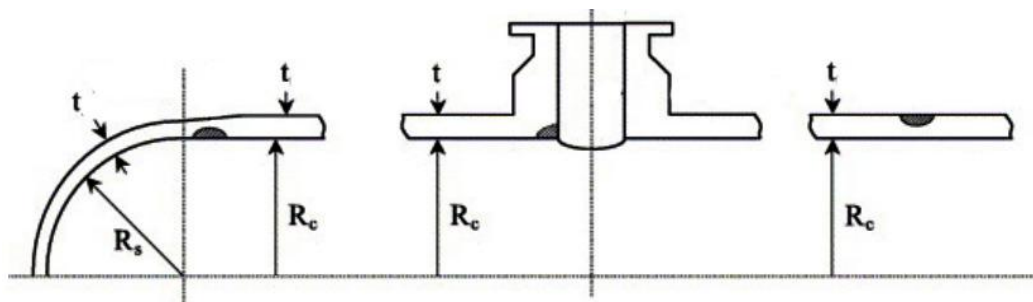


Figura 1.3- Trincas semi-elípticas e de canto em vasos de pressão, válvulas e dutos.

O estudo da previsão e análise de trincas bidimensionais (2D) é muito importante na área de engenharia, pois ela cresce internamente no material e desse modo é difícil a sua detecção por inspeção visual. Assim como as trincas passantes, a existência das trincas 2D pode levar a grandes catástrofes e sérios problemas na integridade das estruturas. Por exemplo, em março de 1980, a catástrofe da plataforma semi-submersível de perfuração *Alexander Kielland* matou a 123 pessoas enquanto trabalhava no reservatório de petróleo Ekofisk (Escócia). O reporte da investigação concluiu que a plataforma colapsou devido a uma trinca de fadiga num dos seis suportes estruturais da plataforma, Figura 1.4. As tensões cíclicas geradas sobre a jaqueta pelo mar do Norte incrementaram a concentração de tensões numa seção onde estava localizado um Hidrofone (permite a escuta de sons debaixo de água) onde a solda era muito pobre e tinha fissuração a frio provocada pelo hidrogênio na soldagem (*cold cracking*).

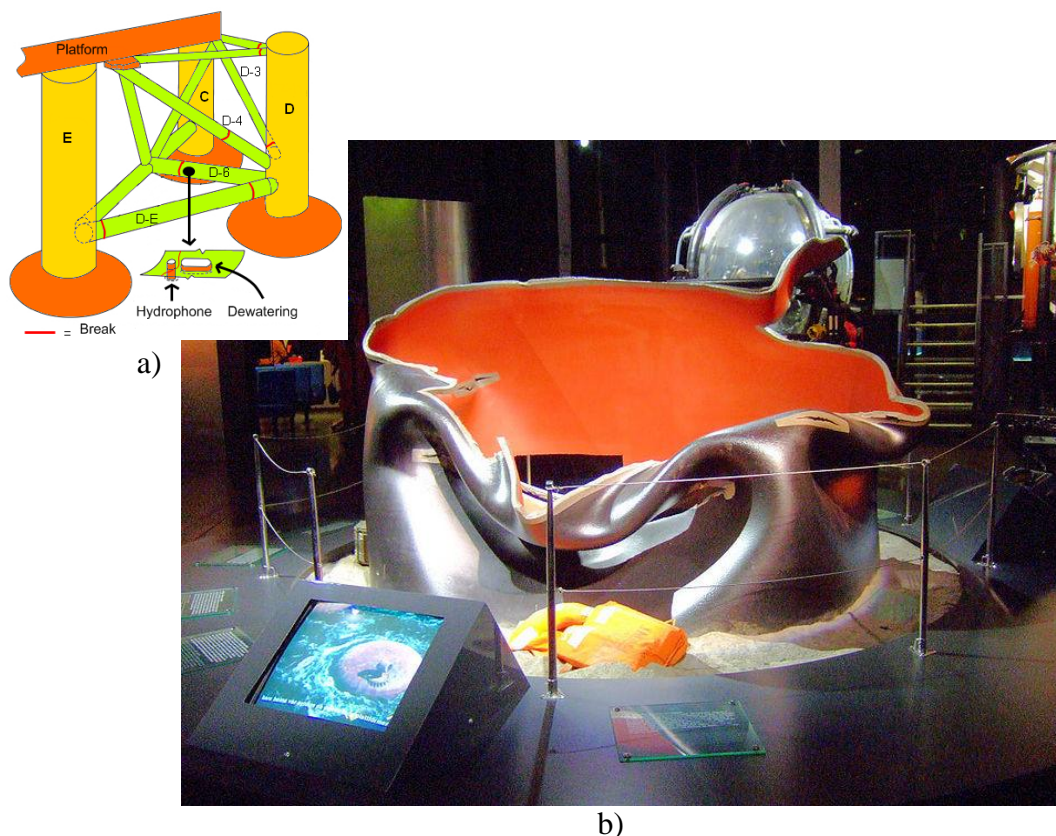


Figura 1.4- Parte da perna afetada por trincas de fadiga bidimensional na catástrofe da plataforma semi-submersível *Alexander Kielland* a) Plataforma b) Seção Afetada , (*Norwegian Petroleum Museum*)

A vida total de uma placa, como a mostrada na Figura 1.5, não está necessariamente ligada ao critério de que a placa falha ou fratura ao atingir a face oposta ou traseira, independentemente se o fator de intensidade de tensões  $K_I(a)$  na direção  $y$  seja menor do que  $K_I(c)$  na direção  $x$ . Para calcular a vida total da placa é preciso modelar a transição da trinca superficial 2D para uma trinca passante 1D através da suposição de uma face traseira, a qual vai permitir uma propagação da trinca ao longo do semi-eixo  $x$  até a frente da trinca se transformar de 2D a uma trinca 1D.

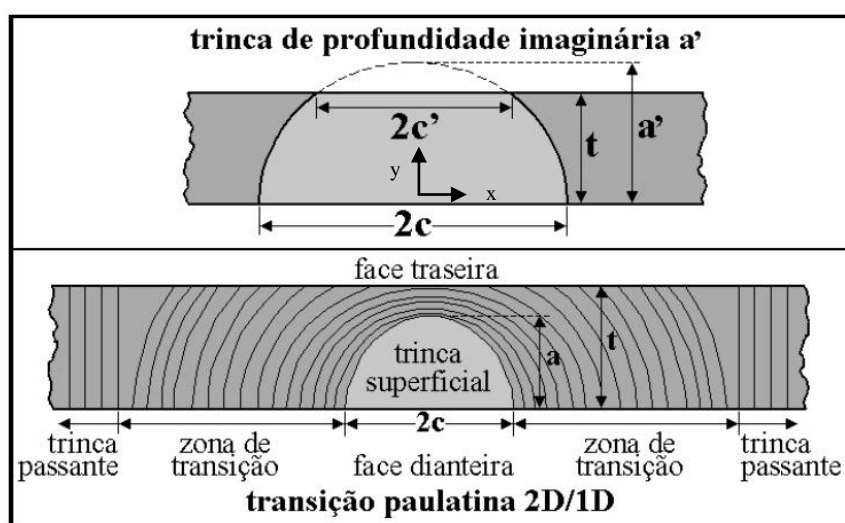


Figura 1.5- Transição de uma trinca superficial 2D para uma trinca passante 1D (Fadiga sob Cargas de Serviço, Castro & Meggiolaro, 2009)

### 1.1. Motivação

O trabalho está motivado em conhecer o comportamento do processo de transição da trinca superficial 2D para uma trinca passante 1D por fadiga. O processo de transição não tem sido acompanhado por estudos experimentais nem analíticos devido a que acontece abruptamente e em poucos ciclos. A transição pode ser catastrófica e produzir muito dano nas estruturas quando uma trinca bidimensional está atravessando uma determinada espessura de parede e mudando de forma.

Quando uma trinca 2D entra num processo de transição ela pode alcançar rapidamente grandes comprimentos em poucos ciclos, se deslocando rapidamente ao longo da estrutura, um bom exemplo para explicar esse avanço desmesurado é mostrado na Figura 1.6 onde se mostra o resultado de um ensaio de fadiga de flexão



em 4 pontos (Rifani & Grandt, 1996). Um trinca quarto-elíptica se propaga bidimensionalmente através da perna esquerda do espécime *Duplo T* até quase penetrar na face traseira da perna em 60923 ciclos. Após disso a trinca cresce aceleradamente e corta completamente o espécime em 80 ciclos, no entanto, a maior parte deste crescimento, cerca de uma polegada, foi feita em um **único ciclo**. Depois de esse deslocamento abrupto a trinca continua se propagando através do resto do espécime.

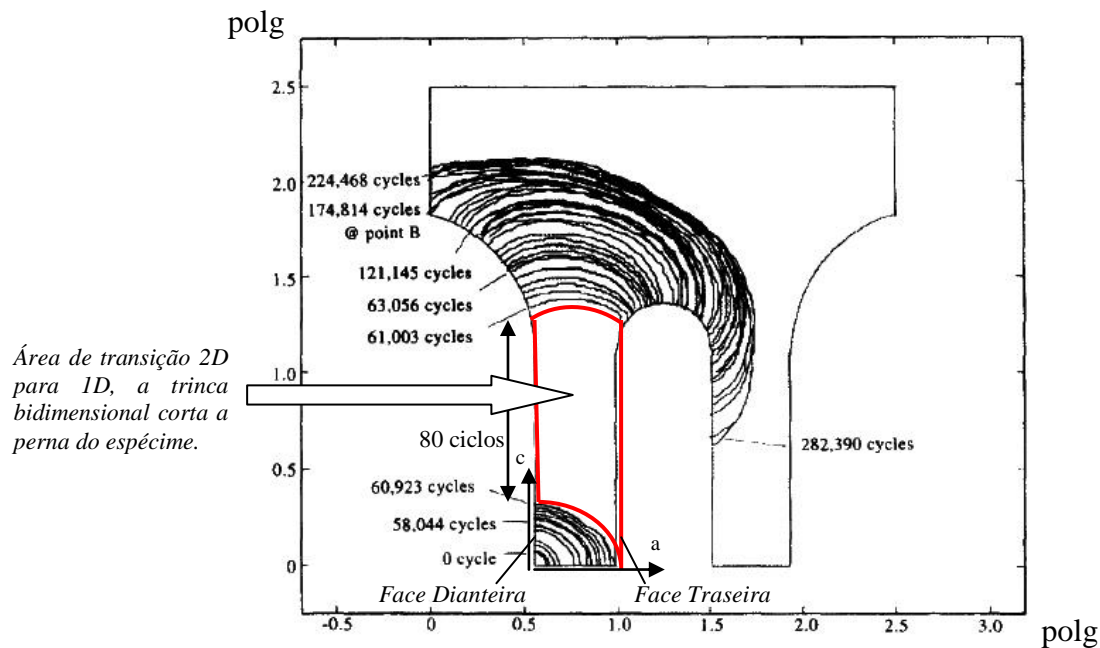


Figura 1.6 - Perfis de trinca de fadiga obtidos para o modelo duplo T carregada em quatro pontos de flexão. Transição da trinca 2D para 1D em 80 ciclos.

O limite de validade das equações usadas para a propagação de trinca bidimensional não termina quando a frente da trinca atinge a face traseira da placa. Considerando-se que a previsão da vida útil de estruturas submetidas à fadiga é de ampla importância numa estrutura, existe a necessidade de entender em que medida a zona de transição vai afetar a vida útil de uma estrutura quando ocorre esse tipo de propagação de trinca bidimensional.

## 1.2.Revisão Bibliográfica

Esta seção revisa alguns ensaios que têm sido desenvolvidos para a caracterização da propagação de trincas bidimensionais. A literatura científica não abrange muito do que ocorre na transição.

Park (2006) obteve experimentalmente em furos de fechamento cônicos o valor do fator de intensidade de tensões para trincas simples em um modelo de trincas duplamente simétrico localizadas em furos de fechamento cônicos. O material usado foi *polimetilmetacrilato* (PMMA), um polímero transparente comumente conhecido com acrílico. O comportamento desse material tem uma caracterização linear na curva  $da/dN$  versus  $\Delta K$ , sendo  $a$  um comprimento característico da trinca,  $N$  o número de ciclos do carregamento e  $\Delta K$  a variação do fator de intensidade de tensões, onde os eixos são plotados em log-log. Além disso, a transparência deste material permite ver as superfícies internas durante o ensaio de fadiga.

Em 1996, Rifani & Grandt determinaram o crescimento de trinca por fadiga de trincas de canto localizadas em uma viga com formato complexo duplo-T na seção transversal, Figura 1.6. O objetivo principal daquela pesquisa em PMMA foi determinar as mudanças da forma da trinca superficial quando ela cresce desde uma área localizada numa das pernas do corpo de prova até atingir a porção mais extensa do corpo de prova. Os resultados indicaram que as trincas retardam o seu crescimento uma vez que ela corta a seção de uma perna do corpo de prova duplo-T. Foi também estudado que o retardo no crescimento da trinca principal acontece se uma segunda trinca se desenvolve na perna oposta.

O trabalho desenvolvido por Ingraffea & Wawrzynek (1997) expõe experimentalmente a propagação das trincas 3D em uma liga de alumínio (AA) 2219-T851 onde se determinam as diferentes zonas de transição de crescimento das trincas, onde as frentes da trinca crescem em diferente magnitude. Esses testes não mostraram diretamente a propagação da frente da trinca bidimensional. Para conseguir medir a propagação da trinca foi usada a técnica de queda de potencial, além do uso de *strain-gages* tipo Krak-Gage colados no corpo-de-prova. Para a modelagem da trinca foi usado o FRANC3D, que é um pré e pós-processador tridimensional desenvolvido para a simulação de crescimento de trincas. O programa FRANC3D pode ser usado para extrair parâmetros apropriados da mecânica da fratura, propagando uma o mais trincas

as quais podem ou não ser planares. A Figura 1.7 mostra uma trinca quarto - elíptica se propagando num ensaio de flexão em 4 pontos por fadiga. A relação

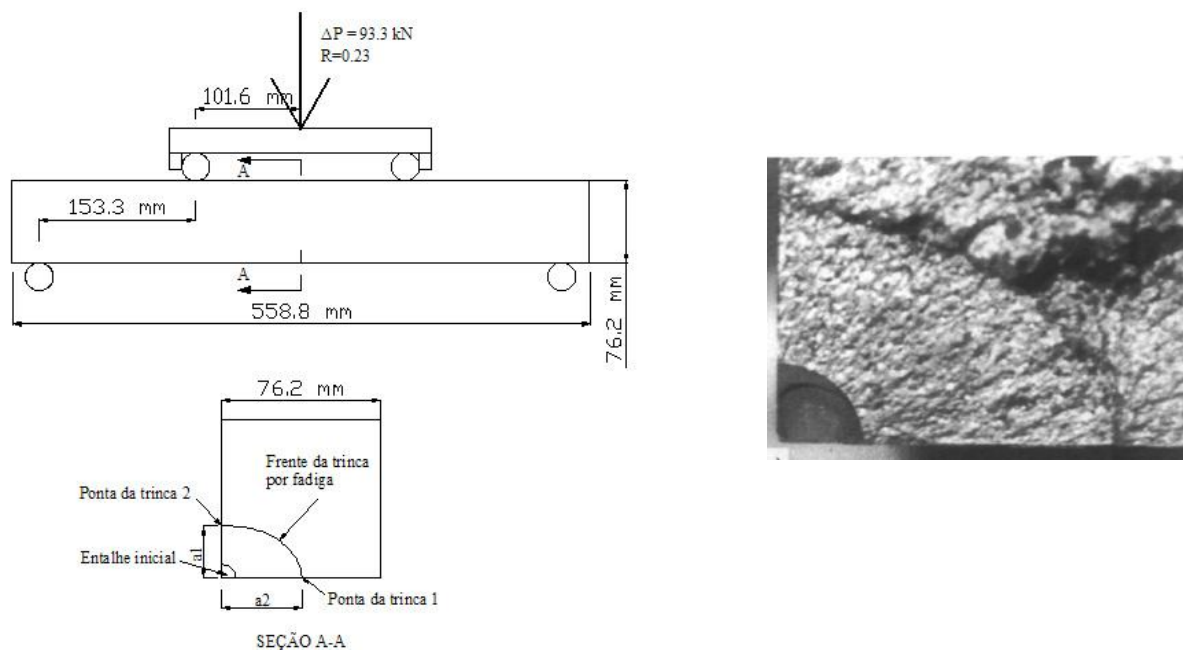


Figura 1.6- a) Geometria e condições de contorno para o Ensaio 1. b) Resultado do Ensaio (Ingraffea, 1997)

No segundo ensaio, Figura 1.8, os comprimentos  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  determinam as diferentes zonas de transição de crescimento das trincas. As frentes da trinca crescem em diferente magnitude: a primeira transição ocorre quando a ponta da trinca 1 alcança a esquina  $\beta$  a segunda transição ocorre quando a ponta da trinca 2 alcança a esquina  $\beta$ .

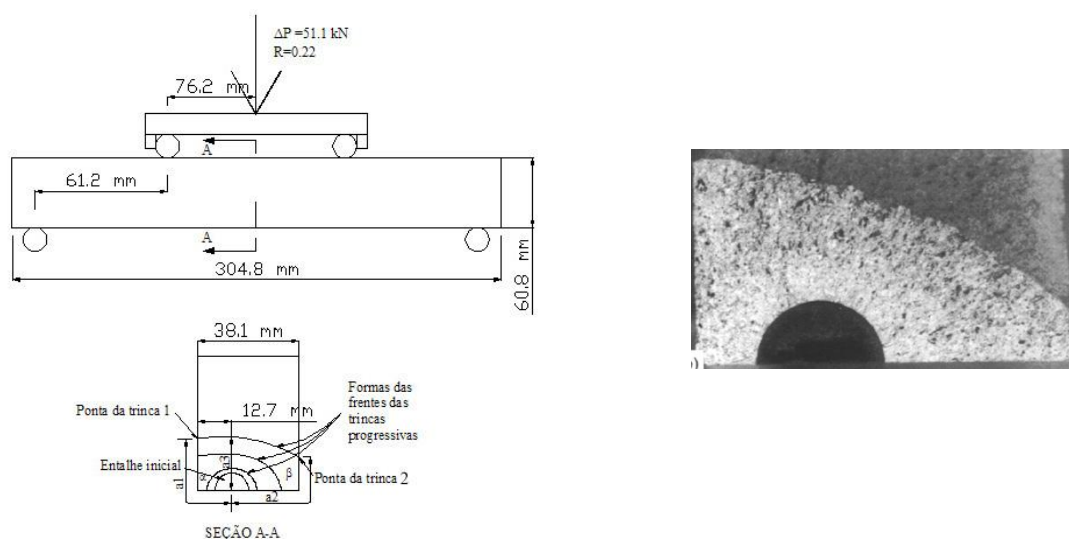


Figura 1.8- a) Geometria e condições de contorno para o Ensaio 2. b) Resultado do Ensaio (Ingraffea, 1997)



No terceiro ensaio, Figura 1.9, os comprimentos  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  determinam as diferentes zonas de transição de crescimento das trincas. As frentes da trinca crescem em diferente magnitude: a primeira transição ocorre quando a ponta da trinca 1 alcança a esquina  $\alpha$  a segunda transição ocorre quando a ponta da trinca 2 alcança a esquina  $\beta$ .

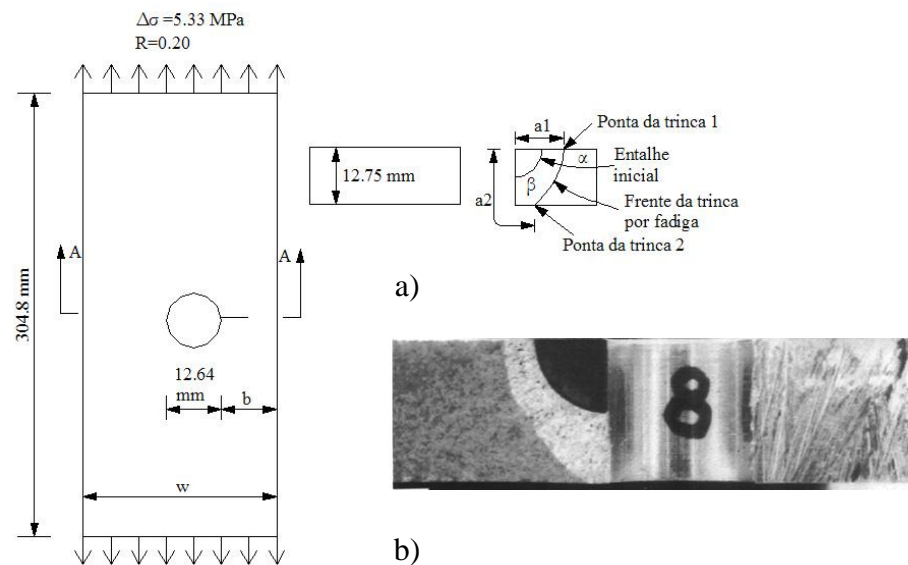


Figura 1.9 - a) Geometria e condições de contorno para o Ensaio 3. b) Resultado do Ensaio (Ingraffea, 1997).

Heyder & Kuhn (2005), fizeram ensaios experimentais sob condições de carregamento em modo I e modo II, usando corpos de prova tipo C(T) feitos em PMMA, com a finalidade de observar e documentar a seqüência das frentes da trinca 3D através de medições fotográficas.

### 1.3 Objetivos da Dissertação

O objetivo principal desta pesquisa é o estudo experimental da zona de transição de uma trinca quarto-elíptica quando esta passa de um formato 2D para 1D usando um polímero transparente e com boas propriedades mecânicas. Como objetivo secundário caracterizar as propriedades de propagação de trincas de fadiga no policarbonato para obter a taxa de crescimento de fadiga  $da/dN$  versus  $\Delta K$ . O terceiro objetivo do trabalho é fazer uma modelagem numérica usando os dados experimentais

tanto da propagação bidimensional 2D quanto da transição 2D-1D obtidos experimentalmente e compararmos conjuntamente com o software de elementos finitos ABAQUS (*Finite Element Analysis*) e o software de elementos de contorno FRANC3D (*3D Fracture Analysis Code*).

#### 1.4 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está dividido em sete capítulos. O primeiro capítulo dá uma introdução ao trabalho e apresenta os objetivos da dissertação. No segundo capítulo são apresentados os conceitos e fundamentos da mecânica da fratura linear elástica. Os conceitos da teoria da propagação de trincas bidimensionais são explicados no terceiro capítulo. O capítulo quatro descreve os procedimentos de ensaio e investigação no âmbito do tema em estudo sobre os materiais, equipamentos e tipo de corpos de prova usados para o estudo da transição 2D para 1D, e também provê a parte experimental desenvolvida para obter as propriedades a fadiga do material utilizado. O capítulo cinco constitui o principal capítulo, pois mostra os resultados obtidos experimentalmente e a avaliação dos fatores de intensidade de tensão  $K_I(a)$ ,  $K_I(c)$ ,  $K_I(c')$ , através dos quais conheceremos o comportamento da transição da trinca bidimensional, também é mostrada a fractografia realizada em um dos ensaios com o intuito de conhecer os dados das marcas de fadiga tanto da propagação 2D quanto da transição 2D-1D que são usados como dados de entrada na modelagem numérica. No capítulo seis é feita a modelagem numérica com o ABAQUS e FRANC3D no qual são comparados os resultados experimentais e das simulações. As conclusões e sugestões deste trabalho são detalhadas no capítulo sete. Na parte final da dissertação são listadas as referências usadas ao longo do trabalho.