



Guillermo Rodolfo Jordan Ibañez

Transição de Trincas Bidimensionais para Unidimensionais

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha

Co-orientador: Prof. Antonio Carlos de Oliveira Miranda

Co-orientador: Prof. Timothy Hamilton Topper

Rio de Janeiro

Agosto de 2010



Guillermo Rodolfo Jordan Ibañez

Transição de Trincas Bidimensionais para Unidimensionais

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Área de Concentração: Estruturas.

Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Timothy Hamilton Topper

Co-Orientador

University of Waterloo

Prof. Antonio Carlos de Oliveira Miranda

Co-Orientador

UnB

Prof. Jaime Tupiassú Pinho de Castro

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Marco Antonio Meggiolaro

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. José Alexander Araújo

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de Agosto de 2010

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Guillermo Rodolfo Jordan Ibañez

Gradou-se em Engenharia Mecânica na Universidad Técnica de Oruro - Bolivia em 2001.

Ficha Catalográfica

Jordan Ibañez, Guillermo Rodolfo

Transição de trincas bidimensionais para unidimensionais / Guillermo Rodolfo Jordan Ibañez ; orientador: Luiz Fernando Martha ; co-orientador: Antonio Carlos de Oliveira Miranda; Timothy Hamilton Topper. – 2010.

171 f. : il. (color.) ; 1.7 cm

Dissertação (mestrado)-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Transição bidimensional. 3. Trinca. 4. Fadiga. 5. Policarbonato. 6. Propagação. 7. Elementos finitos. I. Martha, Luiz Fernando. II. Miranda, Antonio Carlos de Oliveira. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

À vida do meu irmão o melhor presente da minha vida.

Agradecimentos

A minha mãe, pela fortaleza, dedicação e carinho que me deu a vida toda e pela compreensão da distancia de todos estes anos.

Ao Eduardo Achá.

Ao Professor Antonio Miranda pela orientação, ensino, paciência e confiança comigo durante o desenvolvimento da tese.

Ao Professor Timothy Topper, pela grande ajuda e contribuição nos momentos difíceis desta tese.

Ao Professor Luiz F. Martha pelo imenso apoio na reta final desta tese.

Ao Professor Jaime Tupiassú pelas sábias sugestões, paciência e o grande apoio no laboratório ao longo desta tese.

Ao Gerardo Castillo pela ajuda ilimitada em cada momento.

Aos amigos da vida Walter Philippon e Maria Martinez pelo seu apoio em vários momentos de transição.

Aos amigos do laboratório: Marcos, Jesús, Sabrina, Hugo, Jaiminho, Rafael, por fazer do laboratório um lugar de trabalho agradável e feliz.

A Wagner Nahas, German Gonzales, Antonio Pellisari, Paul Ledezma, Pablo Perdomo, Antonio Nunes, por sua amizade, alegria e apoio.

A Heitor Guimarães, Freddy Ferreira, Marcos Henrique pela ajuda na fractografia.

A Teresa Brasil pelo seu apoio e carinho.

Ao Bruce Carter da Universidade de Cornell pela ajuda prestada no uso do FRANC3D.

A Sylvania Silva administradora da loja ``Casa do Acrílico`` pela confiança inicial depositada em mim fornecendo o acrílico e policarbonato para fazer os pré-ensaios desta tese.

Ao Departamento de Engenharia Civil e Mecânica da PUC-Rio, seus professores e seus funcionários pela colaboração e ensino.

A CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela ajuda financeira.

A todas aquelas pessoas que de alguma outra forma participaram no desenvolvimento da dissertação.

Ao Brasil por sua cultura, alegria e ensino.

Resumo

Jordan Ibañez, Guillermo Rodolfo; Martha, Luiz Fernando Campos Ramos; Topper, Timothy Hamilton; Miranda, Antonio Carlos de Oliveira. **Transição de Trincas Bidimensionais para Unidimensionais**. Rio de Janeiro, 2010. 171p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A falha por fadiga nas estruturas é um problema muito comum que é caracterizado pela geração e propagação paulatina de uma ou varias trincas, causada pela aplicação cíclica de cargas variáveis. Uma trinca é considerada unidimensional quando sua trajetória pode ser representada por uma curva, como no caso em que a superfície da trinca transpassa toda a espessura de uma peça. Quando a trinca penetra parcialmente na peça, ela é considerada bidimensional. Modelos matemáticos e físicos para a simulação de propagação de trincas unidimensionais por fadiga são de amplo conhecimento, e o principal parâmetro que controla a propagação é o fator de intensidade de tensão. Entretanto, a simulação da propagação de trincas bidimensionais ainda não tem o mesmo estado de desenvolvimento. Existem algumas expressões empíricas para trincas bidimensionais fornecidas na literatura que ajudam a descrever os fatores de intensidade de tensão. Essas equações estão limitadas a diversos fatores de forma que relacionam as características geométricas da peça, espessura, largura e o tipo de entalhe já que as trincas bidimensionais mudam de aspecto a cada ciclo de carga. Também existem métodos numéricos que ajudam a descrever aproximadamente valores do fator de intensidade de tensões ao longo da frente de uma trinca bidimensional. Uma questão importante nesse tipo de simulação é a transição de uma trinca parcialmente penetrante (bidimensional) para uma situação unidimensional (trinca passante), pois para calcular a vida total de uma trinca por fadiga é preciso também modelar a transição. Contudo, esse processo de transição não tem sido acompanhado por estudos experimentais nem analíticos. Um motivo para isso é que a transição acontece em poucos ciclos da aplicação da carga, o que dificulta a sua medição. Esta pesquisa tem como objetivo geral estudar o processo de transição das trincas bidimensionais para unidimensionais com a utilização de um material transparente e com boas propriedades mecânicas,

como é o policarbonato. Foram realizados experimentos de propagação de trincas em placas com seção transversal retangular desse material. Em cada experimento, uma trinca foi induzida como um defeito com forma quarto-elíptica em uma das esquinas do corpo de prova. A propagação foi controlada com aplicações de cargas cíclicas de baixa frequência. Para calcular a vida total de uma trinca por fadiga, foram medidos valores de comprimentos característicos da forma da trinca bidimensional (a , c e c') no processo de transição, o que permitiu avaliar as taxas de variação desses parâmetros com o número de ciclos N da carga aplicada (da/dN , dc/dN e dc'/dN) e avaliar os fatores de intensidade de tensão normalizados que controlam a transição. Os valores experimentais são também usados como dados de entrada para um programa de análise numérica de propagação de trincas, o FRANC3D, o qual nos permite calcular e comparar os fatores de intensidade de tensão ao longo da frente da trinca quarto – elíptica.

Palavras – chave

Propagação de trinca Bidimensional; Fadiga; Transição; Policarbonato; Elementos Finitos

Abstract

Jordan Ibañez, Guillermo Rodolfo; Martha, Luiz Fernando Campos Ramos; Topper, Timothy Hamilton; Miranda, Antonio Carlos de Oliveira **Transition of Two Dimensional Cracks to One-Dimensional**. Rio de Janeiro, 2010. 171p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The fatigue failure of structures is a common problem that is characterized by the generation and propagation of one or several cracks caused by the cyclic application of variable loads. A crack is considered one-dimensional when the trajectory can be represented by a curve, as in the case where a surface crack pierces the entire thickness of a piece. If the crack penetrates partially in the specimen, it is considered to be two dimensional. Mathematical and physical models for simulating one-dimensional crack propagation by fatigue are widely known, and the main parameter that controls crack propagation is the stress intensity factor. However, the simulation of two-dimensional crack propagation has not yet reached the same state of development. There are some empirical expressions for two-dimensional cracks provided in the literature that help describe the stress intensity factors. These equations are limited to various form factors that relate the stress intensity to the geometrical characteristics of the piece. Also there are numerical methods that help describe some of the values of stress intensity factor along the crack front of a two-dimensional crack. An important question in calculating the total life of fatigue crack is describing the transition from a crack partially penetrating (two dimensional) for a one-dimensional (passing crack), because to calculate the total life of a fatigue crack is also necessary to model the transition. However, this process of transition has not for many geometries been described by analytical or experimental studies. One reason for this is that the transition often happens in a few cycles of load application, which complicates measurements. This research was aimed at investigating the process of transition from the two-dimensional crack to a one-dimensional crack with the use of polycarbonate a transparent material with good mechanical properties, polycarbonate. Experiments were conducted involving crack propagation in plates with a rectangular cross section. In each experiment, a

crack was induced as a defect with a quarter-elliptical shape in one corner of the specimen. The propagation affected by the application of a low-frequency cyclic loading. Values of characteristic lengths of the two-dimensional shape of the crack (a , c and c') were measured during the transition process, which allowed us to evaluate the rates of change of these parameters with the number of cycles N applied load and to evaluate the normalized stress intensity factors that control the transition. The experimental values are also used as input to a program for numerical analysis of crack propagation, the FRANC3D, which allows us to calculate the stress intensity factors along the front quarter-elliptical crack.

Keywords

Two-dimensional crack propagation; Fatigue; Transition; Polycarbonate; Finite Elements.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	25
1.1.	Motivação	29
1.2.	Revisão Bibliográfica	31
1.3.	Objetivos da Dissertação	33
1.4.	Estrutura da Dissertação	34
2.	FUNDAMENTOS DE ELASTICIDADE E DA MECÂNICA DA FRATURA LINEAR ELÁSTICA (MFLE)	35
2.1.	Relações Tensão – Deformação	35
2.1.1.	Função de Airy	37
2.2.	Fundamentos da Mecânica da Fratura Linear Elástica	38
2.2.1.	Concentração de Tensões	38
2.2.2.	Furo Circular	40
2.2.3.	Furo Elíptico	41
2.3.	Trincas e Fator de Intensidade de Tensões	43
2.4.	Propagação de Trincas por Fadiga	46
2.4.1.	Curva da/dN versus ΔK	46
2.4.2.	Ciclos de Tensão de Fadiga	49
2.4.3.	Equações Semi- Empíricas de Propagação por Fadiga	50
2.5.	Mecânica da Fratura Elastoplástica	51
2.5.1.	Zona Plástica na Ponta da Trinca	52
2.6.	Fenômeno de Coalescimento das Trincas	53
2.6.1.	Coalescimento das Trincas Bidimensionais no Policarbonato	55
3.	PROPAGAÇÃO DE TRINCAS BI-DIMENSIONAL	58
3.1.	Introdução	58
3.2.	Trincas Superficiais ou Semi – Elípticas	59
3.2.1.	Trincas Semi-Elípticas, $a/t \leq 1$	62

3.2.2.	Trincas Semi-Elípticas, $a/t > 1$	63
3.3.	Trincas Bidimensionais de Canto Quarto - Elípticas	66
3.3.1.	Trincas Quarto-Elípticas, $a/t \leq 1$	68
3.3.2.	Transição de Trincas Quarto-Elípticas, $a/t > 1$	75
4.	ABORDAGEM EXPERIMENTAL	79
4.1.	Introdução	79
4.2.	Métodos de Aquisição de Dados	79
4.3.	Microscópio X-Y	80
4.4.	Maquina de Ensaio de Fadiga	81
4.5.	Comportamento dos Polímeros	81
4.6.	Pré- Ensaio com Polímeros	82
4.6.1.	Preparação do Corpo de Prova C(T)	82
4.6.2.	Ensaio do Corpo de Prova C(T)	83
4.7.	Lixado e Polimento dos Corpos de Prova	84
4.8.	Propriedades Mecânicas do Policarbonato	84
4.8.1.	Propriedades a Fadiga do Policarbonato	85
4.9.	Ensaio	87
4.9.1.	Preparação do Corpo de Prova ESE(T)	88
4.9.2.	Ensaio da/dN	89
4.10.	Problemas encontrados previa seleção do corpo de prova definitivo para ensaio de propagação bidimensional	90
4.11.	Preparação do Corpo de Prova C2D	92
4.12.	Ensaio Propagação de Trincas Bidimensional	93
4.13.	Preparação do Corpo de Prova para Ensaio de Tração	96
4.13.1.	Ensaio de Tração	96
5.	ANÁLISE DE RESULTADOS	98
5.1.	Pré – Ensaio	98
5.2.	Ensaio da/dN	107
5.3.	Resultados Ensaio de Propagação de Trincas Bidimensional	112
5.3.1.	Primeiro Caso – Fratura Frágil	113
5.3.2.	Segundo Caso- Alta plasticidade e <i>Tunneling</i>	121
5.3.3.	Terceiro Caso – Transição 2D-1D	126

5.4.	Fractografia da Propagação 2D e Transição 2D-1D	146
5.4.1.	Zona Plástica Epsilon	150
5.4.2	Problemas Encontrados na Experimentação dos C2D	151
5.5	Ensaio de Tração	152
6.	AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM UM MODELO NUMÉRICO	154
6.1.	Introdução	154
6.2.	Software para Simulação	155
6.3.	Modelagem Numérico da Transição Bidimensional para Unidimensional	156
7.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	164
7.1.	Conclusões	164
7.2.	Sugestões	165
	BIBLIOGRAFIA	168

Lista de Figuras

Figura 1.1.-	Tipos de Trincas	26
Figura 1.2.-	Trinca semi-elíptica gerada a partir de um entalhe retangular	27
Figura 1.3.-	Trincas semi-elípticas e de canto em vasos de pressão, válvulas e dutos.	27
Figura 1.4.-	Parte da perna afetada por trincas de fadiga bidimensional na catástrofe da plataforma semi-submersível <i>Alexander Kielland</i>	28
Figura 1.5.-	Transição de uma trinca superficial 2D em trinca passante 1D	29
Figura 1.6.-	Perfis de trincas de fadiga obtidos para o modelo duplo T carregada em quatro pontos de flexão	30
Figura 1.7.-	Ensaio 1 Trinca Bidimensional	32
Figura 1.8.-	Ensaio 2 Trinca Bidimensional	32
Figura 1.9.-	Ensaio 3 Trinca Bidimensional	32
Figura 2.1.-	Resistência em placas com e sem descontinuidades	38
Figura 2.2.-	Uma placa infinita com e sem defeito	39
Figura 2.3.-	Furo circular numa placa infinita	40
Figura 2.4.-	Furo elíptico	41
Figura 2.5.-	Concentração de tensão	43
Figura 2.6.-	Modos de carregamento das trincas	45
Figura 2.7.-	Crescimento paulatino de uma pequena trinca por fadiga	46
Figura 2.8.-	Ciclos do Fator de Intensidade de Tensões	47
Figura 2.9.-	Curva típica de propagação de trincas por fadiga, $da/dN \times \Delta K$	48
Figura 2.10.-	Ciclos de Tensão de Fadiga	50
Figura 2.11.-	Comparação de zonas plásticas versus elastoplásticas	52
Figura 2.12.-	Campo de tensões atuantes na ponta da trinca	53
Figura 2.13.-	Típica configuração usando FEM para coalescimento coplanar de trincas por fadiga	54
Figura 2.14.-	Simulação da propagação de uma fila de entalhes coplanares inicialmente semicirculares	54

Figura 2.15.- Interação de duas trincas coplanares, fenômeno de coalescimento	55
Figura 2.16.- Pré-Coalescimento, crescimento semi- elíptico de múltiplas trincas bidimensionais localizadas no meio de um entalhe ESE(T) (w,h,t) = (65mm, 297mm, 10mm), policarbonato	56
Figura 2.17.- Pré-Coalescimento, crescimento semi- elíptico de múltiplas trincas bidimensionais localizadas no meio de um entalhe, corpo de prova ESE(T) (w,h,t) = (65mm, 297mm, 10mm), policarbonato	56
Figura 2.18.- Coalescimento, crescimento semi-elíptico de múltiplas trincas bidimensionais localizadas no meio de um entalhe, corpo de prova ESE(T) (w,h,t) = (65mm, 297mm, 10mm), policarbonato	57
Figura 2.19.- Pós-Coalescimento, crescimento semi- elíptico de múltiplas trincas bidimensionais localizadas no meio de um entalhe, corpo de prova ESE(T) (w,h,t) = (65mm, 297mm, 10mm), policarbonato	57
Figura 3.1.- Barra com trinca semi - elíptica	58
Figura 3.2.- Definição das dimensões a e c das trincas 2D	59
Figura 3.3.- Comportamento da frente de uma trinca semi - elíptica para uma razão constante sob tensão remota	61
Figura 3.4.- Definição das dimensões a e c das trincas 2D, $a/t \leq 1$, $a/t > 1$	61
Figura 3.5.- Comportamento trinca semi – elíptica para diferentes razões a/t , $c/w=0.1$ e $a/c=1$	64
Figura 3.6.- Distribuição do Fator de Intensidade de tensões ao longo da frente da trinca para uma trinca semi - elíptica ($a/c=1$, $a/t=1, 0.75, 0.5, 0$, $c/w=0-1$, $h/w=1$, $\phi=0-\pi$)	65
Figura 3.7.- Distribuição do Fator de Intensidade de Tensões normalizado ao longo da frente da trinca para uma trinca semi – elíptica ($a/c=1$, $a/t=0.4$, $c/w=0.1$, $h/w=1$)	66
Figura 3.8.- Geometria de uma trinca quarto – elíptica. a) $a/c \leq 1$, b) $a/c > 1$	67
Figura 3.9.- Placa de largura w , espessura t com trinca de canto quarto-elíptica, em transição para passante)	68
Figura 3.10.- Distribuição da pressão numa trinca quarto- elíptica	68
Figura 3.11.- Simulação do comportamento de uma trinca quarto-elíptica para $a/c= 1$, $a/c=0.9$, $a/c=0.4$	69
Figura 3.12.- Distribuição do Fator de Intensidade de tensões ao longo da frente da	71

trinca quarto - elíptica ($a/c=0.2, a/t=1,0.75,0.5,0, c/w=0.1, h/w=1$)

- Figura 3.13.- Distribuição do Fator de Intensidade de tensões ao longo da frente da trinca para uma trinca quarto – elíptica
($a/c=0.2, a/t=1,0.75,0.5,0, c/w=0-1, h/w=1$) 71
- Figura 3.14.- Distribuição do Fator de Intensidade de tensões ao longo da frente da trinca quarto-elíptica ($a/c=0.5, a/t=1,0.75,0.5,0, c/w=0-1, h/w=1$) 72
- Figura 3.15.- Distribuição do Fator de Intensidade de tensões ao longo da frente da trinca para uma trinca quarto elíptica
($a/c=0.5, a/t=1,0.75,0.5,0, c/w=0-1, h/w=1$) 72
- Figura 3.16.- Distribuição do Fator de Intensidade de tensões ao longo da frente da trinca para uma trinca quarto elíptica
($a/c=1, a/t=1,0.75,0.5,0, c/w=0.1, h/w=1$) 73
- Figura 3.17.- Distribuição do Fator de Intensidade de tensões ao longo da frente da trinca para uma trinca quarto elíptica
($a/c=1, a/t=1,0.75,0.5,0, c/w=0-1, h/w=1$) 73
- Figura 3.18.- Distribuição do Fator de Intensidade de tensões ao longo da frente da trinca para uma trinca quarto elíptica, $a/t \leq 1$. 74
- Figura 3.19.- Placa retangular com trinca quarto- elíptica em transição para passante,
($c/w < 1, a'/t > 1$) 75
- Figura 3.20.- Placa com seção retangular com trinca quarto-elíptica em transição para passante, Fator de intensidade de tensões normalizado $K_I(c) / \sigma \sqrt{\pi c}$. 77
- Figura 4.1.- Microscópio X-Y 80
- Figura 4.2.- Corpo de Prova tipo *Compact Tension* utilizado nos Pre - ensaios de comportamento de material PMMA e PC 82
- Figura 4.3.- Pre-ensaios de fadiga com CPs tipo *Compact Tension* em PMMA e policarbonato montados na MTS 83
- Figura 4.4.- Lixado com diferente granulometria e pulimento 84
- Figura 4.5.- Relação entre o comprimento a e o numero de ciclos N para policarbonato tipo Lexan- 9030 86

Figura 4.6.- Crescimento de trinca por fadiga para diferentes temperaturas de recozimento	86
Figura 4.7.- Taxas de propagação de trincas por fadiga vs ΔK para vários plásticos e metais	87
Figura 4.8.- Usinado dos entalhes em corpos de prova tipo ESE(T)	88
Figura 4.9.- ESE(T) - <i>Eccentrically-Loaded Single Edge Crack Specimen</i> utilizado no ensaio da/dN para encontrar as propriedades a fadiga do material	88
Figura 4.10.- Ensaio de <i>K-Decreasing</i> e <i>K-Increasing</i> para conhecer as propriedades a fadiga do PC	90
Figura 4.11.- Montagem de um corpo de prova com dimensões 10x200x380mm e entalhe semi - elíptico no meio na placa	91
Figura 4.12.- Diferentes problemas encontrados na seleção da geometria do C2D-PC definitivo	92
Figura 4.13.- Dimensões do C2D-PC 10x47x365 mm	93
Figura 4.14.- Introdução do defeito de raio muito pequeno no C2D-PC com uso de um Gillette de barbear	93
Figura 4.15.- Arranjo de aquisição de dados para os ensaios de propagação bidimensional em trincas quarto – elípticas	94
Figura 4.16.- Arranjo dos dados obtidos para cada 0.5 mm de comprimento a . Usando duas câmaras de alta resolução e um microscópio X-Y	95
Figura 4.17.- Ensaio de tração uniaxial	96
Figura 5.1.- Nascimento de uma trinca semi - elíptica bidimensional localizada no meio do entalhe do corpo de prova CP-PC-010, (w,h,t) = (40mm, 40mm, 10mm), policarbonato, P = 400 N, N= 8902 ciclos	97
Figura 5.2.- Propagação da trinca em forma bidimensional localizada no meio do entalhe do corpo de prova CP-PC-010, (w,h,t) = (40mm, 40mm, 10mm), policarbonato, P = 400 N, N= 11529 ciclos	98
Figura 5.3.- Propagação semi - elíptica de uma trinca bidimensional localizada no meio do entalhe do corpo de prova CP-PC-010, (w,h,t) = (40mm, 40mm, 10mm), policarbonato, P = 400 N, N= 18084 ciclos	98
Figura 5.4.- Propagação semi - elíptica de duas trincas bidimensionais uma maior e outra menor localizadas no entalhe do corpo de prova CP-PC-010, (w,h,t) = (40mm, 40mm, 10mm), policarbonato, P = 400 N, N= 23772	99

ciclos

Figura 5.5.- Sobreposição fotográfica da propagação da trinca bidimensional antes de atingir as paredes do corpo de prova	99
Figura 5.6.- Comparação dimensional da propagação da trinca bidimensional para carregamento constante $P=400N$, CP-PC-010	100
Figura 5.7.- Comparação dimensional da propagação da trinca bidimensional para carregamento constante $P=400N$, CP-PC-010	101
Figura 5.8.- Iniciação de múltiplas trincas bidimensionais por fadiga em policarbonato	101
Figura 5.9.- Ensaio de fadiga em corpos de prova tipo CT-PP, PMMA	104
Figura 5.10.- Nascimento de trinca bidimensional, CP-PC-023	104
Figura 5.11.- Propagação de trincas, $C(T) (w,h,t) = (40mm, 40mm, 10mm)$ a) CP-PP-003 b) CP-PPB-007 c) CP-PC-014	105
Figura 5.12.- Propagação de trinca, comparação a vs N , CP-PC-023	106
Figura 5.13.- Ensaio de fadiga em corpos de prova tipo CT-PC, Policarbonato	106
Figura 5.14.- Comportamento a vs N do Policarbonato e PMMA	107
Figura 5.15.- Propriedade a fadiga do policarbonato	108
Figura 5.16.- Propriedade da/dN vs ΔK do policarbonato	109
Figura 5.17.- Comparação a vs N corpo de prova ESE(T)-02	110
Figura 5.18.- Comparação $f(a/w)$ vs a/w , corpo de prova ESE(T)-02	111
Figura 5.19.- Comparação P vs N , corpo de prova ESE(T)-02	111
Figura 5.20.- Comparação a vs ΔK corpo de prova ESE(T)-02	112
Figura 5.21.- Tipos de propagação bidimensional e transição 2D -1D	113
Figura 5.22.- Trinca Bidimensional $a/t \leq 1$	114
Figura 5.23.- Fratura frágil em trinca bidimensional $a/t < 1$	115
Figura 5.24.- Fratura frágil em trinca bidimensional $a/t < 1$, C2D-12	116
Figura 5.25.- Propagação Bidimensional e fratura frágil	117
Figura 5.26.- Propagação Bidimensional a,c vs. N	118
Figura 5.27.- Propagação Bidimensional a,c vs ΔK_{New_Raj} , ΔK_{Elber} , C2D-12	118
Figura 5.28.- Propagação Bidimensional ΔK_{New_Raj} vs ΔK_{Elber} , C2D-12	119
Figura 5.29.- Propagação Bidimensional (c/w) , (a/t) vs. $f(c/w)$, $f(a/t)$, C2D-12	119
Figura 5.30.- Propagação Bidimensional a vs. $f(a/t, c/w)_{calc_New_Raj}$ vs. $f(a/t, c/w)_{ajust_Elber}$, C2D-12	120

Figura 5.31.- Propagação Bidimensional c vs. $f(a/t, c/w)$ _calc_New_Raj vs. $f(a/t, c/w)$ _ajust_Elber, C2D-12	120
Figura 5.32.- Propagação 2D e Transição 2D-1D	122
Figura 5.33.- Sobreposição das fotografias tomadas no C2D-01	122
Figura 5.34.- Transição trinca bidimensional para unidimensional, C2D-01	123
Figura 5.35.- Transição de propagação de trinca bidimensional $a/t > 1$ para unidimensional	124
Figura 5.36.- Transição trinca bidimensional para unidimensional, C2D-05	125
Figura 5.37.- Transição trinca bidimensional para unidimensional, C2D-06	125
Figura 5.38.- Razões c/c' para diferentes corpos de prova C2D-01, C2D-05, C2D-07	126
Figura 5.39.- Comparação a, c vs. N , trinca bidimensional, $a/t \leq 1$, C2D-13	127
Figura 5.40.- Comparação a vs. c , trinca bidimensional, $a/t \leq 1$, C2D-13	127
Figura 5.41.- Transição de propagação de trinca bidimensional $a/t > 1$ para unidimensional	128
Figura 5.42.- Transição trinca bidimensional para unidimensional, C2D-10	129
Figura 5.43.- Transição trinca bidimensional para unidimensional, C2D-11	129
Figura 5.44.- Diminuição do carregamento aplicado para conseguir registrar a transição, C2D-13	130
Figura 5.45.- Transição de trinca Bidimensional para Unidimensional por fadiga, C2D-13	135
Figura 5.46.- Fratura final de um corpo de prova sob carregamento cíclico trativo	135
Figura 5.47.- Transição de propagação de trinca bidimensional $a/t > 1$ para unidimensional	136
Figura 5.48.- Transição trinca bidimensional para unidimensional, C2D-13	136
Figura 5.49.- Razões c/c' para diferentes corpos de prova C2D-10, C2D-11, C2D-13,	137
Figura 5.50.- Mosaico de 140 microfotografias mostrando Propagação 2D, Transição da trinca 2D para 1D e propagação 1D, C2D-13	138
Figura 5.51.- $\Delta K_I(c)$ predominante controla a taxa de propagação dc/dN ao longo do semi-eixo c , C2D-13	139
Figura 5.52.- a vs. $\Delta K_I(a)$, por Newman-Raju e Experimental ajustados a Elber, C2D-13, $a/t \leq 1$	139

Figura 5.53.- c vs. $\Delta K_I(c)$, por Newman-Raju e Experimental ajustados a Elber, C2D-13, $a/t \leq 1$	140
Figura 5.54.- c vs. $\Delta K_I(c)$, c' vs. $\Delta K_I(c')$, Experimental ajustados a Elber, C2D-13, $a/t > 1$	141
Figura 5.55.- $K_I(a)$ e $K_I(c)$ dados experimentais vs calculados, C2D-13, $a/t \leq 1$	141
Figura 5.56.- $f(a/t, c/w)$ dados experimentais vs calculados, C2D-13, $a/t \leq 1$	143
Figura 5.57.- $f(a/t, c/w)$ dados experimentais vs calculados, C2D-13, $a/t \leq 1$	143
Figura 5.58.- $f(a/t, c/w)$ dados experimentais vs calculados, C2D-13, $a/t > 1$, c e c' vs. $f(a/t, c/w)$ _ajust_Elber	144
Figura 5.59.- Comparação dos ΔK_{exp} e ΔK_{cal} com dados da/dN_{exp} e da/dN_{Elber}	145
Figura 5.60.- Início da propagação bidimensional para um entalhe linear, fractografia C2D-13	146
Figura 5.61.- Fechamento sob tensão plana nas faces laterais e deformação plana na profundidade, C2D-13	147
Figura 5.62.- Fractografias com microscópio Ótico 5X, C2D-11,	149
Figura 5.63.- Zona plástica ϵ no CP2-01	150
Figura 5.64.- Campo de tensões atuantes na zona plástica ϵ no CP2-01 usando técnicas de fotoelasticidade.	151
Figura 5.65.- Problemas inesperados na experimentação.	152
Figura 5.66.- Teste de tração em policarbonato	153
Figura 5.67.- Teste de tração em policarbonato	153
Figura 6.1.- Mosaico de 45 fotografias, Transição trinca Bidimensional para Unidimensional, C2D-11	154
Figura 6.2.- Ambiente FRANC3D para modelagem de trincas	157
Figura 6.3.- Inserção de trinca num modelo com uso do FRANC3D	158
Figura 6.4.- Fator de intensidade de tensões ao longo da frente da trinca bidimensional, C2D-13, $a=2.49\text{mm}$, $c=2.5\text{mm}$	159
Figura 6.5.- Deformações e Tensões de Mises ao redor da trinca bidimensional, C2D-13, $a=2.49\text{mm}$, $c=2.5\text{mm}$, $\sigma_{max}= 12.857 \text{ MPa}$ usando ABAQUS	159
Figura 6.6.- Fator de intensidade de tensões ao longo da frente da trinca ,C2D-13, $a=4.99\text{mm}$, $c=5.1\text{mm}$, $\sigma_{max}= 7.592 \text{ MPa}$	160
Figura 6.7.- Deformações e Tensões de Mises ao redor da trinca	160

bidimensional, C2D-13, $a=4.99\text{mm}$, $c=5.1\text{mm}$, $\sigma_{max}= 7.592 \text{ MPa}$,
usando ABAQUS

- Figura 6.8.- Fator de intensidade de tensões ao longo da frente da trinca na
transição bidimensional para unidimensional, C2D-13, $\sigma_{max}= 4.483$
MPa ,usando FRANC3D 161
- Figura 6.9.- Fator de intensidade de tensões ao longo dos semi – eixos a , c e c' .
Modelagem vs Experimental. Início, transição 2D para 1D, C2D-13 162
- Figura 6.10.- Dados tabelados baseados na fractografia do C2D-13 163
- Figura 7.1.- Fotoelasticidade do policarbonato 166
- Figura 7.2.- Corpo de Prova com 3 furos tipo ESE(T), Trajetória da propagação
muda duas vezes de sentido 167

Lista de Tabelas

Tabela 2.1.-	Regras Semi-Empíricas para Propagação a Fadiga	51
Tabela 3.1.-	Comparação das expressões analíticas versus os resultados da modelagem para valores predominantes $K_I(a)$ e $K_I(c)$.Trinca Semi- Elíptica	66
Tabela 3.2.-	Comparação das expressões analíticas versus os resultados da modelagem pelo FRANC3D para $K_I(a)$ e $K_I(c)$,Trinca Quarto – Elíptica, $a/t \leq 1$	74
Tabela 3.3.-	Comparação das expressões analíticas versus os resultados da modelagem pelo FRANC3D para $K_I(c')$ e $K_I(c)$,Trinca Quarto – Elíptica, $a/t > 1$	78
Tabela 4.1.-	Propriedades mecânicas do policarbonato	85
Tabela 5.1.-	Propagação da trinca bidimensional anteriormente mostrada	100
Tabela 5.2.-	Resumo de ensaios com CP-PP	103
Tabela 5.3.-	Valores experimentais do fator de forma na transição 2D-1D, C2D-13	144

Lista de abreviaturas e símbolos

ABREVIATURAS

da/dN	Método de previsão de dano à fadiga (propagação de trinca).
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica.

SÍMBOLOS

$2a$	Largura do furo elíptico em uma placa infinita.
$2b$	Comprimento do furo elíptico em uma placa infinita.
a	Comprimento de trinca.
c	Comprimento de trinca.
c'	Comprimento de trinca.
da/dN	Taxa de propagação de trinca.
A	Coefficiente linear.
m	Coefficiente angular.
E	Módulo elástico.
ε	Deformação unidirecional.
$\Delta\varepsilon$	Amplitude das deformações.
$f(a/w)$	Fator de forma (Função adimensional).
D_{ijkl}	Tensor de quarto ordem.
δ_{ij}	Delta de Kronecker
K	Fator de intensidade de tensões.
K_T	Fator de concentração de tensões.
K_I, K_{II}, K_{III}	Fatores de intensidade de tensões nos modos I, II e III de carregamento, respectivamente.
$K_I(a)$	Fator de intensidade de tensões, modo I em a
$K_I(c)$	Fator de intensidade de tensões, modo I em c
$K_I(c')$	Fator de intensidade de tensões, modo I em c'
K_c	Tenacidade à fratura.

ΔK	Amplitude do fator de intensidade de tensões.
ΔK_{th}	Fator de intensidade de tensões limiar.
K_{max}	Fator de intensidade de tensões máximo.
K_{min}	Fator de intensidade de tensões mínimo.
N	Número de ciclos.
P	Carregamento.
R	Taxa tensão máxima, tensão mínima
σ	Tensão.
σ_a	Tensão alternada.
σ_m	Tensão media.
σ_n	Tensão nominal.
σ_{max}	Tensão máxima.
σ_{min}	Tensão mínima.
$\Delta\sigma$	Amplitude das tensões.
σ_{ij}	Tensor de tensões.
σ_x	Tensão normal na direção x.
σ_y	Tensão normal na direção y.
$\sigma_r, \sigma_\theta, e \tau_{r\theta}$	Tensões nas vizinhanças da ponta da trinca em coordenadas polares.
S_E	Tensão de escoamento do material.
S_{ut}	Tensão de ruptura.
u_x, u_y	Deslocamentos nas direções dos eixos x e y, respectivamente.
U_s	Energia de deformação.
ν	Coefficiente de Poisson.
λ	Modulo de Lamé.
μ	Modulo de Cisalhamento.

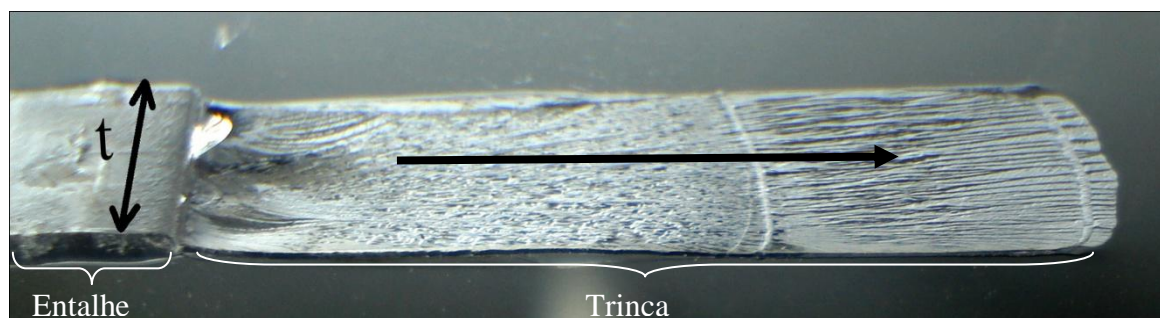
1 Introdução

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.

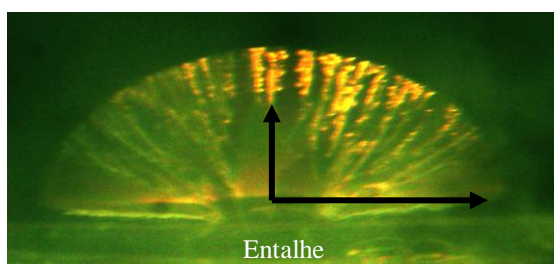
A falha por fadiga em estruturas metálicas é um fenômeno já conhecido em engenharia. Ao longo do último século, a engenharia tem aprendido que a aplicação de carregamento cíclicos variáveis ao longo do tempo pode dar início ao mecanismo de fadiga num material. Uma estrutura submetida a uma tensão cíclica 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 ΔK , 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.

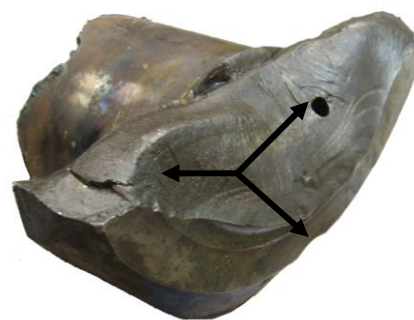
O crescimento das trincas bidimensionais por fadiga comparado com as unidimensionais é comum nas estruturas. Por exemplo, elas podem aparecer em vasos de pressão, dutos, tanques, componentes de carros, estruturas metálicas, usinas nucleares, navios, etc. A Figura 1.1 mostra três diferentes tipos de trincas,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

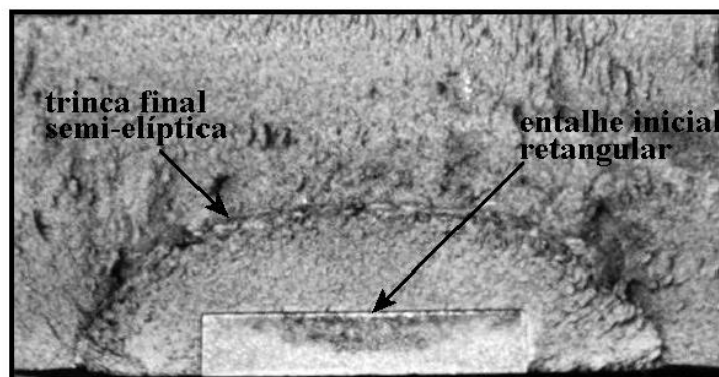


Figura 1.2- Trinca semi-elíptica gerada a partir de um entalhe retangular (Fadiga sob Cargas de Serviço, Castro & Meggiolaro, 2009)

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.

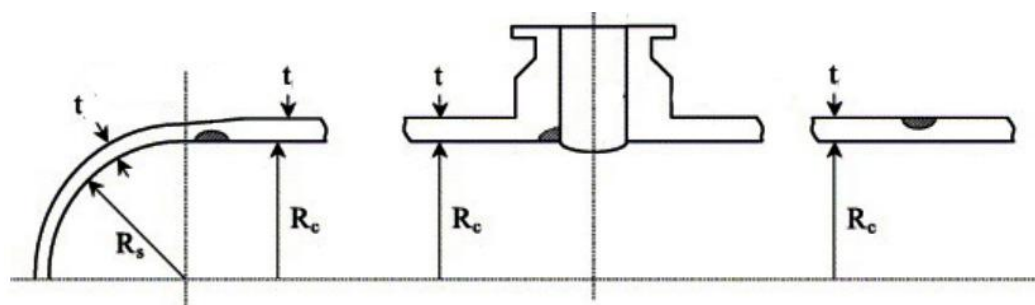


Figura 1.3- Trincas semi-elípticas e de canto em vasos de pressão, válvulas e dutos.

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*).

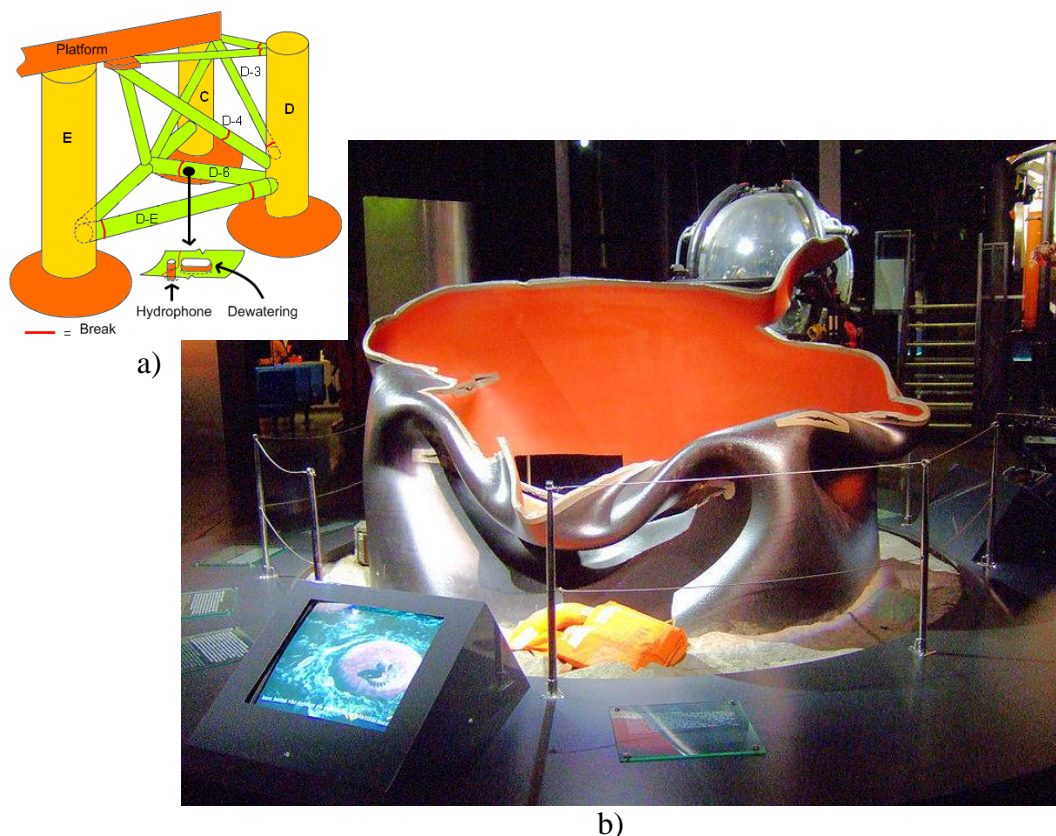


Figura 1.4- Parte da perna afetada por trincas de fadiga bidimensional na catástrofe da plataforma semi-submersível *Alexander Kielland* a) Plataforma b) Seção Afetada , (*Norwegian Petroleum Museum*)

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.

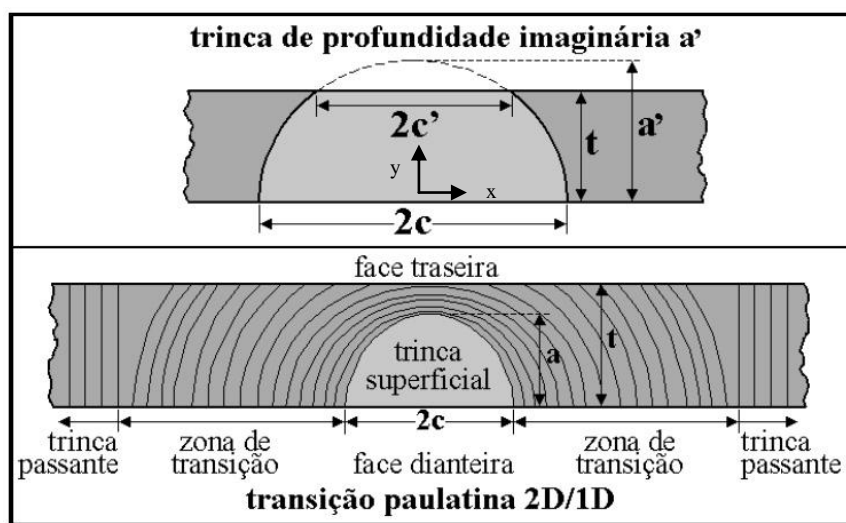


Figura 1.5- Transição de uma trinca superficial 2D para uma trinca passante 1D (Fadiga sob Cargas de Serviço, Castro & Meggiolaro, 2009)

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.

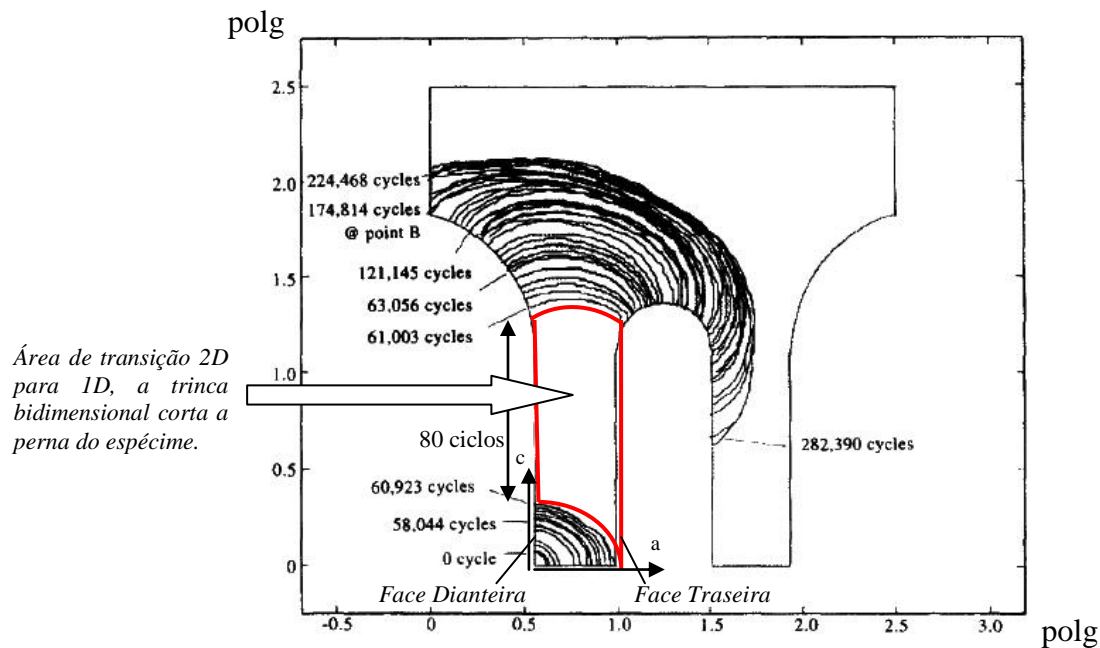


Figura 1.6 - Perfis de trinca de fadiga obtidos para o modelo duplo T carregada em quatro pontos de flexão. Transição da trinca 2D para 1D em 80 ciclos.

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 ΔK , sendo a um comprimento característico da trinca, N o número de ciclos do carregamento e ΔK 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

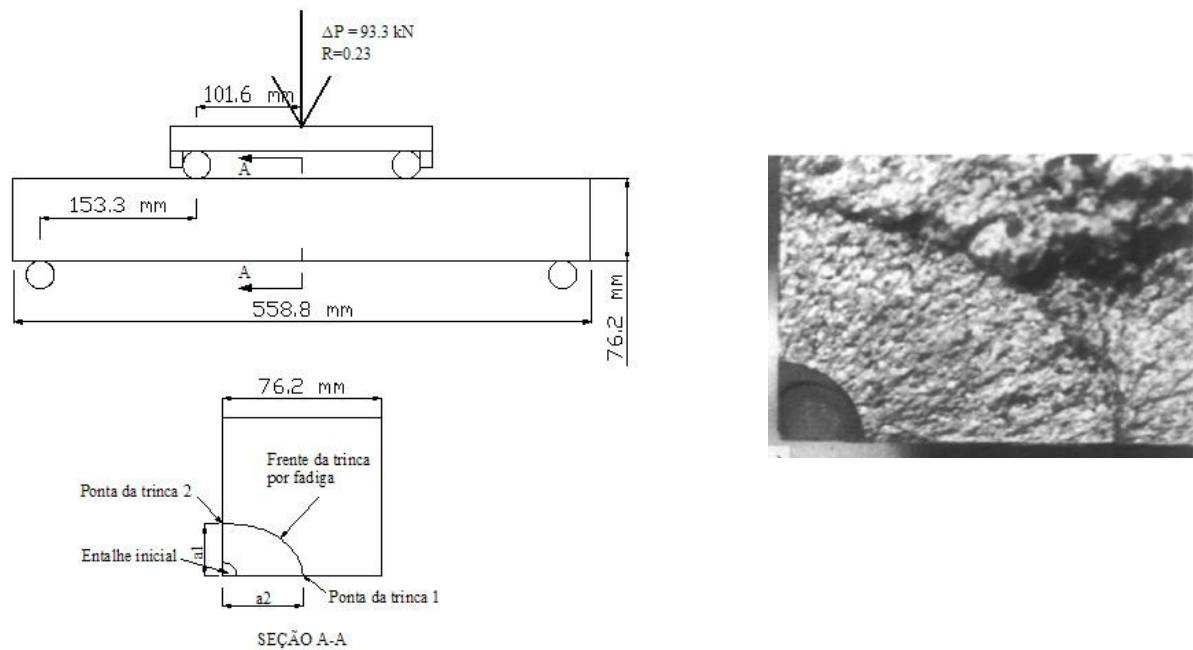


Figura 1.6- a) Geometria e condições de contorno para o Ensaio 1. b) Resultado do Ensaio (Ingraffea, 1997)

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 β a segunda transição ocorre quando a ponta da trinca 2 alcança a esquina β .

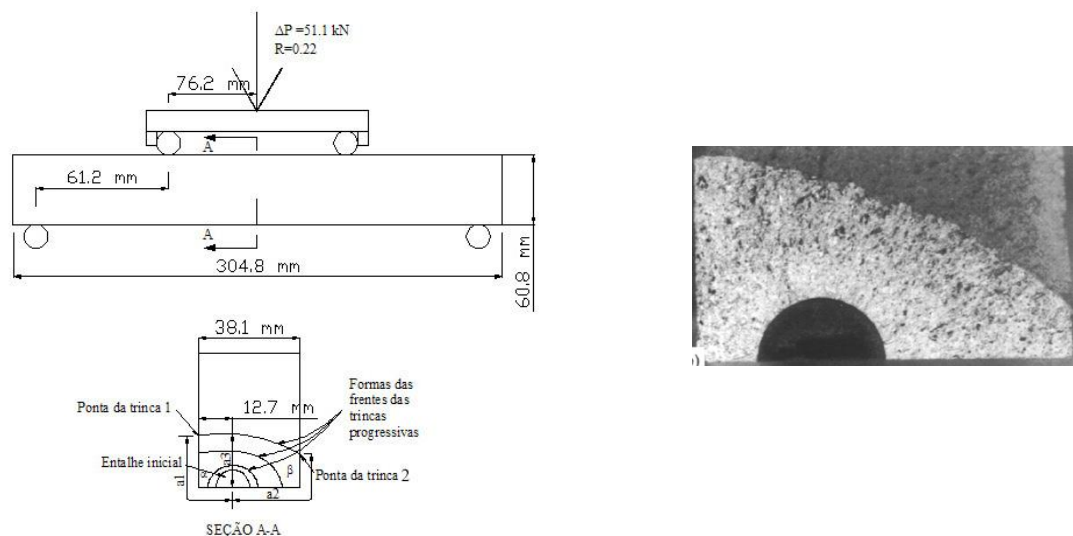


Figura 1.8- a) Geometria e condições de contorno para o Ensaio 2. b) Resultado do Ensaio (Ingraffea, 1997)

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 α a segunda transição ocorre quando a ponta da trinca 2 alcança a esquina β .

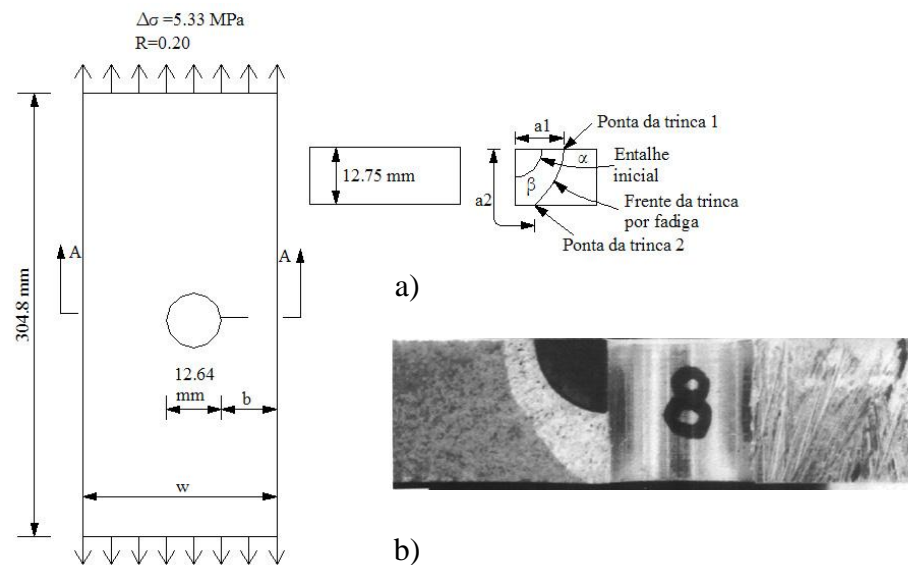


Figura 1.9 - a) Geometria e condições de contorno para o Ensaio 3. b) Resultado do Ensaio (Ingraffea, 1997).

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 ΔK . 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.

2 Fundamentos de Elasticidade e da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE)

2.1. Relações Tensão – Deformação

No século XVII, Hooke propôs as relações fundamentais para uma dimensão em materiais lineais elásticos.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

onde σ e ε são a tensão e deformação unidirecional, respectivamente, e E o módulo de elasticidade de Young. A lei generalizada de Hooke pode ser escrita na forma:

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (2.2)$$

A propriedade simétrica tanto de σ quanto de ε reduz o número de constantes do tensor de quarto ordem, D_{ijkl} , de 81 componentes para somente 36 termos independentes. A lei de Hooke para materiais isotrópicos pode ser escrita como:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \varepsilon_{kk} \right) \quad (2.3)$$

e na forma de tensão-deformação:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \delta_{ij} \sigma_{kk} \quad (2.4)$$

onde δ_{ij} é a função delta de Kronecker e ν o coeficiente de Poisson. A forma expandida da Equação (2.4) para um material isotrópico pode ser escrita como:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

ou:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{xx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{xx} \end{Bmatrix} \quad (2.6)$$

onde λ e μ são os módulos de Lamé e cisalhamento, definidos como:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2.7)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.8)$$

As Equações (2.5) e (2.6) podem ser simplificadas para casos de estado plano de tensões, estado plano de deformações e de duas dimensões nos casos axi-simétricos. Para o estado plano de tensões, a dimensão em uma direção (espessura) é negligenciada comparada com as outras duas, admite-se a hipótese de que as estruturas possam ser consideradas como placas finas carregadas no plano (x, y) cujo carregamento é uniforme ao longo de z (espessura), assim:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

onde $\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy}$ é o componente da deformação por cisalhamento. A componente de deformação ao longo da direção da espessura, ε_{zz} , pode ser também encontrada da relação de Poisson:

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\nu}{1-\nu^2} (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) \quad (2.10)$$

O caso de estado plano de deformações se assemelha a um corpo comprido submetido a nenhuma variação em carga ou geometria na direção longitudinal, supõe-se que a estrutura é alongada no eixo z e com carregamento uniforme ao longo do mesmo. Como resultado, tem-se:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ \nu & \nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

O modulo de Young efetivo é:

$$E' = \begin{cases} E & \text{Estado plano de tensões} \\ \frac{E}{1-\nu^2} & \text{Estado plano de deformações} \end{cases} \quad (2.12)$$

Outro parâmetro usado freqüentemente é:

$$\kappa = \begin{cases} \frac{3-\nu}{1+\nu} & \text{Estado plano de tensões} \\ 3-4\nu & \text{Estado plano de deformações} \end{cases} \quad (2.13)$$

Quando um corpo elástico é submetido a carregamento, o corpo experimenta deslocamentos os quais são linearmente relacionados ao carregamento aplicado. Como resultado certa quantidade de trabalho é armazenada dentro do corpo em forma de energia potencial de deformação. A densidade de energia de deformação pode ser definida:

$$U_s = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \sigma^T \varepsilon \quad (2.14)$$

2.1.1. Função de Airy

Airy desenvolveu a idéia de uma função de tensões a qual podia satisfazer tanto a condição de equilíbrio quanto a condição de compatibilidade. Ele mostrou que na ausência de forças de corpo a função de tensões Φ deve satisfazer a equação de Laplace:

$$\nabla^4 \Phi = \nabla^2 (\nabla^2 \Phi) = 0 \quad (2.15)$$

onde:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (2.16)$$

e

$$\sigma_{xx} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}, \quad \sigma_{yy} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}, \quad \sigma_{xy} = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} \quad (2.17)$$

As anteriores equações podem ser escritas como:

$$\nabla^4 \Phi = \nabla^2 (\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2) = 0 \quad (2.18)$$

Ou em coordenadas polares:

$$\nabla^4 \Phi = \nabla^2 (\sigma_{rr}^2 + \sigma_{\theta\theta}^2) = 0 \quad (2.19)$$

2.2. Fundamentos da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE)

2.2.1. Concentração de Tensões

A maioria das estruturas contém descontinuidades geométricas. A forma e tamanho destas descontinuidades afetam a resistência de um elemento estrutural. Convencionalmente a resistência dos componentes ou estruturas contendo defeitos é avaliada através da concentração de tensões naquela região causada pela descontinuidade. Contudo, tal enfoque convencional poderia dar uma resposta errônea se a característica da descontinuidade geométrica tem um raio muito afiado. Para ter uma melhor compreensão observemos os corpos de prova da Figura 2.1.

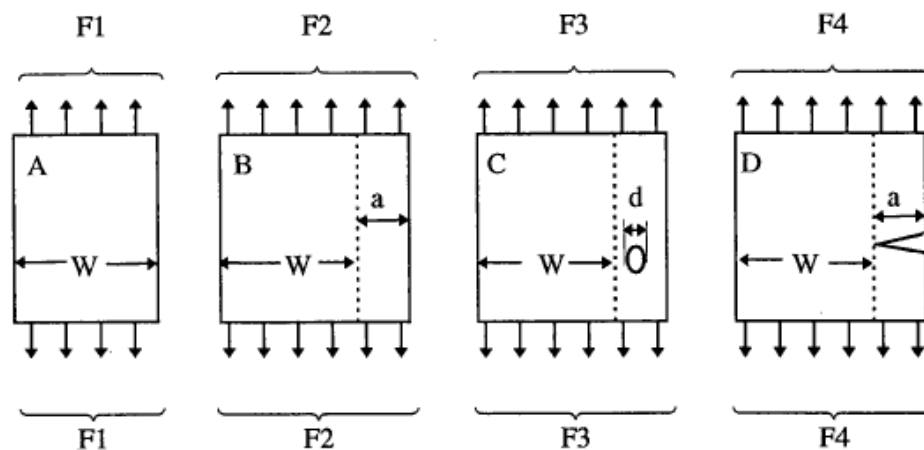


Figura 2.1 - Resistência em placas com e sem descontinuidades.
(Wang, 1996)

Embora a espessura de cada placa seja a mesma, as forças necessárias para que o corpo de prova falhe são diferentes (C.H. Wang, 1996), pode-se seguir a seguinte ordem:

$$F4 < F3 < F1 < F2$$

Claramente, o tamanho dos defeitos nos corpos de prova 3 e 4 é crucial para a resistência da estrutura. Agora, consideremos duas placa infinitas submetida a tração: uma sem defeito e outra com um pequeno furo circular.

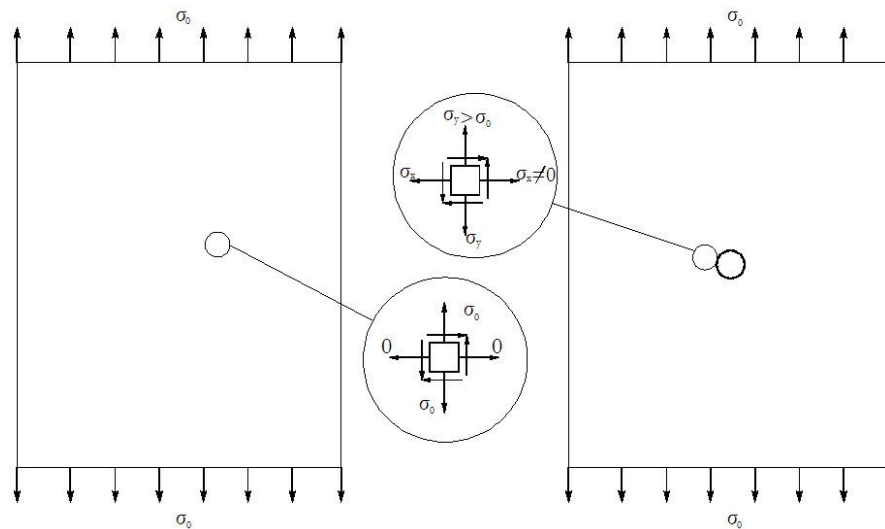


Figura 2.2- Uma placa infinita com e sem defeito, (Mohammadi, 2008)

Vemos que no centro da placa sem defeito o campo de tensões permanece igual em relação à tensão aplicada σ_0 . Portanto, a máxima tração permissível pode ser determinada pela condição que as tensões no seu interior devem estar limitadas pela tensão de escoamento como uma medida da falha da resistência do material, isto é, $\sigma_0 = \sigma_{yld}$.

Em contrapartida a solução elástica de tensões para uma placa com defeito circular apresenta um campo biaxial não uniforme com um fator de concentração de 3 na borda do furo. No caso limite de ter um defeito em forma de linha reta, como uma trinca, a solução de um furo elíptico degenerado mostra um estado de tensões que tende ao infinito na ponta da trinca. Nenhum material pode suportar tal estado de tensões. Portanto, em vez de comparar o campo de tensões do ponto de vista da resistência dos materiais, a mecânica da fratura adota um parâmetro chamado de fator de intensidade de tensões ou uma energia global de fratura.

2.2.2. Furo Circular

Em 1898, Kirsch analisou o problema de uma placa infinita com um furo circular sob esforços de tração uniforme, como mostra a Figura 2.3 .

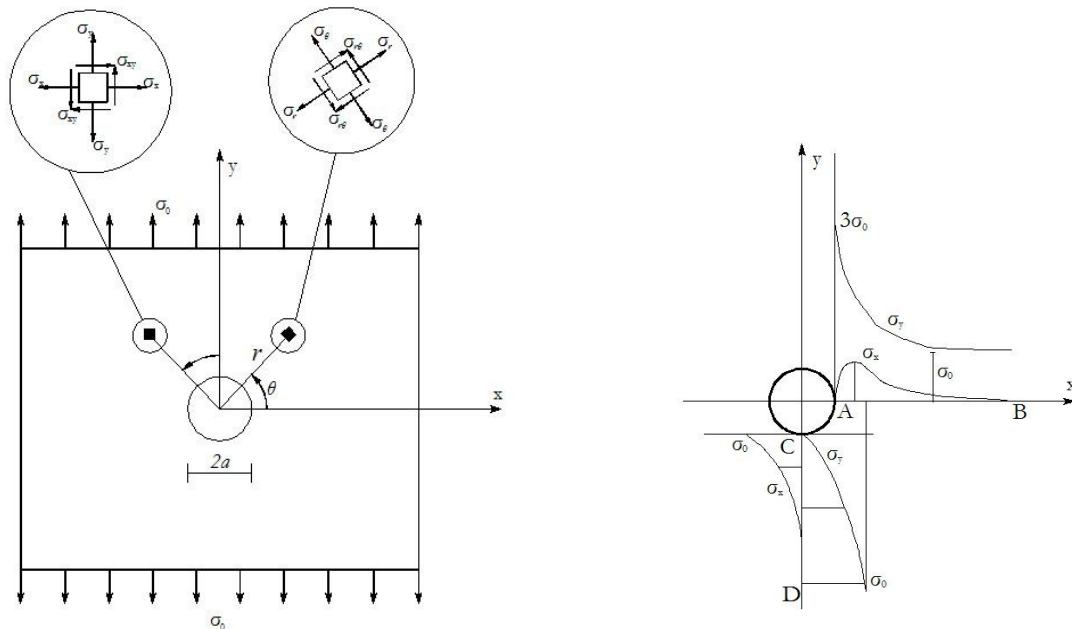


Figura 2.3- a) Furo circular numa placa infinita b) Distribuição de tensões ao redor do furo (Extended Finite Element Method, 2008)

As condições de contorno ao longo do furo circular são analisadas usando sistema de coordenadas polares. Se usamos a definição de tensão, σ_{yy} , em função da função de tensão de Airy $\sigma_{yy} = \partial^2 \Phi / \partial y^2$ se poderia sugerir uma função de tensão do tipo $\Phi = \sigma_0 x^2$ para representar as condições mais remotas da condição de campo de contorno $\sigma_{yy} = \sigma_0$. Também podemos escolher outra representação polar de Φ com $x = r \cos \theta$

$$\Phi = \sigma_0 r^2 \cos^2 \theta \quad (2.20)$$

ou

$$\Phi = \sigma_0 f(r) \cos 2\theta \quad (2.21)$$

Depois de algumas substituições Menguid (1989) verifica que:

$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma_0}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \left[1 - \left(1 - 3 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \right] \quad (2.22)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_0}{2} \left[\left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (2.23)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{\sigma_0}{2} \left[\left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \left(1 + 3 \frac{a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta \right] \quad (2.24)$$

Os valores de tensão no borde do furo quando $r = a$:

$$\sigma_{rr} = 0, \quad \sigma_{\theta\theta} = \sigma_0(1 - 2 \cos \theta), \quad \sigma_{r\theta} = 0 \quad (2.25)$$

no qual mostra que apesar da aplicação de uma tração unidirecional uniforme, um estado de tensões biaxial não uniforme é gerado ao redor do furo. Ocorre também um estado de tensões de compressão em $\theta = \pi/2, 3\pi/2$ ($\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{xx} = -\sigma_0$). O fator de concentração de tensões para $\sigma_{\theta\theta}$ é 3 em $\theta = 0$ ($\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{yy} = 3\sigma_0$). A Figura 2.3.b mostra a distribuição de tensões ao longo do eixo maior da placa.

2.2.3. Furo Elíptico

Inglis (1913) resolveu o problema da concentração de tensões ao redor de um furo elíptico numa placa infinita submetida a carregamento uniforme, Figura 2.4.

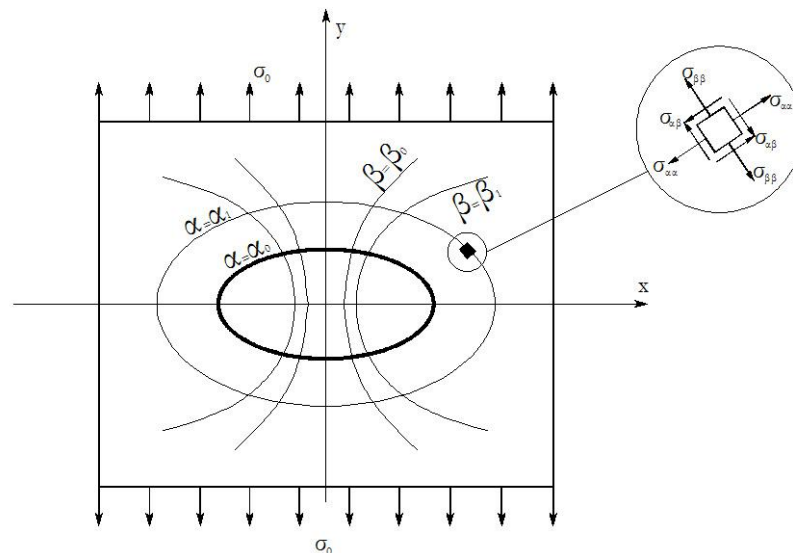


Figura 2.4- Furo elíptico (Extended Finite Element Method, 2008)

As seguintes funções complexas de tensão foram propostas por Inglis em um sistema de coordenadas curvilíneo α e β ; equações que satisfazem as condições de contorno e são periódicas em β .

$$\psi(z) = \frac{1}{4} \sigma_0 c \left[(1 + e^{2\alpha_0}) \sinh p - e^{2\alpha_0} \cosh p \right] \quad (2.26)$$

$$\chi(z) = -\frac{1}{4} \sigma_0 c^2 \left[(\cosh 2\alpha_0 - \cosh \pi) p + \frac{1}{2} e^{2\alpha_0} - \cosh 2 \left(p - \alpha_0 - i \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (2.27)$$

onde $p = \alpha + i\beta$. A solução em $\alpha = \alpha_0$ é

$$\left(\sigma_{\beta\beta} \right)_{\alpha=\alpha_0} = \sigma_0 e^{2\alpha_0} \left[\frac{\sinh 2\alpha_0 (1 + e^{-2\alpha_0})}{\cosh 2\alpha_0 - \cos 2\beta} - 1 \right] \quad (2.28)$$

E para os pontos localizados ao final da elipse em termos de a e b

$$\left(\sigma_{\beta\beta} \right)_{\alpha=\alpha_0, \beta=0, \pi} = \sigma_0 \left[1 + 2 \frac{a}{b} \right] \quad (2.29)$$

A Equação (2.29) indica que para um furo circular onde $a = b$ o fator de concentração de tensões é igual a 3. Outro valor para ser analisado é quando a elipse é degenerada em uma trinca, quer dizer $b = 0$, gerando assim uma tensão infinita. A Equação (2.29) pode ser reescrita em termos de raio de curvatura da ponta da trinca como:

$$\left(\sigma_{\beta\beta} \right)_{\alpha=\alpha_0, \beta=0, \pi} = \sigma_0 \left[1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right] \quad (2.30)$$

onde mostra que o fator de concentração de tensões é proporcional a curvatura ρ . O fator de intensidade de tensões, K_T , pode também representar uma aproximação prática para várias formas de entalhe com ajuda da Equação (2.30) para entalhes elípticos:

$$K_T = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{nom}} = 1 + 2 \sqrt{\frac{D}{\rho}} \quad (2.31)$$

onde D e ρ são a profundidade do entalhe e o raio da raiz do entalhe respectivamente, Figura 2.5.

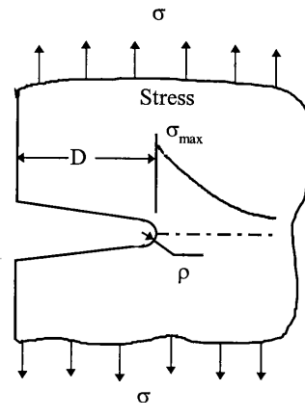


Figura 2.5- Concentração de tensão

2.3. Trincas e Fator de Intensidade de Tensões

Irwin em 1957 introduziu o conceito de fator de intensidade de tensões K , como uma medida da singularidade. Ele demonstrou que todos os campos de tensão elásticos ao redor da ponta da trinca são distribuídos similarmente, sendo que K é proporcional a $\sigma\sqrt{\pi r}$. Além disso, K controla a intensidade de tensão local.

Usando as soluções encontradas por Menguid (1989) para o problema gerado por Westergaard para trincas afiadas temos o campo de tensões em torno de uma trinca:

$$\sigma_{xx} = \sigma_0 \frac{a}{\sqrt{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \dots \quad (2.32)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_0 \frac{a}{\sqrt{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \dots \quad (2.33)$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_0 \frac{a}{\sqrt{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \dots \quad (2.34)$$

Usando as equações anteriores, o campo elástico de tensões ao redor da trinca pode ser agora representado por:

$$\sigma_{xx} = \sigma_0 \frac{a}{\sqrt{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \dots = \sigma_0 \sqrt{\frac{1}{r}} f(\theta) + \dots \quad (2.35)$$

ou na forma mais geral:

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\sqrt{r}} \{K_I f_{ij}^I(\theta) + K_{II} f_{ij}^{II}(\theta) + K_{III} f_{ij}^{III}(\theta)\} + \text{termos de maior ordem} \quad (2.36)$$

Onde σ_{ij} são as tensões perto da ponta da trinca e K_I, K_{II}, K_{III} são os fatores de intensidade de tensão associadas aos três diferentes modos de movimento respectivamente das superfícies trincadas:

$$K_I = \lim_{\substack{r \rightarrow 0 \\ \theta = 0}} \sigma_{yy} \sqrt{2\pi r} \quad (2.37)$$

$$K_{II} = \lim_{\substack{r \rightarrow 0 \\ \theta = 0}} \sigma_{xy} \sqrt{2\pi r} \quad (2.38)$$

$$K_{III} = \lim_{\substack{r \rightarrow 0 \\ \theta = 0}} \sigma_{yz} \sqrt{2\pi r} \quad (2.39)$$

O primeiro modo do fator de intensidade de tensão, baseado na Equação (2.37), pode ser simplificado como:

$$K_I = \lim_{\substack{r \rightarrow 0 \\ \theta = 0}} \sigma_{yy} \sqrt{2\pi r} = \lim_{\substack{r \rightarrow 0 \\ \theta = 0}} \sqrt{2\pi r} \sigma_0 \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) = \sigma_0 \sqrt{\pi a} \quad (2.40)$$

É importante definir os diferentes modos de tensão que o fator de intensidade de tensão pode ter em os corpos trincados. Um corpo trincado pode ser carregado em qualquer combinação de modos. Os três modos básicos, Figura 2.6, são modo I ou normal (ao plano da trinca), modo II ou corte (cisalhamento paralelo ao plano e perpendicular à ponta da trinca) e modo III ou torção (cisalhamento paralelo ao plano e à ponta da trinca). O Modo I corresponde a uma normal separação das faces da trinca sob ação de esforços de tração, o qual é o mais encontrado na prática da mecânica da fratura. Modos II e III se diferenciam devido à forma da ação do plano cisalhante.

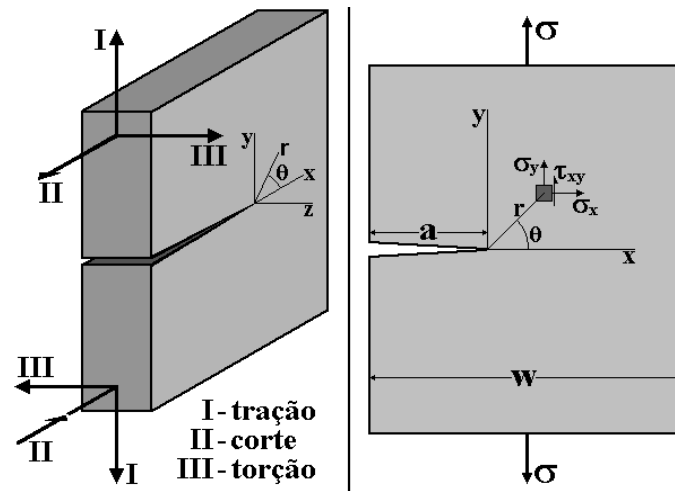


Figura 2.6 - Modos de carregamento das trincas
(Fadiga sob Cargas Reais de Serviço, Castro & Meggiolaro, 2009)

O modo I é o mais importante, pois corresponde ao modo de fraturamento da maioria das peças trincadas. Para o modo de carregamento I, o campo de tensões linear elástico em torno das trincas é dado por:

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.41)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.42)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.43)$$

$$\sigma_{zz} = \begin{cases} \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \\ 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Estado plano de deformações} \\ \text{Estado plano de tensões} \end{array} \quad (2.44)$$

$$\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0 \quad (2.45)$$

O campo de deslocamentos é dado por

$$u_x = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\kappa - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.46)$$

$$u_y = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(\kappa + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.47)$$

$$u_z = 0 \quad (2.48)$$

2.4. Propagação de Trincas por Fadiga

Fadiga é um dos mecanismos de falha nos componentes estruturais caracterizada pela geração e/ou propagação progressiva de uma trinca. A vida de fadiga de um componente pode ser expressa como o número de ciclos necessário para iniciar uma trinca por fadiga e para propagar a trinca até um tamanho crítico causando a fratura dos componentes da estrutura. A falha por fadiga ocorre em três etapas: iniciação de trinca, lento, a propagação e a fratura, rápidas. Parâmetros como geometria, solicitações, propriedades e ambiente externo afetam a resistência de um componente estrutural a fadiga. A geometria da estrutura influencia o gradiente de tensões e os fatores de intensidade de tensão.

2.4.1. Curva da/dN versus ΔK

Paris & Erdogan (1963) demonstraram que a propagação de trincas por fadiga da/dN não era controlada pela gama das tensões $\Delta\sigma$ senão dependia da gama de fator de intensidade de tensões ΔK , é ΔK quem controla da/dN . A Figura 2.7 mostra a propagação de uma trinca por fadiga onde se pode apreciar o incremento do comprimento Δa para cada número de ciclos ΔN .

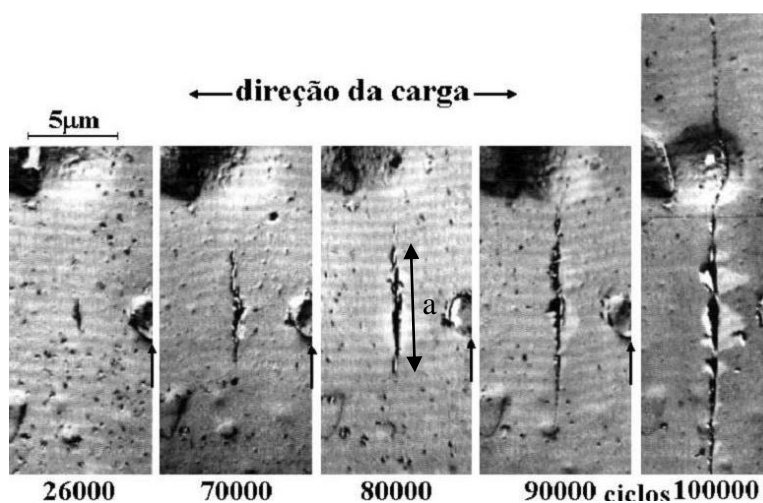


Figura 2.7 - Crescimento paulatino de uma pequena trinca por fadiga (Miranda, 2003)

O método da/dN de projeto à fadiga proposto por Paris é usado para prever a vida residual de peças trincadas a partir da integração da curva de propagação da/dN x ΔK (Castro & Meggiolaro, 2009). Este método prevê uma relação parabólica entre da/dN e ΔK do tipo:

$$da/dN = A \cdot \Delta K^m \quad (2.50)$$

também

$$\Delta K = (1-R) \cdot \sigma_{\max} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f(w/a) = \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f(w/a) \quad (2.51)$$

onde,

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}, R > 0 \quad (2.52)$$

$$\Delta K = K_{\max}, R < 0 \quad (2.53)$$

$$R = K_{\min} / K_{\max} \quad (2.54)$$

$$K_{\max} = \Delta K / (1 - R) \quad (2.55)$$

onde a diferença entre K_{\max} e K_{\min} é a gama do fator de intensidade de tensões, R a razão entre os fatores de intensidade máximo e mínimo, Figura 2.8.

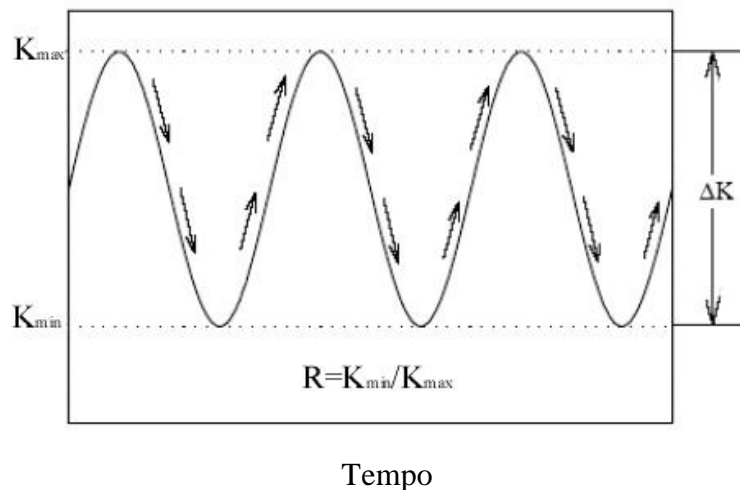


Figura 2.8 - Ciclos do Fator de Intensidade de Tensões

A Figura 2.9 mostra o comportamento do fator de intensidade de tensões ΔK numa curva ajustada logaritmicamente devido as taxas da/dN . Esta curva sigmoidal

ajuda a entender a previsão da vida residual de estruturas trincadas. Diferenciam-se 3 fases principais: Fase I, que inicia num limiar de propagação ΔK_{th} abaixo do qual a trinca não se propaga, onde a derivada da curva decresce a medida que ΔK aumenta. A Fase II onde efetivamente a relação da/dN vs ΔK é dada pela regra de Paris pois a derivada da curva é aproximadamente constante nesta fase. Finalmente a Fase III, onde a derivada da curva cresce a medida que ΔK aumenta até que o fator de intensidade máximo de tensões, K_{max} , atinge o valor crítico de tenacidade do material K_{Ic} , provocando a falha da estrutura por fratura. A Fase I vai do limiar ΔK_{th} ate taxas de 10^{-10} a 10^{-9} m/ciclo onde o crescimento é descontínuo gerado por micro-mecanismos intragranulares sensíveis à carga média, à microestrutura do material, ao meio ambiente e à carga da abertura da trinca. Na Fase II as taxas vão de 10^{-10} ~ 10^{-9} até 10^{-6} ~ 10^{-5} m/ciclo onde o crescimento da trinca é aproximadamente contínua ao longo da sua frente (estrias de fadiga, ver Capítulo 6). A Fase III a propagação é praticamente instável terminando no fraturamento da estrutura.

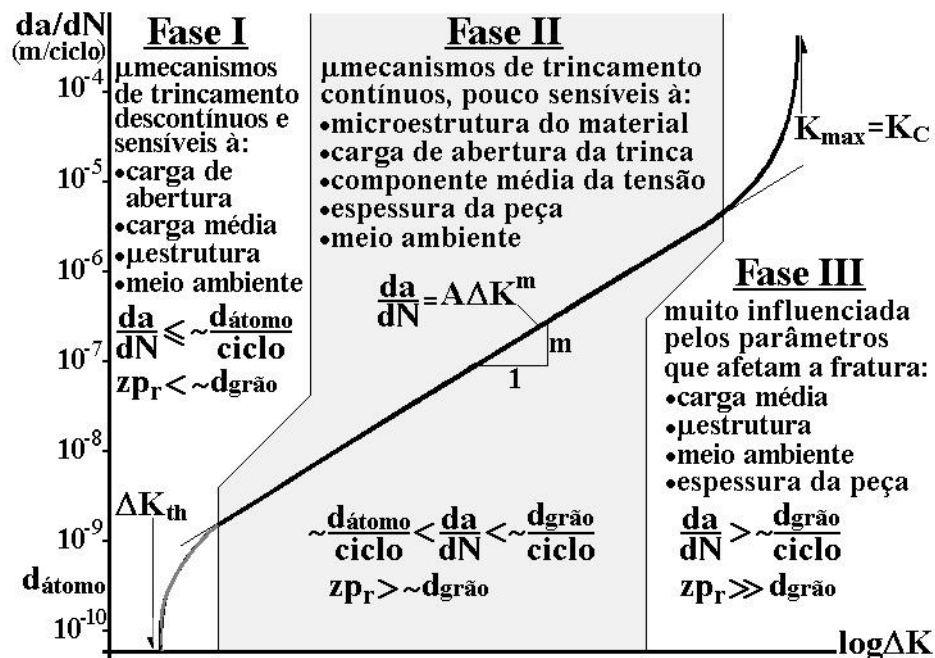


Figura 2.9- Curva típica de propagação de trincas por fadiga, $da/dN \times \Delta K$ (Fadiga sob Cargas Reais de Serviço, Castro & Meggiolaro 2009)

Paris também afirmou que a vida residual de uma peça trincada à fadiga era previsível integrando a curva de propagação $da/dN \times \Delta K$ do material. Com este conceito utiliza-se o fator de intensidade de tensões para descrever a propagação das trincas de fadiga.

A vida residual da peça pode ser dada como:

$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{A \cdot \Delta K^m} = \frac{1}{A \cdot (\Delta \sigma \cdot \pi)^m} \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{(\sqrt{a} \cdot f(w/a))^m} \quad (2.56)$$

onde A (coeficiente linear) e m (coeficiente angular) são constantes próprias do material os quais variam com a tensão média, a frequência, a temperatura, e o meio ambiente (Moura, 2005). Também R é razão de tensões mínima e máxima atuantes. Além disso a participação do fator de forma $f(w/a)$ é muito importante já que é a função que descreve toda a influência das geometrias da peça e da trinca, da orientação da trinca, e a forma do carregamento no campo de tensões. Existem centenas de expressões na literatura que caracterizam as diferentes geometrias das peças através do fator de forma.

2.4.2. Ciclos de Tensão de Fadiga

Num ciclo de tensões, define-se a amplitude da tensão como a diferença entre a tensão máxima, σ_{\max} , ou mínima, σ_{\min} , e a tensão média, σ_m . Por sua vez, a tensão média é a semizona entre a tensão máxima e a tensão mínima, sendo, portanto, dada pela equação:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.57)$$

A Figura 2.10 mostra alguns casos de ciclos de tensão de fadiga, onde o tipo senoidal e mais usado em ensaios de laboratório.

A amplitude de tensão, ou tensão alternada do ciclo, σ_a , é dada pela equação

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \sigma_{\max} - \sigma_m \quad (2.58)$$

e a gama ou intervalo de tensões é o dobro da amplitude

$$\Delta \sigma = 2 \cdot \sigma_a = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2.59)$$

O ciclo repetido, Figura 2.10.b, tem tensão média diferente de zero (Carregamento Tensão/Tensão), podendo esta ser de tração ou compressão. No caso particular em que a tensão mínima é nula, o ciclo diz-se pulsante.

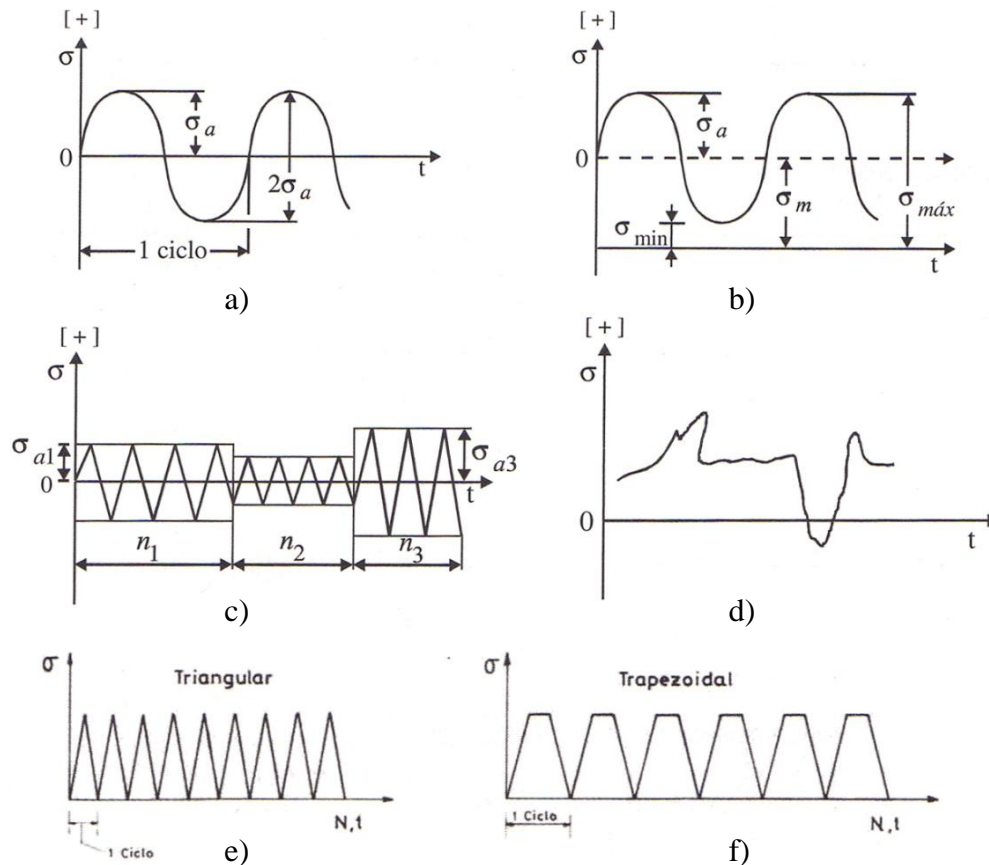


Figura 2.10 - Ciclos de Tensão de Fadiga a) Alternado (Carregamento Tensão/Compressão) b) Repetido (Carregamento Tensão/Tensão) c) Bloco d) Irregular ou aleatório (Espectro) e) e f) Ciclos com onda de tensão triangular e trapezoidal, (Projeto de órgãos de máquinas, 2005)

2.4.3. Equações Semi-Empíricas de Propagação por Fadiga

Além do modelo formulado por Paris (1960) para descrever a taxa de propagação $da/dN = A \cdot (\Delta K)^m$ existem outros modelos semi-empíricos mais desenvolvidos. Os modelos estão baseados em resultados obtidos em testes experimentais que consideram outros coeficientes adicionais que descrevem mais

qualitativamente a forma da curva através da consideração dos efeitos de ΔK_{th} , ΔK_{IC} , R . A Tabela 2.2 mostra alguns de eles. Esses modelos descrevem em parte o comportamento da curva da/dN vs. ΔK .

Regra	da/dN	Coefficientes Experimentais
Paris (1963)	$A \cdot (\Delta K)^m$	$A=7E-9, m=3$
Elber Adaptada (1970)	$A_e \cdot (\Delta K - \Delta K_{th})^{m_e}$	A_e, m_e
Elber Modificada (1970)	$A_e \cdot (\Delta K - \Delta K_0 \cdot (1-R))^{m_e}$	A_e, m_e
Forman (1967)	$A \cdot (\Delta K)^{m-1} / ((K_{IC} / K_{max}) - 1)$	$A=2E-6, m=2.9$
Walker (1970)	$A \cdot (\Delta K)^{m+p} / (1/(1-R))$	$A=7E-9, m=2, p=1$
Priddle (1976)	$A \cdot ((\Delta K - \Delta K_{th}) / (K_{IC} - K_{max}))^m$	$A=2E-6, m=2$

Tabela 2.1- Regras Semi-Empíricas para Propagação a Fadiga (Fadiga sob Cargas Reais de Serviço, Castro & Meggiolaro 2009)

2.5 Mecânica da Fratura Elastoplástica

Considerando as hipóteses da mecânica da fratura linear elástica, a tensão na ponta da trinca é teoricamente infinita. Porém, do ponto de vista físico, nenhum material pode suportar uma tensão infinita. Sendo assim, uma pequena zona plástica onde as tensões atuantes superam o valor crítico da resistência ao escoamento S_E é formada ao redor da ponta da trinca, Figura 2.10. Devido à geração desta zona uma fronteira elastoplástica é criada ao redor. No restante volume da zona, as tensões são menores do que S_E onde o comportamento é elástico. Um material ideal elastoplástico se comporta elasticamente quando as tensões são menores do que S_E , e no caso de atingir S_E o material escoar sem encruar. Como resultado destes conceitos outra ferramenta deve ser usada; a mecânica da fratura elastoplástica.

2.5.1 Zona Plástica na Ponta da Trinca

Sabe-se que as tensões atuantes na ponta são muito elevadas devido a que a trinca possuem um alto fator de concentração de tensões. Quando a peça é carregada, um campo de tensões com magnitudes diferentes surge e se localiza muito próxima à

ponta da trinca e provocando o seu cegamento através do escoamento do material adjacente. Para as equações da MFLE ter validade considera-se que a zona plástica é pequena em comparação as outras medidas como largura da peça, comprimento e ligamento residual ($w-a$).

Esta pequena região de tensões é controlada pelo fator de intensidade de tensões K , Figura 2.11. O tamanho e forma da zona plástica dependem de K e da resistência ao escoamento do material S_E .

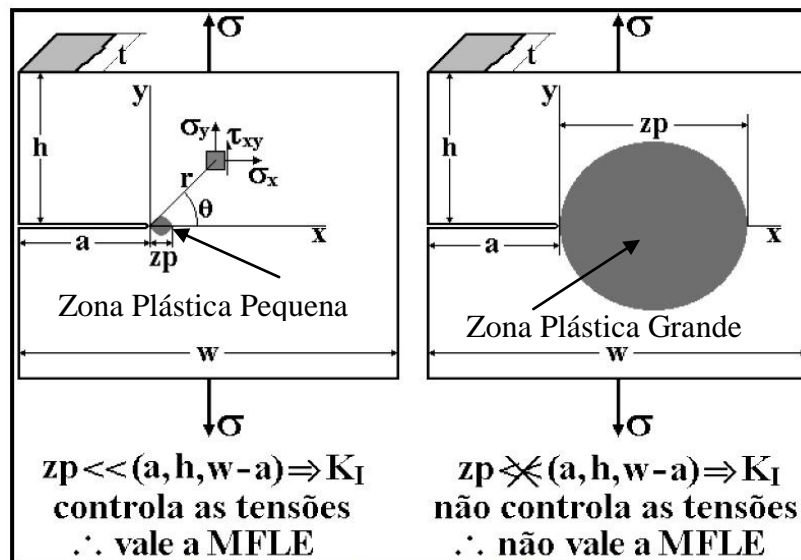


Figura 2.11 – Comparação de zonas plásticas versus elasto-plásticas (Fadiga sob Cargas Reais de Serviço, Castro & Meggiolaro 2009)

A Figura 2.12 mostra uma trinca unidimensional se propagando em policarbonato, a visibilidade do campo de tensões na ponta da trinca e possível devido ao uso de técnicas de fotoelasticidade (usando filtros polarizadores) que mostram diferentes intensidades dos campos de tensões ao redor da trinca.

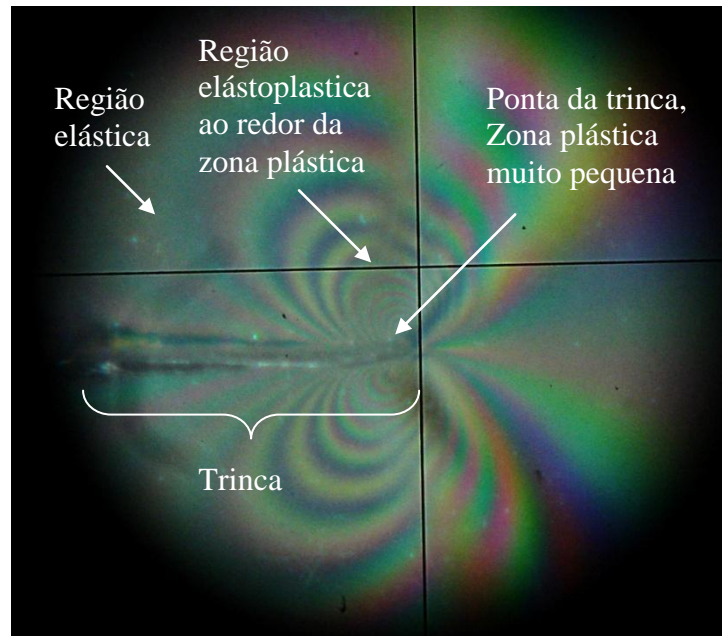


Figura 2.12- Campo de tensões atuantes na ponta da trinca. Corpo de prova ESE(T) (w,h,t) = (67mm, 297mm, 10mm), Policarbonato, $P_{\max} = 748.7$ N, N= 6002 ciclos (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

2.6. Fenômeno de Coalescimento das Trincas

A geração de múltiplas trincas foi detectada em alguns corpos de prova em ensaios de pré-trinca de fadiga. No desenvolvimento destas trincas ocorre um fenômeno chamado de coalescimento, distinguindo três estágios: pré-coalescimento, coalescimento e pós-coalescimento.

Pré-coalescimento representa o período durante o qual duas ou mais trincas adjacentes (não necessariamente iguais) já geradas se propagam dentro um corpo tendo um comportamento independente uma da outra. Tanto mais elas se aproximarem quanto, mais cresce a interação de efeitos dos fatores de intensidade de tensões. Seguido ao processo anterior surge o coalescimento. Esse é o período durante o qual as trincas adjacentes se aproximam muito uma das outras até unir-se e formar uma trinca maior. O processo é definido desde o primeiro momento que elas se tocam até o momento final onde o formato das trincas simples não é mais côncavo. A região localizada onde a interseção das elipses tem efeito não é um ponto bem definido, porém ocorre sob uma suave transição. Harrington (1995) determinou experimentalmente que a região de coalescimento tinha forma parabólica. O estágio de pós-coalescimento ocorre posteriormente quando a trinca total gerada perde o

formato côncavo continuando assim um crescimento convexo. Como resultado, uma trinca com formato semi-elíptico maior começa a se propagar como uma trinca única, Figura 2.13.

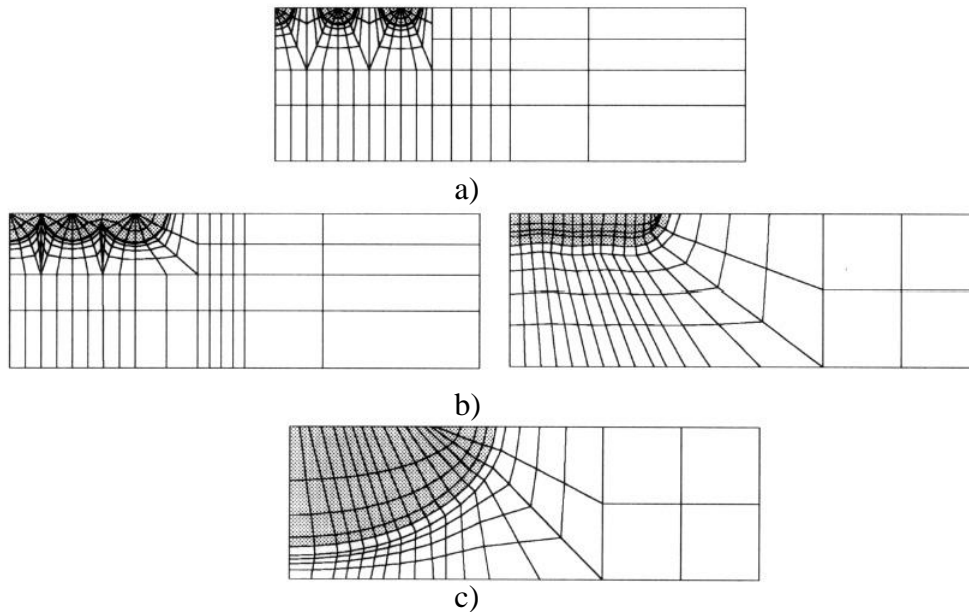


Figura 2.13- Típica configuração usando FEM para coalescimento coplanar de trincas por fadiga a) Pré-Coalescimento b) Coalescimento c) Pós-Coalescimento (Lin&Smith, 1994)

Lin & Smith (1994), estudaram o comportamento de vários entalhes semi-elípticos adjacentes separados coplanarmente num corpo de prova, Figura 2.14. Demonstrando que a modelagem feita pode prever com sucesso os estágios de pré-coalescimento, coalescimento e pós-coalescimento.

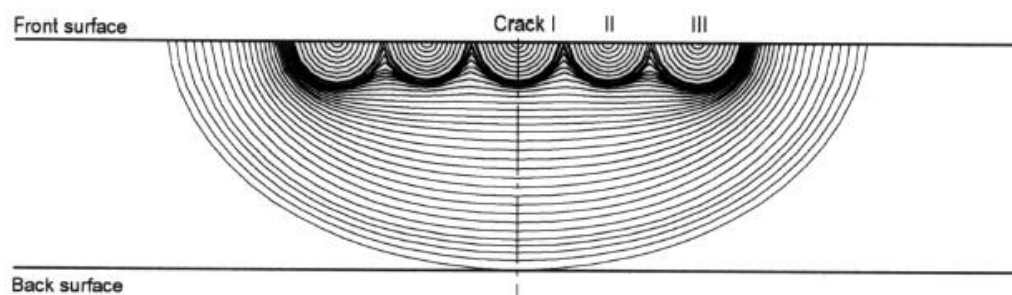


Figura 2.14- Simulação da propagação de uma fila de entalhes coplanares inicialmente semicirculares onde se verifica os diferentes estágios de coalescimento (Lin&Smith, 1994)

Soboyejo (1989) estudou experimentalmente a interação de dois entalhes coplanares sob flexão pura como mostra a Figura 2.15.

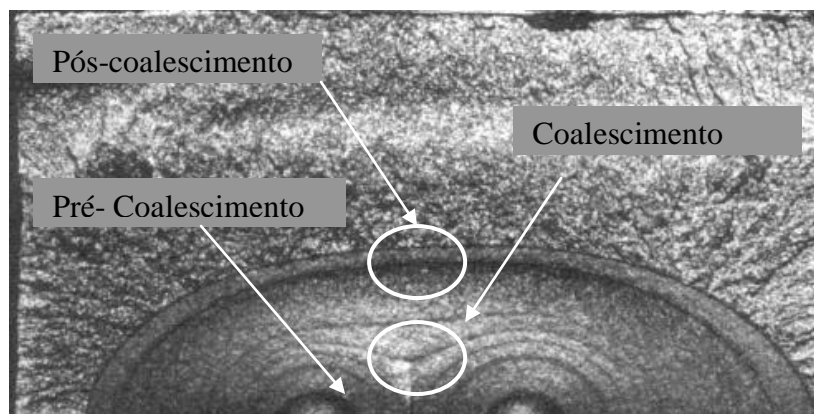


Figura 2.15- Interação de duas trincas coplanares, fenômeno de coalescimento (Soboyejo, 1994)

2.6.1. Coalescimento das Trincas Bidimensionais no Policarbonato

O coalescimento das trincas por fadiga foi um fenômeno que foi observado em alguns dos nossos ensaios. Por exemplo, o citado fenômeno foi observado em corpos de prova tipo ESE(T) os quais foram fabricados para determinar as propriedades de fadiga do material policarbonato. A Figura 2.16 mostra a geração de duas trincas não coplanares e adjacentes, elas apresentam diferentes comprimentos formando um ângulo com a horizontal da ponta do entalhe, ao mesmo tempo uma terceira trinca de menor comprimento nasce opostamente com um ângulo negativo na região inferior. No processo de pré-coalescimento as trincas crescem independentes uma da outras. A superfície da trinca 1 (superior) tem um tamanho intermédio e esta relativamente deslocada angularmente da trinca 2 (central) de maior tamanho e quase oposta à trinca 3 (inferior) de menor tamanho. Cada trinca tem fatores de intensidade de tensões próprios e individualizados tanto na direção a quanto na c .

Depois de alguns ciclos tanto a profundidade c quanto a largura a da trinca 1 crescem até quase atingir a comprimento da profundidade da trinca 2, iniciando a etapa de coalescimento.

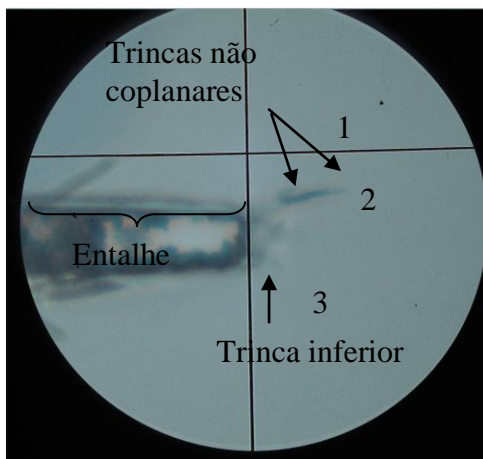


Figura 2.16 – Pré-Coalescimento, crescimento semi- elíptico de múltiplas trincas bidimensionais localizadas no meio de um entalhe, corpo de prova ESE(T) (w,h,t) = (65mm, 2970mm, 10mm), policarbonato (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

A trinca 3 cresce alguns milímetros a mais tanto em largura quanto em profundidade, Figura 2.17.

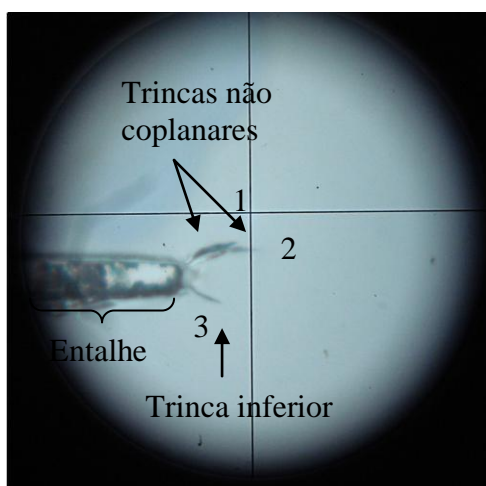


Figura 2.17 – Pré-Coalescimento, crescimento semi- elíptico de múltiplas trincas bidimensionais localizadas no meio de um entalhe, corpo de prova ESE(T) (w,h,t) = (65mm, 2970mm, 10mm), policarbonato (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

Após alguns ciclos, as trincas 1 e 2 começam o estágio de coalescimento, Figura 2.18. A trinca 1 se deforma até conseguir se sobrepor a trinca 2 localizada inferiormente. Devido o fator de intensidade de tensões ser maior na trinca 2, ela admite que trincas adjacentes com menor fator de intensidade de tensões sejam

absorvidas para se unificar. Porém devido a trinca 3 ter nascido bem afastada, ela não pode se coalescer com o resto das trincas parando totalmente a propagação.

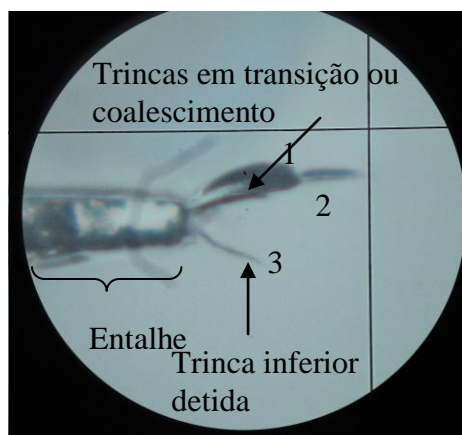


Figura 2.18 – Coalescimento, crescimento semi-elíptico de múltiplas trincas bidimensionais localizadas no meio de um entalhe, corpo de prova ESE(T) (w,h,t) = (65mm, 2970mm, 10mm), policarbonato (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

O efeito de coalescimento permite a uniformização das duas superfícies gerando uma trinca principal predominante e com um fator de intensidade de tensões unificado, assim os posteriores ciclos de pós-coalescimento a trinca se comporta como uma trinca bidimensional normal até se converter em passante, como indicado na Figura 2.19.

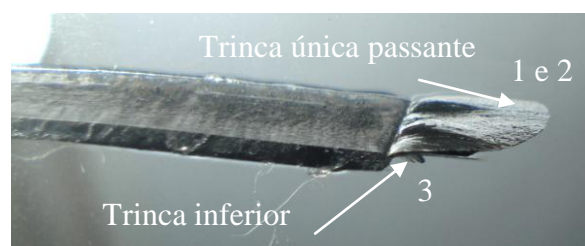
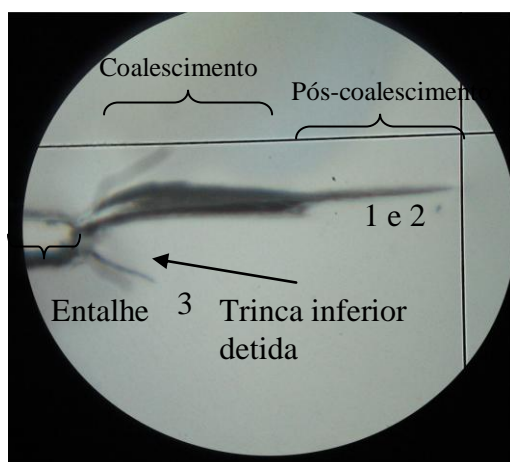


Figura 2.19 – Pós-Coalescimento, crescimento semi-elíptico de múltiplas trincas bidimensionais localizadas no meio de um entalhe, corpo de prova ESE(T) (w,h,t) = (65mm, 2970mm, 10mm), policarbonato (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

3. Propagação de Trincas Bidimensionais

3.1. Introdução

As trincas que crescem em várias direções, porém em um mesmo plano, e quando podem ser formuladas matematicamente por duas direções no plano são chamadas de trincas bidimensionais ou 2D. Em geral mudam de forma a cada ciclo de carga.

Geometricamente, as trincas bidimensionais podem ser descritas através de dois semi-eixos x e y , Figura 3.1, que serão nomeados neste trabalho como semi-eixo c e semi-eixo a , respectivamente, tendo como componentes do crescimento a largura c e a profundidade a .

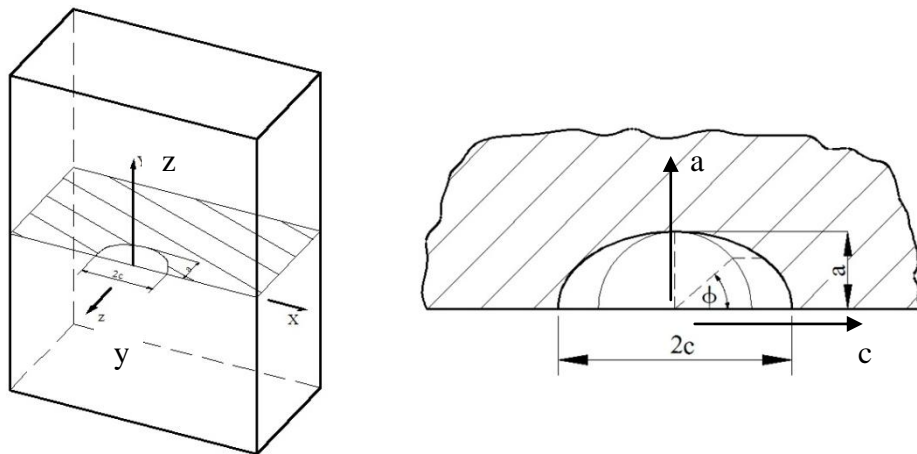


Figura 3.1. a) Barra com trinca semi-elíptica, b) Geometria elíptica da trinca 2D

Dependendo do lugar onde a trinca se gera na estrutura, as trincas superficiais podem se classificar essencialmente em três tipos: de canto ou quarto - elípticas, superficiais ou semi-elípticas e internas ou elípticas, vide Figura 3.2.

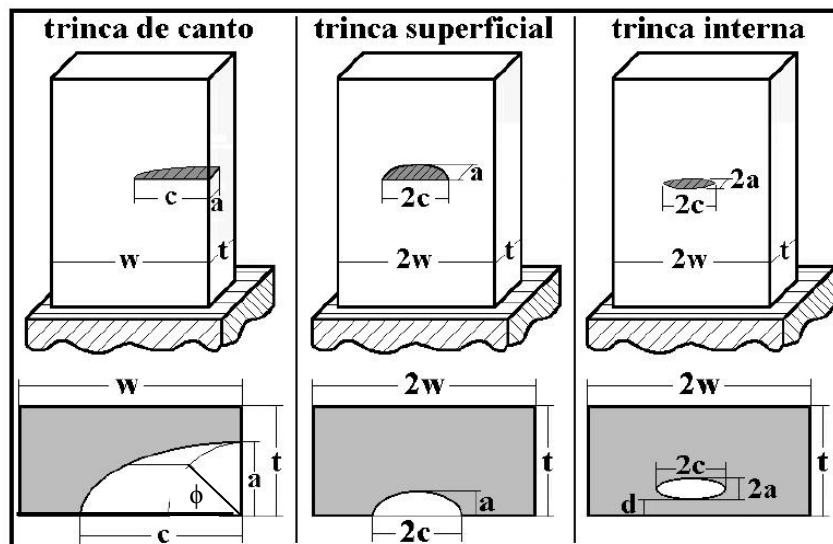


Figura 3.2 - Definição das dimensões a e c das trincas 2D

(Fadiga sob Cargas de Serviço, Castro & Meggiolaro, 2009)

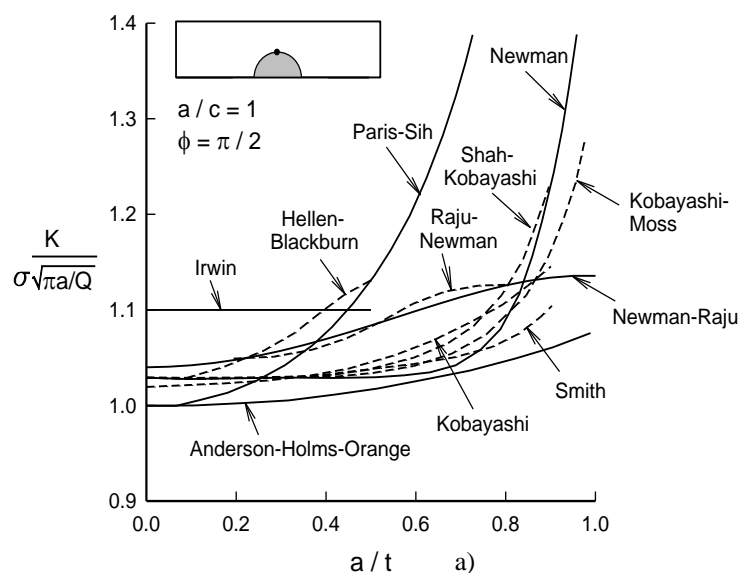
Para fazer a previsão de vida das trincas superficiais ao longo da sua propagação são necessárias soluções dos fatores de intensidade de tensão muito precisas para cada configuração de trinca já que ela vai mudando no crescimento. Por isso, devida a complexidade de tais problemas soluções exatas não são disponibilizadas. Ao invés disso, científicos tem que usar métodos analíticos de aproximação, métodos experimentais ou estimativas da própria engenharia para obter os fatores de intensidade de tensão. Nestas estimativas são especificadas variadas razões tais como: a razão a/t para profundidade da trinca a e a espessura t , a razão a/c para largura c e profundidade a , e outras mais que van dependendo de cada caso e tipo de trinca. Para corpos finitos todas as soluções requerem de métodos analíticos aproximados sendo os mais conhecidos o método dos elementos finitos, o método da integral de contorno e o método alternado. As expressões analíticas que explicam o comportamento da propagação de trincas semi-elípticas em geral são complexas e descritas pelos fatores de intensidade de tensões predominantes $K_I(a)$ e $K_I(c)$ a diferencia do que ocorre com uma trinca unidimensional que é controlada simplesmente por um fator de intensidade de tensão predominante.

3.2. Trincas Superficiais ou Semi-Elípticas

As magnitudes dos fatores de intensidade de tensão que controlam o crescimento da frente da trinca 2D variam progressivamente de ponto a ponto

enquanto ela se propaga, do mesmo modo, cada ponto da frente da trinca tem um fator de intensidade de tensão diferente, valores máximos e mínimos de K_I sempre ocorrem em qualquer um dos semi-eixos da elipse (Castro, 2009). Tanto $K_I(a)$ quanto $K_I(c)$ dependem de outras variáveis, tais como σ , a/c , a/t , c/w e ϕ , por exemplo, os fatores de intensidade de tensão para trincas superficiais em barras retangulares segundo Newman-Raju (1988) são: $K_I(a) = f(\sigma, a, c/w, a/t, a/c, \phi)$ e $K_I(c) = f(\sigma, c, c/w, a/t, a/c, \phi)$.

Existem vários estudos que tentam ajustar o comportamento da propagação de trincas bidimensionais, no entanto poucas soluções exatas são fornecidas na literatura, autores como Smith, Kobayashi, Sih, Newman têm obtido soluções muito próximas para uma trinca semi-elíptica dentro de um sólido infinito submetido a carregamento não uniforme. A Figura 3.3 mostra diversas curvas de comportamento baseadas no chamado fator de intensidade de tensões normalizado que é a razão do fator de intensidade de tensões dividido pela tensão normal aplicada vezes uma expressão numérica Q que muda dependendo da geometria do corpo de prova e do tipo de sollicitação aplicada. Os casos mostrados descrevem dos tipos diferentes de frentes de trinca bidimensional para um momento específico da propagação, o primeiro caso para uma taxa $a/c=1$ e o segundo para uma taxa $a/c=0.2$ é assumido que a geometria elipsoidal referida à razão a/c fica constante na propagação fica constante. Na realidade esta razão a/c muda várias vezes e em diferentes proporções ao longo da propagação da trinca real.



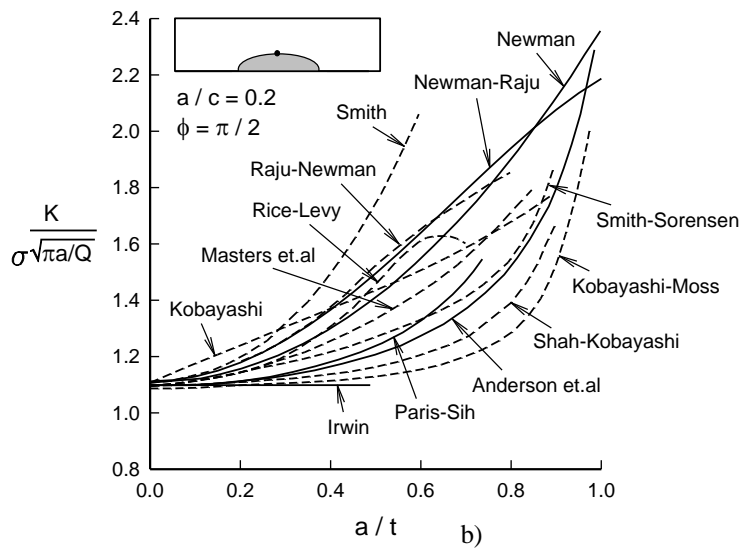


Figura 3.3- Comportamento da frente de uma trinca semi - elíptica para uma razão constante a) $a/c=1$, $\phi = \pi/2$ b) $a/c=0.2$, $\phi = \pi/2$ sob tensão remota.
(Raju, Life Prediction Methodology and Validation for SurfaceCracks, 2007)

Sendo assim, Newman & Raju (1984) publicaram para a NASA diferentes expressões para trincas elípticas, semi-elípticas (Figura 3.4) e quarto - elípticas sujeitas à tração.

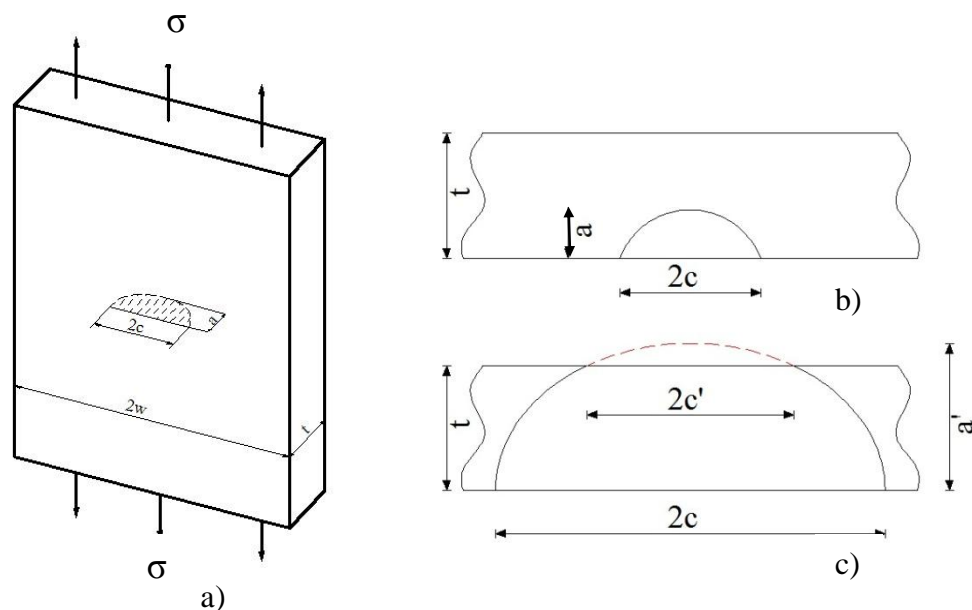


Figura 3.4- Definição das dimensões a e $2c$ das trincas semi-elípticas a) Placa retangular com trinca semi-elíptica b) Trinca 2D semi-elíptica $a/t \leq 1$ c) Trinca 2D semi-elíptica em transição, $a/t > 1$.

3.2.1. Trincas Semi-Elípticas, $a/t \leq 1$

Segundo Newman & Raju, as expressões que governam a propagação de uma trinca superficial semi-elíptica de largura $2c < 2w$, profundidade $a < t$, a uma razão a/t de 0 até 1, razão de crescimento a/c entre 0.2 até 2, placa retangular de largura $2w$ e espessura t , para uma solicitação a tração (modo I), são:

$$K_I(a) = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot F \cdot \frac{M}{\sqrt{Q}} \cdot G \quad (3.1)$$

$$K_I(c) = \sigma \sqrt{\pi c} \cdot F \cdot \frac{M}{\sqrt{Q}} \cdot \frac{a}{c} \cdot G \quad (3.2)$$

$$F\left(\frac{c}{w}, \frac{a}{t}\right) = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi c}{2w} \cdot \sqrt{\frac{a}{t}}\right)} \cdot \left[1 - 0.025 \cdot \left(\frac{c}{w} \cdot \sqrt{\frac{a}{t}}\right)^2 + 0.06 \cdot \left(\frac{c}{w} \cdot \sqrt{\frac{a}{t}}\right)^4\right] \quad (3.3)$$

Se $a \leq c$

$$M\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t}\right) = 1.13 - 0.09 \cdot \frac{a}{c} + \left(-0.54 + \frac{0.89}{0.2 + \frac{a}{c}}\right) \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 + \left(0.5 - \frac{1}{0.65 + \frac{a}{c}} + 14 \cdot \left(1 - \frac{a}{c}\right)^{24}\right) \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^4 \quad (3.4)$$

$$Q\left(\frac{a}{c}\right) = 1 + 1.464 \cdot \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65} \quad (3.5)$$

$$G\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t}\right) = 1.1 + 0.35 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \quad (3.6)$$

Se $a > c$

$$M\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t}\right) = \frac{c}{a} + 0.04 \cdot \left(\frac{c}{a}\right)^2 + \left(\frac{c}{a}\right)^{4.5} \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \cdot \left[0.2 - 0.11 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2\right] \quad (3.7)$$

$$Q\left(\frac{a}{c}\right) = 1 + 1.464 \cdot \left(\frac{c}{a}\right)^{1.65} \quad (3.8)$$

$$G\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t}\right) = 1.1 + 0.35 \cdot \left(\frac{c}{a}\right) \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \quad (3.9)$$

3.2.2 Trincas Semi-Elípticas, $a/t > 1$

Castro & Meggiolaro (2009) mostram expressões para trincas superficiais semi-elípticas, em transição para passante, dentro uma placa retangular de largura $2w$ e espessura t , de largura $2c < 2w$ na face dianteira e $2c'$ na face oposta ($c' < 0.9c$, caso contrario considere trinca passante), com profundidade imaginaria $a' > t$, perpendicular à tensão normal σ (modo I), precisão 3% .

$$K_I(a') = \sigma \sqrt{\pi a'} \cdot F' \cdot \frac{M'}{\sqrt{Q'}} \cdot 1.1 \quad (3.11)$$

$$K_I(c) = \sigma \sqrt{\pi c} \cdot F' \cdot \frac{M'}{\sqrt{Q'}} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot G' \quad (3.12)$$

$$a' = \frac{t}{\sqrt{1 - \left(\frac{c'}{c}\right)^2}} \quad (3.13)$$

$$\lambda = 1.23 \left(\frac{c}{1.23t}\right)^{\frac{2.3 - a'/t}{1.3}} \quad (3.14)$$

$$F'\left(\frac{c}{w}\right) = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi c}{2w}\right)} \cdot \left[1 - 0.025 \cdot \left(\frac{c}{w}\right)^2 + 0.06 \cdot \left(\frac{c}{w}\right)^4\right] \quad (3.15)$$

Se $\lambda < 1$

$$M'(\lambda) = \lambda + 0.04 \cdot (\lambda)^2 + 0.09 \cdot (\lambda)^{4.5} \quad (3.16)$$

$$Q'(\lambda) = 1 + 1.464 \cdot (\lambda)^{1.65} \quad (3.17)$$

$$G'(\lambda) = 1.1 + 0.35 \cdot \lambda \quad (3.18)$$

Se $\lambda \geq 1$

$$M(\lambda) = 1.09 - \frac{0.09}{\lambda} + \frac{0.89}{0.2 + \frac{1}{\lambda}} - \frac{1}{0.65 + \frac{1}{\lambda}} + 14 \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right)^{24} \quad (3.19)$$

$$Q'(\lambda) = 1 + 1.464 \cdot (\lambda)^{1.65} \quad (3.20)$$

$$G(\lambda) = 1.45 \quad (3.21)$$

A Figura 3.5 ilustra o comportamento de uma trinca bidimensional semi-elíptica usando as expressões formuladas por Newman-Raju com variação de ângulo ϕ para diversas razões de comprimento de trinca versus espessura $a/t = 1$, $a/t = 0.5$, $a/t = 0.25$, $a/t = 0$ e uma razão $a/c = 1$, razão comprimento c e largura w , $c/w = 0.1$, e fator de intensidade de tensões normalizado.

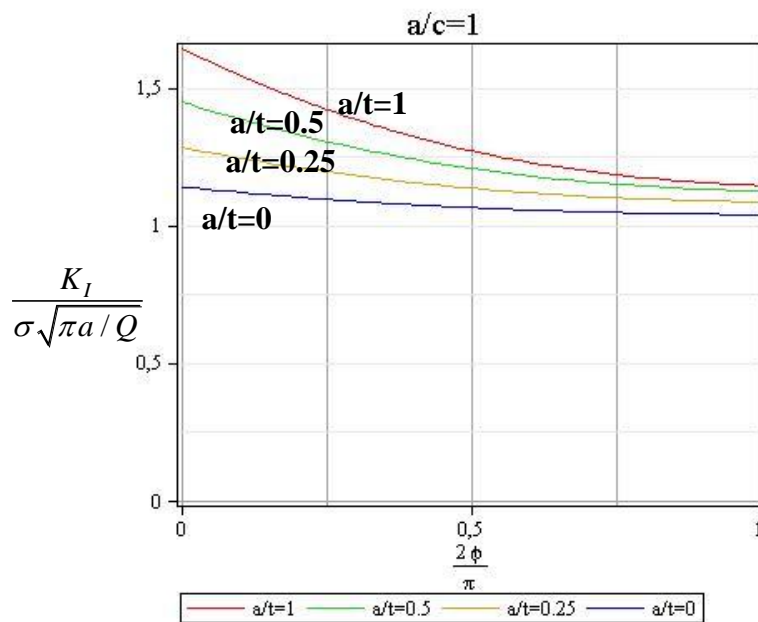


Figura 3.5 – Comportamento trinca semi – elíptica para diferentes razões a/t , $c/w = 0.1$ e $a/c = 1$.

A Figura 3.6 permite apreciar os valores do valor de intensidade de tensões ao longo da trinca para diferentes razões de $a/t=1,0.5,0.25,0$.

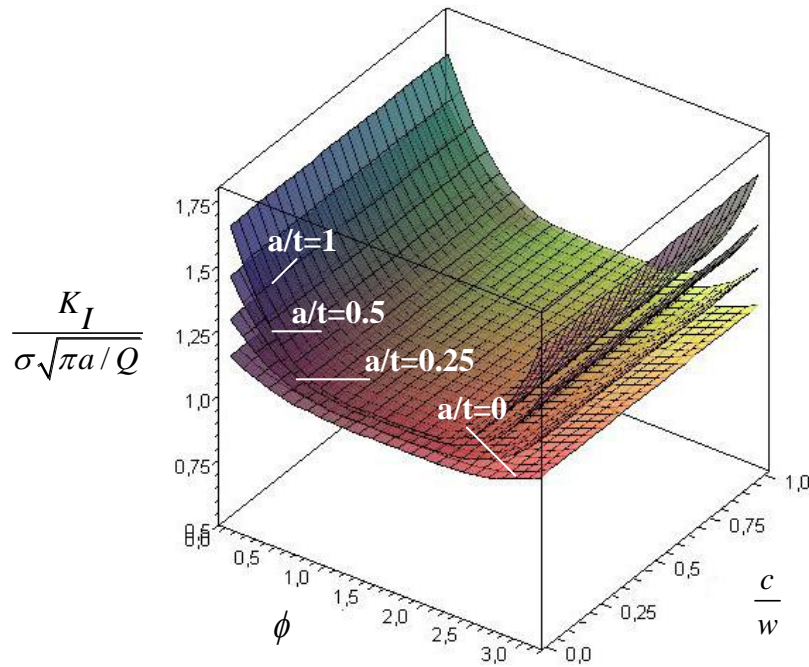


Figura 3.6- Distribuição do fator de intensidade de tensões ao longo da frente da trinca semi-elíptica ($a/c=1$, $a/t=1,0.75,0.5,0$, $c/w=0-1$, $h/w=1$, $\phi=0-\pi$)

Com o objetivo de ajustar as expressões analíticas formuladas por Newman & Raju que governam a propagação bidimensional uma trinca semi-elíptica é calculada num sólido com geometria retangular ($2H = 8$, $2w = 8$, $t = 2$, $a = c = 0.8$, $\sigma=1$ [MPa]). Ao mesmo tempo, os valores dos fatores de intensidade de tensão são comparados a través da modelagem numérica (ABAQUS e FRANC3D) para o mesmo modelo. A Figura 3.7 mostra os resultados ao longo da frente da trinca obtidos com uso das expressões e o FRANC3D.

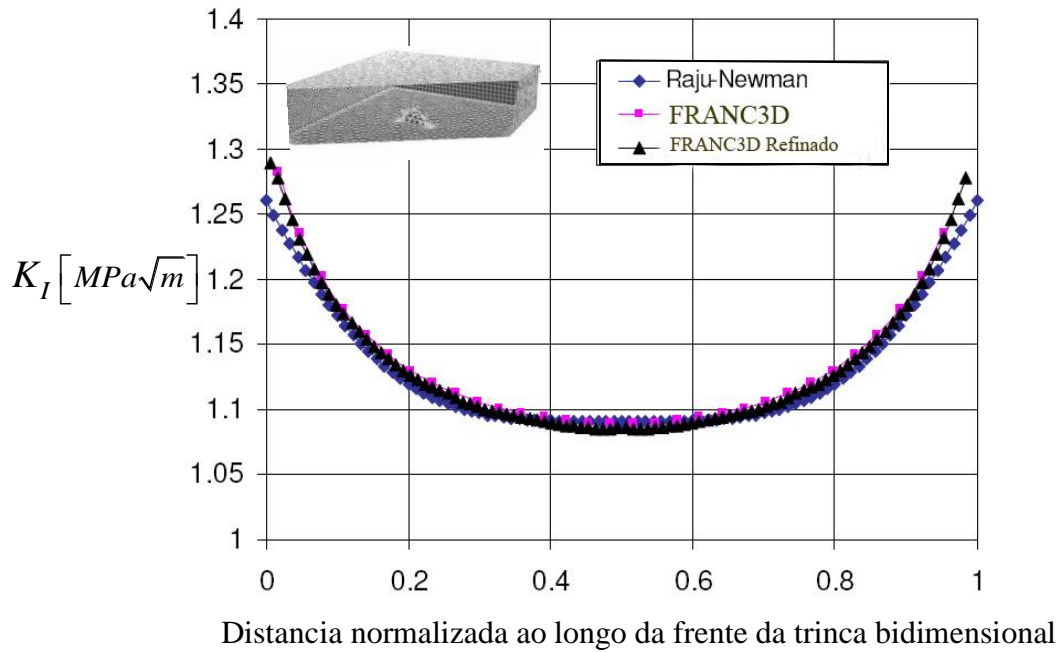


Figura 3.7- Distribuição do Fator de Intensidade de Tensões normalizado ao longo da frente da trinca para uma trinca semi – elíptica

($a/c = 1$, $a/t = 0.4$, $c/w = 0.1$, $h/w = 1$)

A Tabela 3.1 mostra a comparação dos resultados obtidos para $K_I(a)$ e $K_I(c)$ nos semi-eixos da elipse, FRANC3D versus expressões numéricas Newman –Raju.

Fonte	$K_I(a)$ [Mpa√m]	$K_I(c)$ [Mpa√m]
Newman-Raju	1.26	1.25
FRANC3D	1.28	1.27

Tabela 3.1.- Comparação das expressões analíticas versus os resultados da modelagem para valores predominantes $K_I(a)$ e $K_I(c)$

3.3. Trincas Bidimensionais de Canto ou Quarto-Elípticas

O escopo deste trabalho se concentra no uso de placas com seção transversal retangular como corpos de prova onde são inseridas trincas de canto quarto - elípticas.

A geometria da trinca bidimensional neste tipo de formato é parecida com a da trinca semi-elíptica, exceto que agora consideramos a largura c e não $2c$ como o caso de trincas semi-elípticas, na direção x ; Figura 3.8.

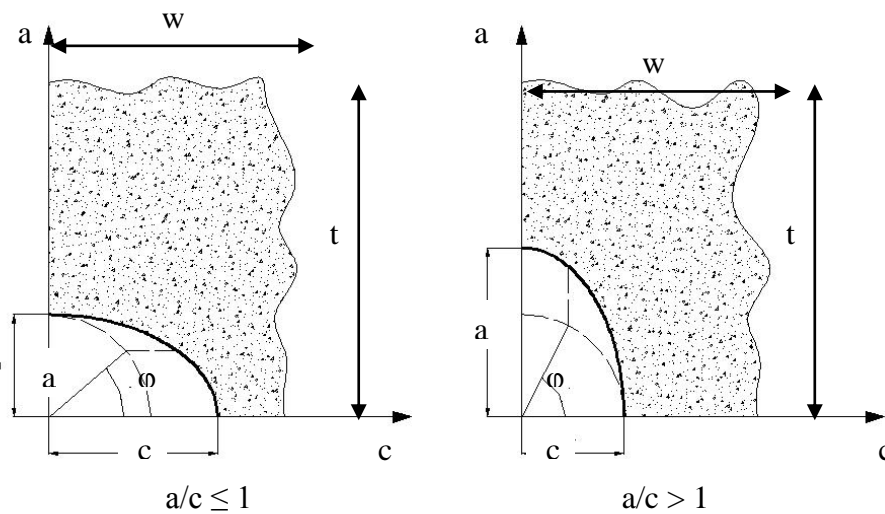


Figura 3.8- Geometria de uma trinca quarto-elíptica. a) $a/c \leq 1$, b) $a/c > 1$

Não existe na literatura informação referida ao estágio da transição de uma trinca bidimensional para unidimensional por fadiga sendo que é um tipo de comportamento que acontece bastante em estruturas reais, as trincas nascem e crescem em duas direções e depois mudam para trincas passantes.

Existem duas razões diferentes com as quais trabalharemos ao longo do trabalho, a primeira e referida à proporção geométrica entre a e c através das taxas $a/c \leq 1$ ou $a/c > 1$ e a segunda e referida à proporção do avanço de trinca na direção a versus a espessura t através das taxas $a/t \leq 1$ ou $a/t > 1$, valores compreendidos para a razão $a/t \leq 1$ significa que a trinca ainda esta no estágio de crescimento bidimensional, não existe transição alguma. Valores maiores a $a/t > 1$ se referem a um trinca bidimensional em estágio de transição, a qual muda a unidimensional depois alguns ciclos, Figura 3.9.

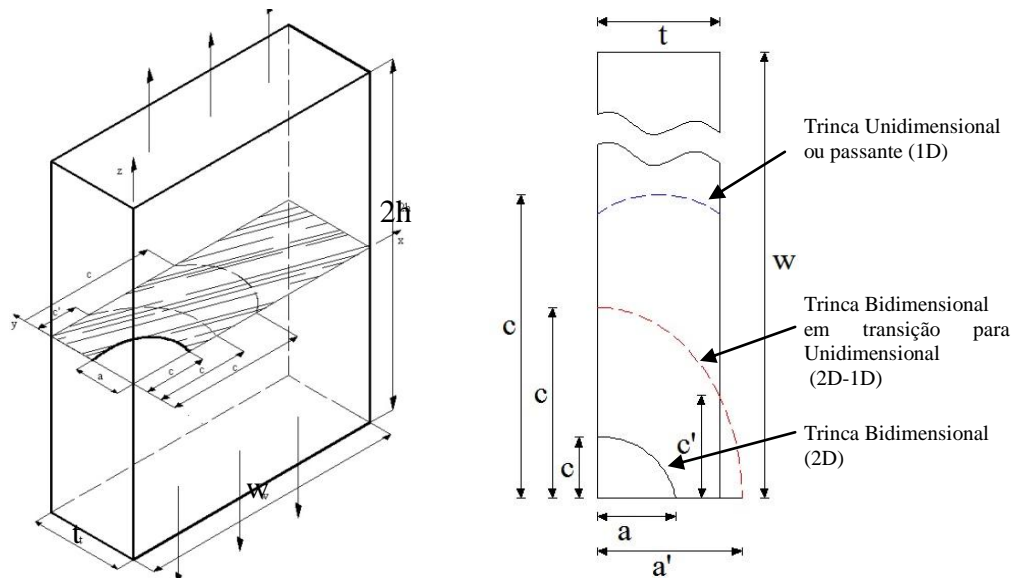


Figura 3.9 - Placa de largura w , espessura t com trinca de canto quarto-elíptica, em transição para passante, $c/w < 1$ - na face dianteira e c' na face oposta ($c'/c \leq 1$).

3.3.1. Trincas Quarto-Elípticas, $a/t \leq 1$

Em 1973 Kobayashi & Eneanya (1976) estudaram um sólido infinito com uma trinca elíptica inserida num canto com aplicação de uma pressão fictícia uniforme, Figura 3.10.

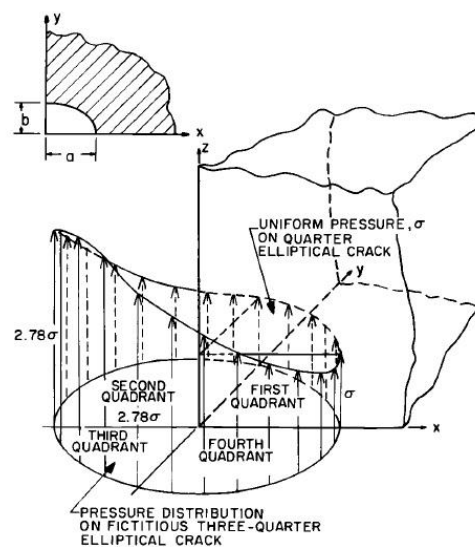


Figura 3.10 – Distribuição da pressão numa trinca quarto- elíptica

Kobayashi & Eneanya também encontraram resultados através do método dos elementos finitos para fatores de intensidade de tensão normalizados e para três razões específicas, $a/c = 0.98$, $a/c = 0.4$ e $a/c = 1$, Figura 3.11. Porém, essas expressões não

são totalmente úteis para o estudo proposto neste trabalho, pois tem-se aqui o interesse em conhecer o fator de intensidade de tensões na zona de transição da trinca bidimensional para unidimensional. Newman & Raju também formulam expressões para trincas bidimensionais em função do ângulo.

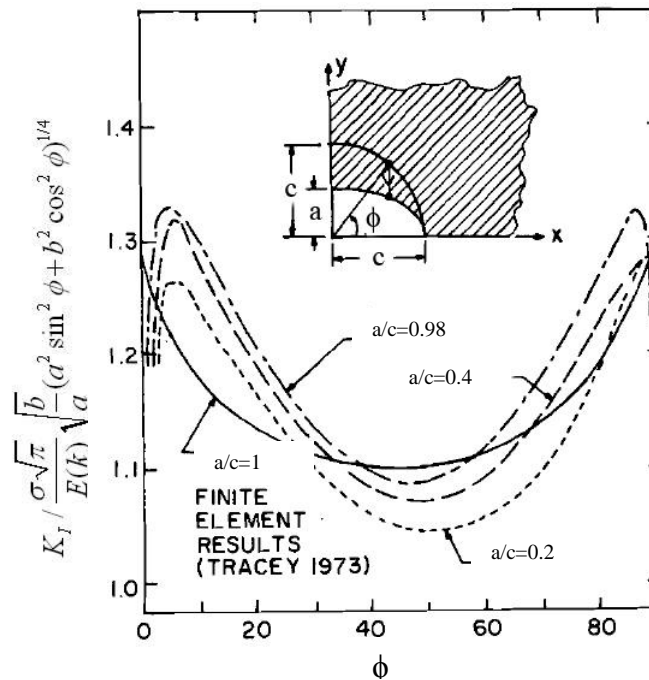


Figura 3.11- Simulação do comportamento de uma trinca quarto-elíptica para $a/c = 1$, $a/c = 0.98$, $a/c = 0.4$, $a/c = 0.2$. (Kobayashi & Enetanya)

As equações para uma trinca quarto-elíptica com valores de $a/t \leq 1$ são função da tensão normal σ , Q e o fator $F_c\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{b}, \phi\right)$. Newman & Raju citam estas expressões que servem para $0.2 \leq a/c \leq 1$, $a/t < 1$ e $0 \leq \phi \leq \pi/2$ para $c/w \leq 0.5$

$$K = \sigma_i \cdot \sqrt{\pi \left(\frac{a}{Q}\right)} \cdot F_c\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{b}, \phi\right) \quad (3.22)$$

$$F_c = \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] g_1 g_2 f_\phi f_w \quad (3.23)$$

Para $(a/c) \leq 1$

$$M_1 = 1.08 - 0.03 \left(\frac{a}{c} \right) \quad (3.24)$$

$$M_2 = -0.44 + \frac{1.06}{0.3 + \frac{a}{c}} \quad (3.25)$$

$$M_3 = -0.5 + 0.25 \left(\frac{a}{c} \right) + 14.8 \left(1 - \frac{a}{c} \right)^{15} \quad (3.26)$$

$$g_1 = 1 + \left[0.08 + 0.4 \left(\frac{a}{c} \right)^2 \right] (1 - \text{sen}(\phi))^3 \quad (3.27)$$

$$g_2 = 1 + \left[0.08 + 0.15 \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right] (1 - \cos(\phi))^3 \quad (3.28)$$

$$f_w = 1 - 0.2\lambda + 9.4\lambda^2 - 19.4\lambda^3 + 27.1\lambda^4 \quad \text{Só para } \frac{c}{w} < 0.5 \quad (3.29)$$

onde

$$\lambda = \frac{c}{b} \sqrt{\frac{a}{t}} \quad (3.30)$$

$$Q = 1 + 1.464 (a/c)^{1.65} \quad \text{Para } a/c \leq 1 \quad (3.31)$$

$$Q = 1 + 1.464 (c/a)^{1.65} \quad \text{Para } a/c > 1 \quad (3.32)$$

No limite em que $\frac{a}{t}$ se aproxima da unidade, com $\frac{a}{c} = 1$ e $\phi = 0$, o fator de intensidade de tensões se reduz a $K = \sigma \sqrt{\pi c} \cdot 1.11 \cdot f_w$. As Figuras 3.12, 3.14 e 3.16 mostram o comportamento de uma trinca quarto-elíptica para diferentes razões a/c e diversos valores de razão a/t para uma razão fixa $c/w = 0.1$. Figuras 3.13, 3.15 e 3.17 mostram o comportamento para valores $a/c = 0.2, 0.5, 1$ e $c/w = 0-1$.

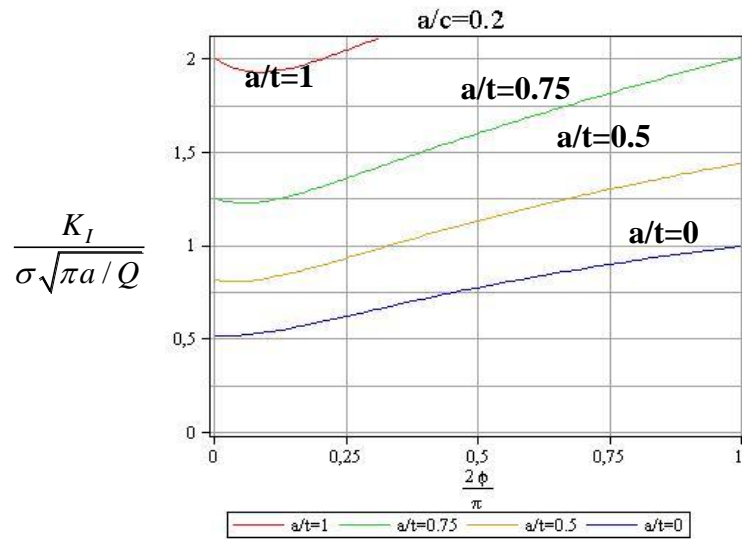


Figura 3.12 - Distribuição do Fator de Intensidade de tensões ao longo da frente da trinca quarto - elíptica ($a/c=0.2$, $a/t=1,0.75,0.5,0$, $c/w=0.1$, $h/w=1$)

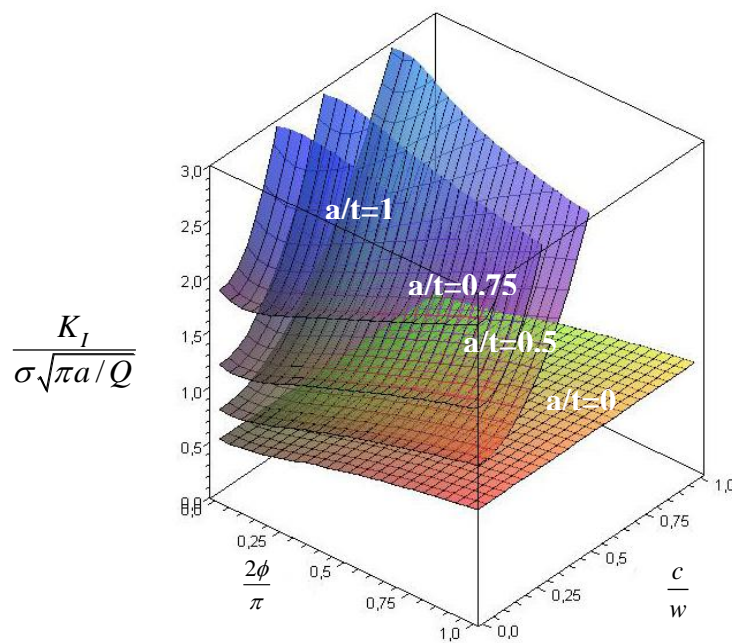


Figura 3.13. Distribuição do Fator de Intensidade de tensões ao longo da frente da trinca para uma trinca quarto – elíptica

($a/c=0.2$, $a/t=1,0.75,0.5,0$, $c/w=0-1$, $h/w=1$)

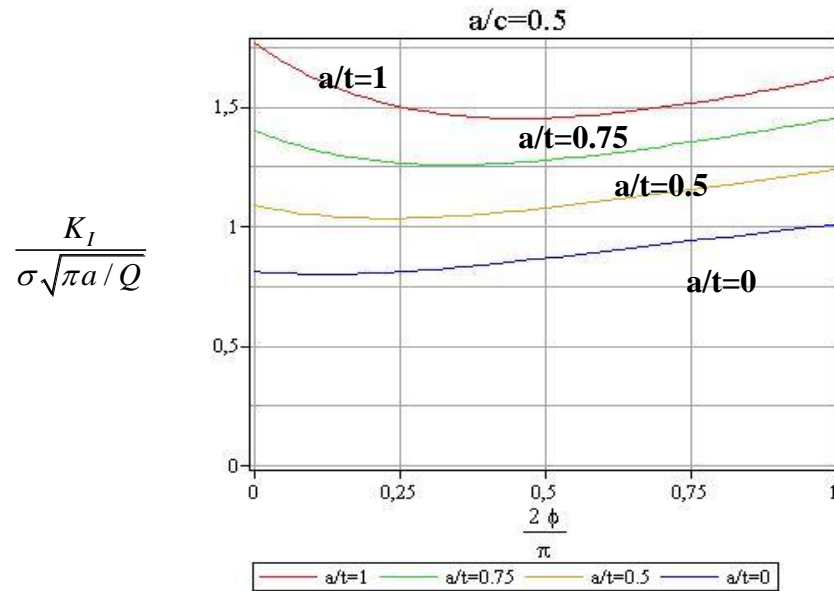


Figura 3.14. Distribuição do Fator de Intensidade de tensões ao longo da frente da trinca quarto-elíptica ($a/c=0.5$, $a/t=1,0.75,0.5,0$, $c/w=0-1$, $h/w=1$)

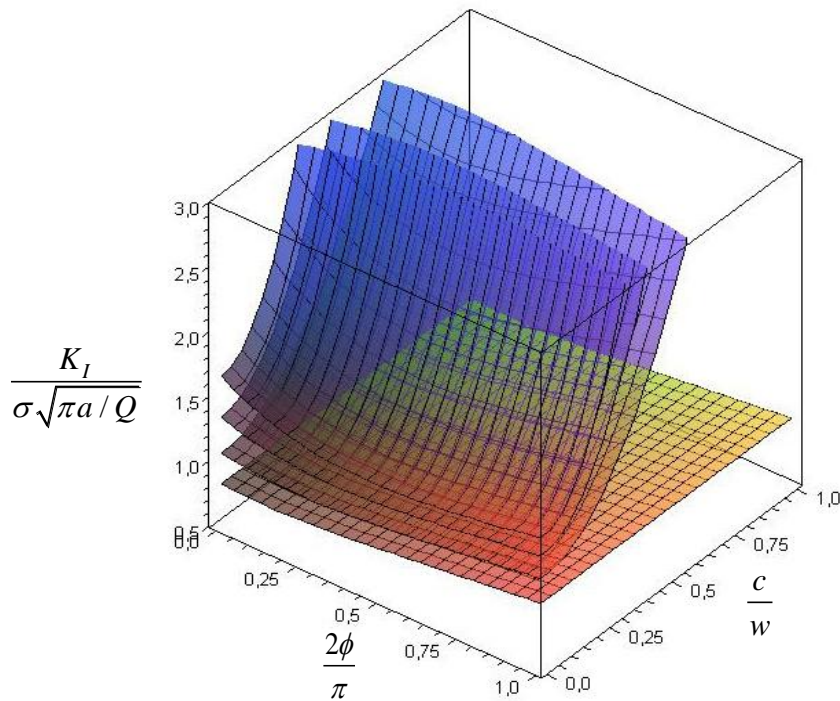


Figura 3.15- Distribuição do Fator de Intensidade de tensões ao longo da frente da trinca para uma trinca quarto elíptica
($a/c=0.5$, $a/t=1,0.75,0.5,0$, $c/w=0-1$, $h/w=1$)

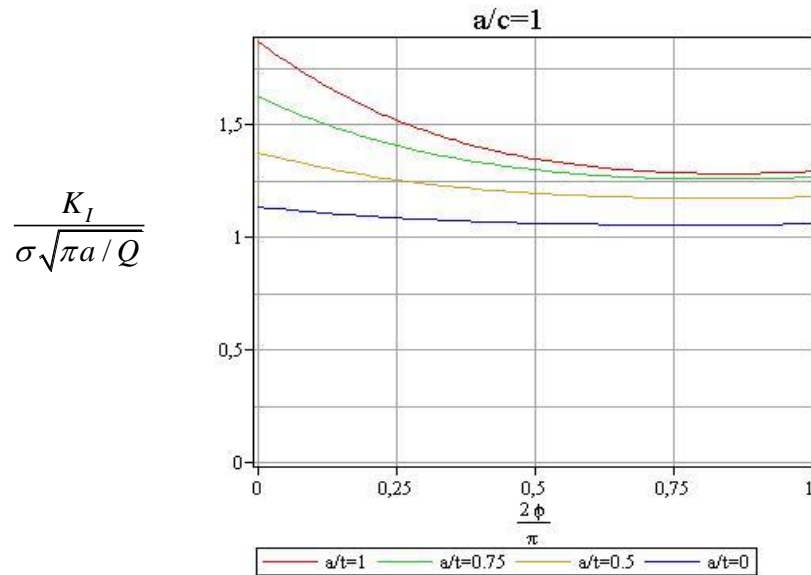


Figura 3.16- Distribuição do Fator de Intensidade de tensões ao longo da frente da trinca para uma trinca quarto elíptica

($a/c=1$, $a/t=1,0.75,0.5,0$, $c/w=0.1$, $h/w=1$)

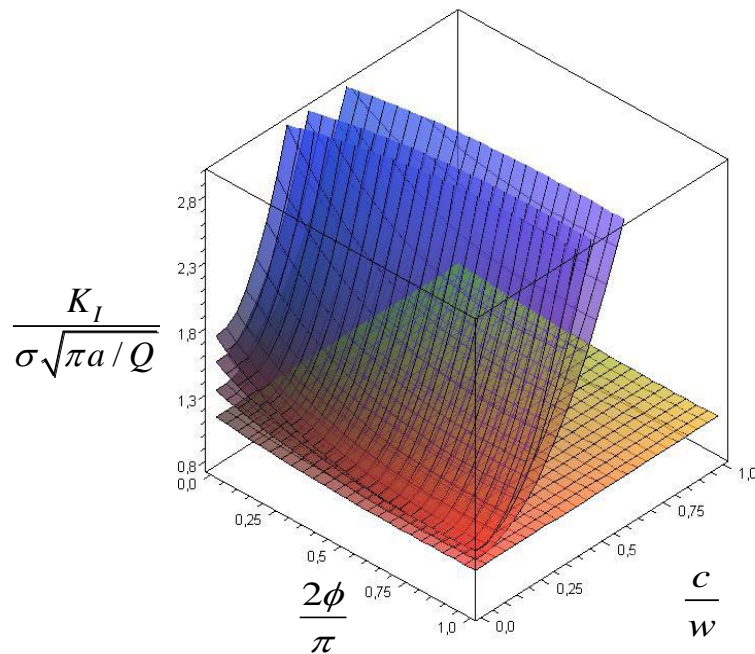


Figura 3.17- Distribuição do Fator de Intensidade de tensões ao longo da frente da trinca para uma trinca quarto elíptica

($a/c=1$, $a/t=1,0.75,0.5,0$, $c/w=0-1$, $h/w=1$)

A Figura 3.18 mostra uma simulação, onde foi inserida uma trinca virtual bidimensional quarto - elíptica dentro da barra retangular a qual pretende demonstrar a proximidade da modelagem numérica (ABAQUS e FRANC3D) versus as expressões empíricas formuladas por Newman & Raju, a trinca tem comprimento $a=c=5[\text{mm}]$, barra retangular com dimensões $h=200[\text{mm}], w=49[\text{mm}], t=10[\text{mm}]$, $\sigma=1[\text{MPa}]$, $a/t < 1$.

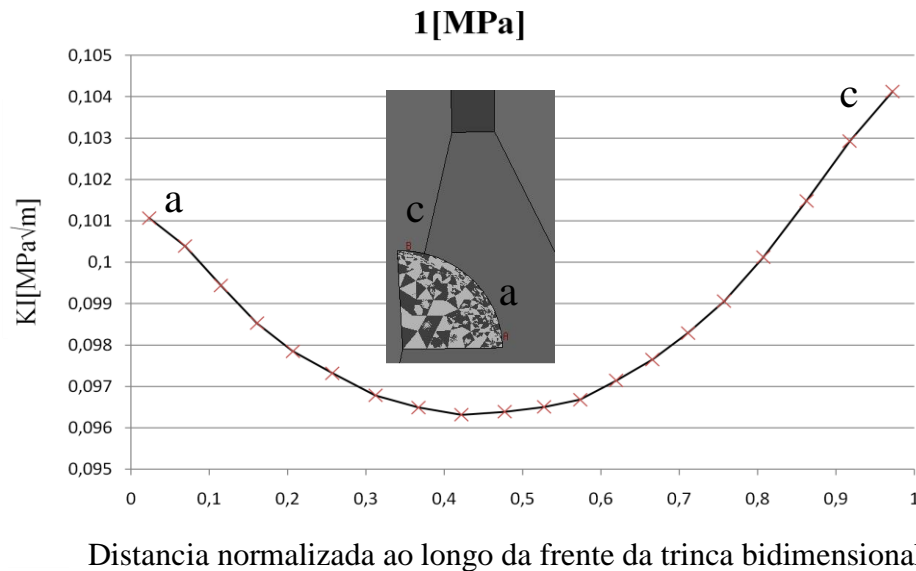


Figura 3.18 - Distribuição do Fator de Intensidade de tensões ao longo da frente da trinca para uma trinca quarto elíptica, $a/t \leq 1$.

Os resultados dos fatores de intensidade predominantes $K_I(a)$ e $K_I(c)$ de tensão nos extremos da trinca são mostrados na Tabela 3.2.

Fonte	$K_I(a)$ [Mpa√m]	$K_I(c)$ [Mpa√m]
Newman-Raju	0.11	0.12
FRANC3D	0.10	0.10

Tabela 3.2.- Comparação das expressões analíticas versus os resultados da modelagem pelo FRANC3D para $K_I(a)$ e $K_I(c)$, Trinca Quarto - Elíptica $a=c=5[\text{mm}]$, $\sigma=1[\text{MPa}]$, $a/t \leq 1$.

3.3.2. Transição de Trincas Quarto-Elípticas, $a/t > 1$

Castro & Meggiolaro (2009) sugerem expressões para calcular os fatores de intensidade de tensão $K_I(c)$ e $K_I(a')$ para taxas $a/t > 1$ usando uma profundidade imaginária as quais são calculadas em uma placa com seção retangular de largura w e espessura t com trinca quarto - elíptica em transição para passante. Largura $c/w < 1$ na face dianteira e c' na face oposta ($c'/c < 0.9$). Para valores de $c'/c > 0.9$, se considera a trinca como passante com profundidade $a'/t > 1$ e perpendicular a tensão normal σ (modo I). A variável c' ajuda a determinar o fator de intensidade de tensões $K_I(c')$ o qual influi diretamente no controle da transição da trinca bidimensional para unidimensional. A obtenção experimental dos fatores $K_I(c)$, $K_I(a')$ e $K_I(c')$ ao longo da propagação 2D e transição 2D-1D são o objetivo principal desta dissertação.

A Figura 3.19 mostra as variáveis geométricas usadas nas expressões empíricas.

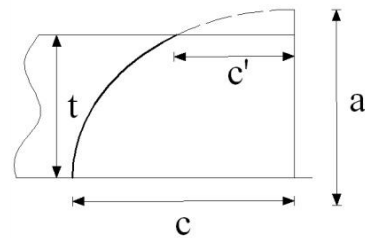


Figura 3.19- Placa retangular com trinca quarto- elíptica em transição para passante, ($c/w < 1, a'/t > 1$)

$$K_I(a') = \sigma_i \cdot \sqrt{\pi t} \cdot F_q' \cdot \frac{M_q'}{Q'} \cdot G_{q,a}' \quad (3.33)$$

$$K_I(c') = \sigma_i \cdot \sqrt{\pi c} \cdot F_q' \cdot \frac{M_q'}{Q'} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot G_{q,c}' \quad (3.34)$$

$$a' = \frac{t}{\sqrt{1 - \left(\frac{c'}{c}\right)^2}} \quad (3.35)$$

$$\lambda = 1.73 \left(\frac{c}{1.73t} \right)^{\frac{2.3 - a'/t}{1.3}} \quad (3.36)$$

$$F_q' = \sec\left(\frac{\pi c}{2w}\right) \left[0.752 + 2.02 \frac{c}{w} + 0.37 \left(1 - \sin\left(\frac{\pi c}{2w}\right) \right)^3 \right] \sqrt{\frac{2w}{\pi c} \tan\left(\frac{\pi c}{2w}\right)} \quad (3.37)$$

Para $\lambda \geq 1$

$$M_q' = 0.14 + 0.22 \frac{1}{\lambda} + \frac{1.06}{0.3 + \frac{1}{\lambda}} + 14.8 \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right)^{15} \quad (3.38)$$

$$G_{q,a}' = 1.23 \quad (3.39)$$

$$G_{q,c}' = 1.48 \quad (3.40)$$

$$Q' = 1 + \left(1.464 \frac{1}{\lambda} \right)^{1.65} \quad (3.41)$$

Para $\lambda < 1$

$$M_q' = 1.08\lambda - 0.03\lambda^2 + 0.125\lambda^{2.5} \quad (3.42)$$

$$G_{q,a}' = 1.08 + 0.15\lambda^2 \quad (3.43)$$

$$G_{q,c}' = 1.08 + 0.4\lambda^2 \quad (3.44)$$

$$Q' = 1 + (1.464\lambda)^{1.65} \quad (3.45)$$

A Figura 3.20 mostra o comportamento de uma trinca quarto - elíptica para diferentes razões $a/t \leq 1$ antes da transição e diversos valores de razão $a/t > 1$ no gráfico como a/t e a/t' respectivamente, mostradas para uma razão fixa $c/w = 0.5$.

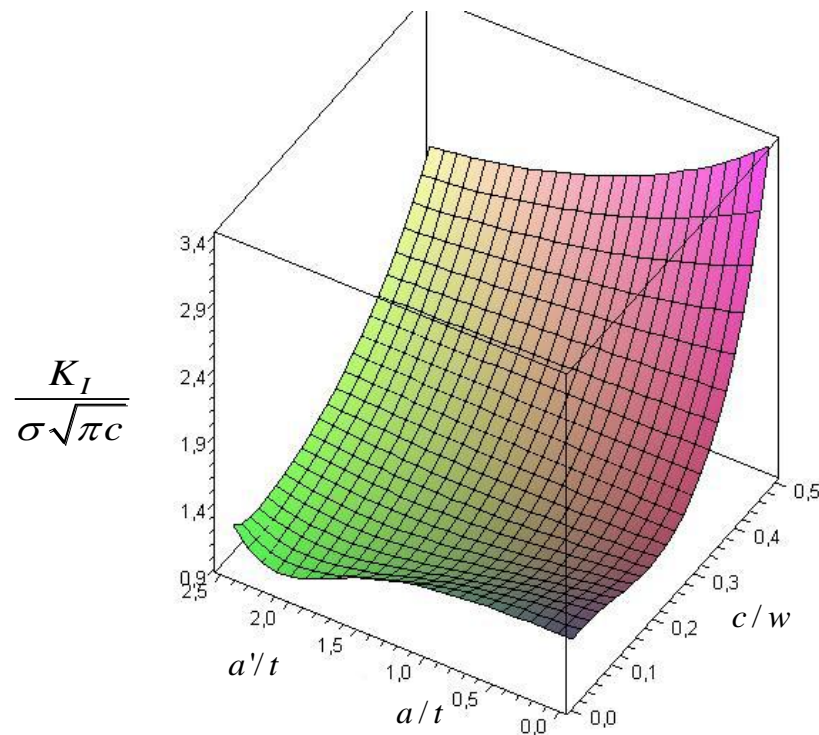


Figura 3.20- Placa com seção retangular com trinca quarto-elíptica em transição para passante, Fator de intensidade de tensões normalizado $K_I(c) / \sigma\sqrt{\pi c}$.

Com a finalidade de comparar as expressões analíticas formuladas por Castro & Meggiolaro versus a modelagem numérica a Figura 3.21 mostra a simulação (ABAQUS e FRANC3D) de uma trinca virtual bidimensional quarto - elíptica em transição, a trinca tem comprimento $a'=c=12$ [mm], dentro um a barra retangular com dimensões $h=200$ [mm], $w=49$ [mm], $t=10$ [mm], $\sigma=1$ [MPa], $a/t > 1$. A interseção da trinca virtual com o modelo fornece diretamente o comprimento c' . Os valores predominantes $K_I(c)$ e $K_I(c')$ são os valores na transição, percebe-se que o valor de $K_I(c')$ é maior do que $K_I(c)$ na transição. A parte experimental desta dissertação tem a intenção de demonstrar isso, conhecer o que acontece na transição das trincas bidimensionais para o caso quarto - elíptico, após disso comparar com a parte numérica.

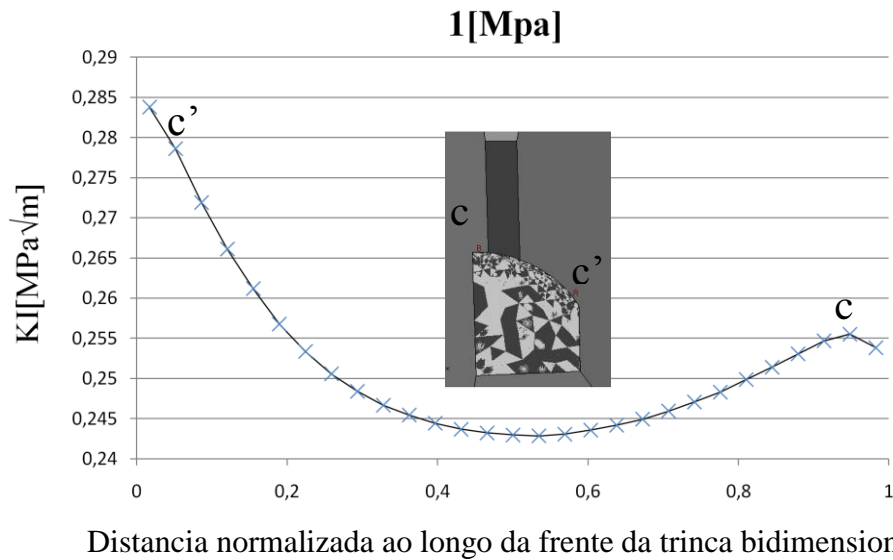


Figura 3.21 - Distribuição do Fator de Intensidade de tensões ao longo da frente da trinca para uma trinca quarto elíptica, $a/t > 1$, usando a simulação numérica, FRANC3D.

Os resultados dos fatores de intensidade predominantes $K_I(c)$ e $K_I(c')$ de tensão nos extremos da trinca são mostrados na Tabela 3.4. Perceba-se que não existe um valor $K_I(c')$ que identifique a transição nas expressões formuladas por os autores.

Fonte	$K_I(c)$ [Mpa√m]	$K_I(c')$ [Mpa√m]
Castro & Meggiolaro	0.27	-
FRANC3D	0.25	0.28

Tabela 3.3.- Comparação das expressões analíticas versus os resultados da modelagem pelo FRANC3D para $K_I(c')$ e $K_I(c)$, Trinca Quarto - Elíptica $a=c=12$ [mm], $\sigma=1$ [MPa], $a/t > 1$.

4. Abordagem Experimental

Neste capítulo descreve-se tanto o processo inicial para a determinação da escolha do material quanto os procedimentos para a determinação das propriedades de fadiga do policarbonato e finalmente os testes para estudar a transição da propagação da trinca 2D para 1D.

4.1. Introdução

Foram testados inicialmente vinte corpos de prova (CPs) tipo C(T) (*Compact Tension*) de *polimetilmetacrilato* e vinte e oito de *policarbonato* com o objetivo de controlar e entender a propagação de trincas nestes tipos de materiais. Com a finalidade de levantar as propriedades de fadiga do material policarbonato foram ensaiados quatro corpos-de-prova tipo ESE(T) (*Eccentrically-Loaded Single Edge Crack Specimen*) segundo a norma standard para medição de trincas por fadiga ASTM 647. Foram produzidos treze CPs com defeito tipo quarto - elíptico, C2D-PC para o estudo da propagação bidimensional ($a/t \leq 1$) e da transição da trinca bidimensional para unidimensional ($a/t > 1$). Para finalizar foram ensaiados três CPs para ensaios de tração com o intuito de conhecer algumas propriedades mecânicas do material.

4.2. Métodos de Aquisição de Dados

Existem varias técnicas diferenciadas para medir a propagação de trincas em materiais metálicos. Podemos citar entre as principais os métodos de queda de potencial, observação visual, ultrassom, CMOD. Uma técnica bastante usada é a queda de potencial, a qual é usada através da aplicação de uma corrente continua num corpo de prova com entalhe. Dois furos são feitos nas proximidades da ponta da trinca que vão a servir como terminais elétricos, positivo e negativo. Basicamente a diferença de potencial aumenta quando a propagação da trinca cresce ao longo da ponta da trinca. Esse incremento de diferença de potencial é comparado com a voltagem do corpo-de-prova sem crescimento de trinca, medindo-se assim o crescimento através de uma curva de calibração. Porém

devido a que trabalharemos com um polímero usaremos simplesmente um Microscópio X-Y.

4.3. Microscópio X-Y

O microscópio X-Y utilizado, mostrado na Figura 4.1, tem uma lente marca Nikon Auto 1:3.5, lente 43-86 mm, o corpo microscópio marca Bausch&Lomb, Tipo Newport. O microscópio tem a propriedade de se deslocar nos eixos X e Y para assim conhecer qualquer tipo de coordenada relativa dentro do corpo-de-prova. Sendo que possui dos deslocamentos globais nos eixos x e y sem contador de medida, além disso tem dois deslocamentos locais também em x e y com parafuso micrométrico de alta precisão dentro de uma rosca ajustável. A circunferência de rosca (tambor) é dividida em 50 partes iguais, possibilitando leituras de até 0.01mm. O uso do Microscópio X-Y serve para medir os incrementos do comprimento da trinca na fase de propagação. O equipamento foi usado nos pré-ensaios de escolha de material, nos ensaios de levantamento de propriedades de fadiga do policarbonato usando as técnicas *K-Increasing* e *K-decreasing* quanto para os ensaios de propagação de trinca bidimensional. Ambos para determinar os deslocamentos da frente da trinca.

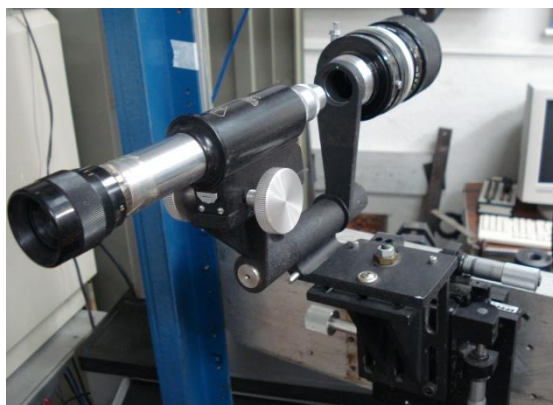


Figura 4.1 - Microscópio X-Y, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

4.4. Máquina de Ensaio de Fadiga

A máquina utilizada neste trabalho para os ensaios de levantamento de propriedades a fadiga do policarbonato, propagação bidimensional e tração são feitos através de uma máquina marca MTS modelo 810 controlada por uma servo-válvula. A MTS 810 tem uma capacidade de carga de até 250 kN e rigidez de 0.43 GN/m. O fluido hidráulico é fornecido por uma bomba hidráulica a uma pressão de 190 bar. A máquina está localizada no Laboratório de Fadiga da PUC-Rio e tem como entrada de controle um sinal de corrente de -40 mA a +40 mA, um pistão com capacidade de 250 kN, um LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) que mede o deslocamento do atuador, e uma célula de carga de capacidade 250 kN. A máquina possui um sistema de aquisição de dados composto de um controlador digital com canais de entrada para carga, deformação e deslocamento do pistão. A comunicação entre o controlador e a máquina é através de um computador que armazena e analisa os dados. Por meio do programa *TestStarII* são realizados os ensaios de fadiga e tração, estas aplicações servem para controlar a servo-válvula que controla o atuador hidráulico.

4.5. Comportamento dos Polímeros

A finalidade primeira do estudo da propagação bidimensional está realmente focada a materiais metálicos já que são as estruturas metálicas onde mais acontece o problema de trincamento por fadiga. Contudo a problemática de medição que apresentam os metais a fadiga quando se deseja estudar propagação bidimensional e muito grande sendo que existem limitações tanto visuais, devido a que tratamos com sólidos opacos, quanto também no referido as medições de deformações plásticas na ponta da trinca devido ao formato curvo da frente da trinca.

Ao longo da pesquisa surgem estas limitantes técnicas para conseguir estudar o comportamento e o formato da trinca bidimensional já que a premissa é entender e medir a transição do formato semi-elíptico da trinca bidimensional se-propagando. Apesar de existir equipamento de aquisição de dados sofisticado que ajuda a conhecer este tipo de conduta em trincas passantes ou 1D não é possível vincular estas técnicas em trincas 1D com as trincas 2D. Sendo assim, e devido que a experimentação envolve a leitura das

deformações plásticas na ponta da trinca se decidiu usar diferentes tipos de polímeros opticamente transparentes e com diferentes propriedades mecânicas.

4.6. Pré- Ensaio com Polímeros

Pré-ensaios de laboratório foram feitos inicialmente escolhendo como material de estudo o *polimetilmetacrilato* (PMMA). Com o objetivo de conhecer o comportamento do PMMA no processo de fadiga foram usinados corpos-de-prova segundo a norma ASTM E647, tipo *Compact Tension* C(T). A nomenclatura para estes corpos são CT-PP para espécimes feitos de PMMA e CT-PC para aqueles usados com policarbonato (PC).

4.6.1. Preparação do Corpo de Prova C(T)

Foram usinados 20 CPs tipo CT-PP de uma placa de *polimetilmetacrilato* com 10 mm de espessura, as dimensões de largura, altura e espessura são 40 mm, 40 mm e 10 mm respectivamente, com comprimento de entalhes entre 6.5 a 9 mm, a Figura 4.2 mostra as dimensões padronizadas da ASTM 647. Também foram usinados 28 CPs tipo CT-PC cortados de uma placa de 10 mm de espessura, com as mesmas dimensões dos corpos CT-PP.

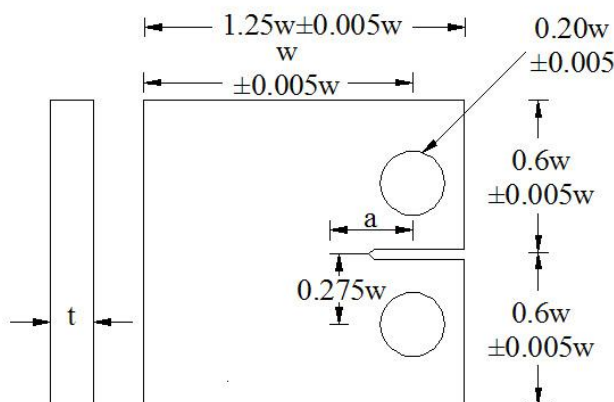


Figura 4.2- Corpo de Prova tipo *Compact Tension* utilizado nos Pre - ensaios de comportamento de material PMMA e PC

A expressão analítica para o cálculo do fator de intensidade de tensões, modo I, para este tipo de geometria é dado por:

$$K_I = \frac{P}{t\sqrt{w}} \frac{(2 + \frac{a}{w})}{(1 - \frac{a}{w})^{1.5}} \cdot \left[0.886 + 4.64 \frac{a}{w} - 13.32 \left(\frac{a}{w}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{w}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{w}\right)^4 \right] \quad (4.1)$$

4.6.2. Ensaio do Corpo de Prova C(T)

Carregamento cíclico (função seno) é aplicado a través da MTS 810 sobre corpos de prova CT-PP e CT-PC com frequências entre 1- 4Hz, carregamentos entre 100-2000 N, para uma taxa R=0.1. Foram ensaiados vários tipos de carregamento para diferentes fatores de intensidade calculados com o objetivo de iniciar e propagar a trinca ao longo do corpo. A Figura 4.3.a mostra o corpo de prova CT-PP montado enquanto a Figura 4.3.b. mostra um CT-CC com trinca passante se propagando.

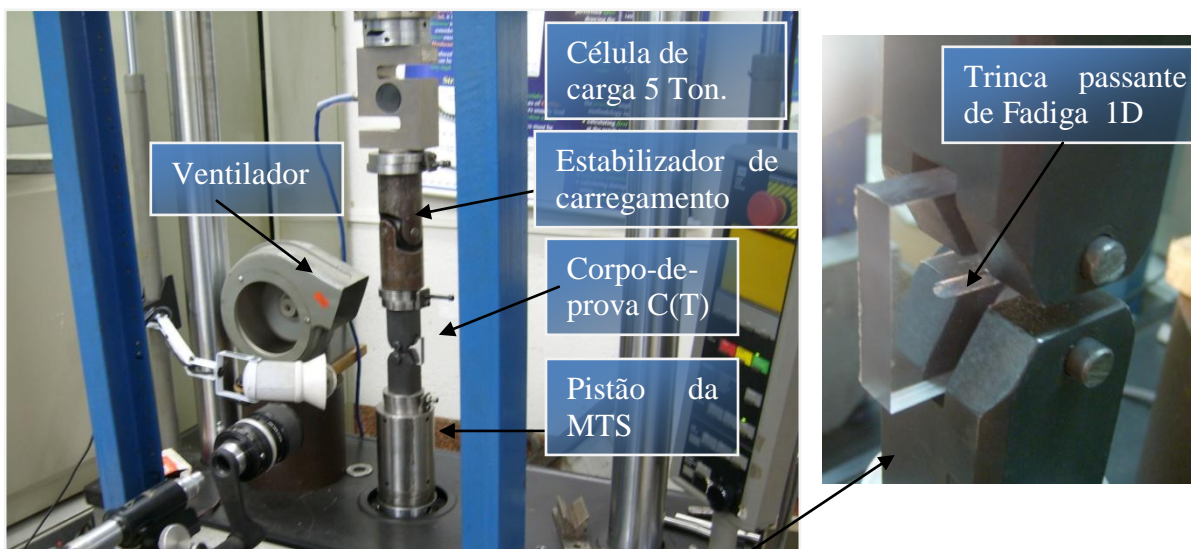


Figura 4.3 – a) Pré-ensaios de fadiga com CPs tipo *Compact Tension* em PMMA e policarbonato montados na MTS b) Corpo de prova CT-PC, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

Os ensaios a fadiga em PMMA apresentaram fratura frágil logo depois do início da trinca, e as várias tentativas de baixo carregamento (100 - 700 N) e baixas frequências (1-4Hz) servem para concluir que esse material não é apropriado para estudar a propagação bidimensional devido a sua fragilidade e baixa tenacidade.

4.7. Lixamento e Polimento dos Corpos de Prova

Cada corpo-de-prova foi lixado usando-se lixa d'água para metais com diferente granulometrias, são usadas lixas ásperas e finas com grãos 220, 320, 400, 600 e finalmente fina 1200. O processo de lixamento é feito sob refrigeração com água. Terminado o lixado os corpos de prova são polidos usando um abrasivo composto por oxido de alumínio e pasta de diamante de 0.3 micrones. Os corpos de prova CT-PP e CT-PC utilizados nos pré-ensaios foram lixados e polidos numa máquina giratória usada para metalografia de metais. Corpos de prova tipo ESE-PC, usados no levantamento de propriedades a fadiga do policarbonato e C2D-PC, usados na propagação bidimensional, foram lixados manualmente e polidos usando uma roda circular de pano para polimento, feita de algodão, e fixada numa furadeira de bancada, Figura 4.4.b., como material de polimento foi usado massa de polimento.



a)



b)

Figura 4.4 - a) Lixado com diferente granulometria b) Polimento com pano em furadeira. (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

4.8. Propriedades Mecânicas do Policarbonato

O uso dos polímeros esta cada dia se - incrementando em aplicações da engenharia, ele e um importante material para o desenho de diversas pecas estruturais. O

policarbonato e um tipo de polímero considerado como um poliéster linear do ácido carbônico. Ele é fabricado através de dois processos de fabricação, o intercâmbio estérico e o processo de fosgenização. As excelentes propriedades mecânicas tornam possível a moldagem de artigos estruturais de alta precisão que combinam as seguintes propriedades adicionais: transparência, dureza, rigidez, boa elasticidade, excelentes propriedades de isolamento elétrico, baixa absorção de água, auto-extinção de chama e boa resistência química em soluções aquosas. A chapa de policarbonato compacto constitui um material de envidraçamento com grande resistência ao impacto e uma boa transmissão luminosa. Mecanicamente ela pode ser curvada a frio. Tem a vantagem de ser muito mais leve que o vidro e proporcionar além disso um bom isolamento térmico. A Tabela 4.1 mostra algumas propriedades mecânicas do policarbonato.

Propriedades Mecânicas	
Modulo Young	2-2,4 GPa
Resistência à tração na ruptura	68 MPa
Resistência à tração no escoamento	63 Mpa
Resistência a compressão	> 80 MPa
Coefficiente de Poisson	0.37
Dureza (Rockwell)	M70
Ensaio Charpy	20-35 KJ/m ²

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do policarbonato
(DUROLON Catalogo do Fabricante, Policarbonatos do Brasil S/A, 1985)

4.8.1. Propriedades a Fadiga do Policarbonato

Shimamoto & Umezaki (1995) estudaram que tanto a forma da onda quanto a frequência em intervalos de 0.1-20Hz tem pouco efeito na taxa de propagação de uma trinca, outros autores, porém dizem ter cuidado com frequências acima de 4Hz. Segundo Manson (1974) a tensão média, a história térmica e o peso molecular são significativas na

propagação. Na Figura 4.5 se mostram diferentes ensaios de propagação em policarbonato $a(mm)$ versus N (ciclos), para diferentes razões R .

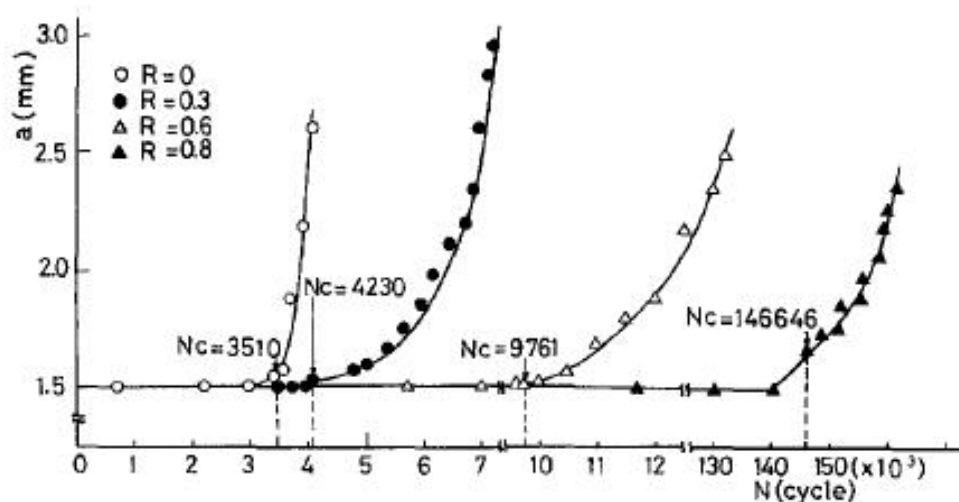


Figura 4.5 – Relação entre o comprimento a e numero de ciclos N para policarbonato tipo Lexan- 9030.

Também Manson & Hertzberg (1973) notaram que o policarbonato mostra uma certa sensibilidade sob ação de alguns tipos de gases mudando o comportamento da taxa de propagação, assim também quando a ponta da trinca contém água. Variações na taxa de propagação estão presentes quando se tem uma historia térmica variada, a Figura 4.6 mostra como muda o comportamento do policarbonato para diferentes temperaturas de recozimento.

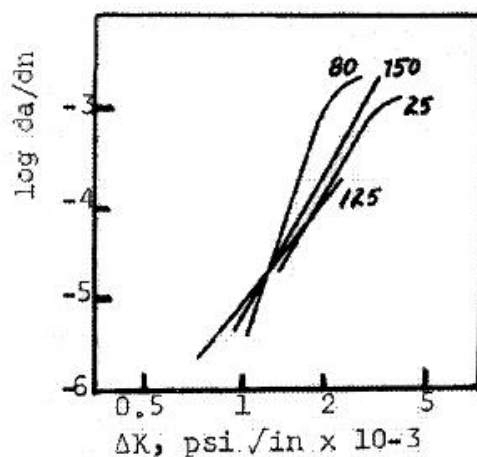


Figura 4.6 – Crescimento de trinca por fadiga para diferentes temperaturas de recozimento (Manson & Hertzberg,1973)

A Figura 4.7 mostra uma diversidade de materiais estruturais usados na engenharia onde se podem apreciar as diferentes taxas de propagação de trincas por fadiga. A curva de propagação do policarbonato esta indicada com a letra H. No entanto, nos levantaremos as propriedades a fadiga do policarbonato a ser usado nos experimentos da transição de trincas 2D-1D.

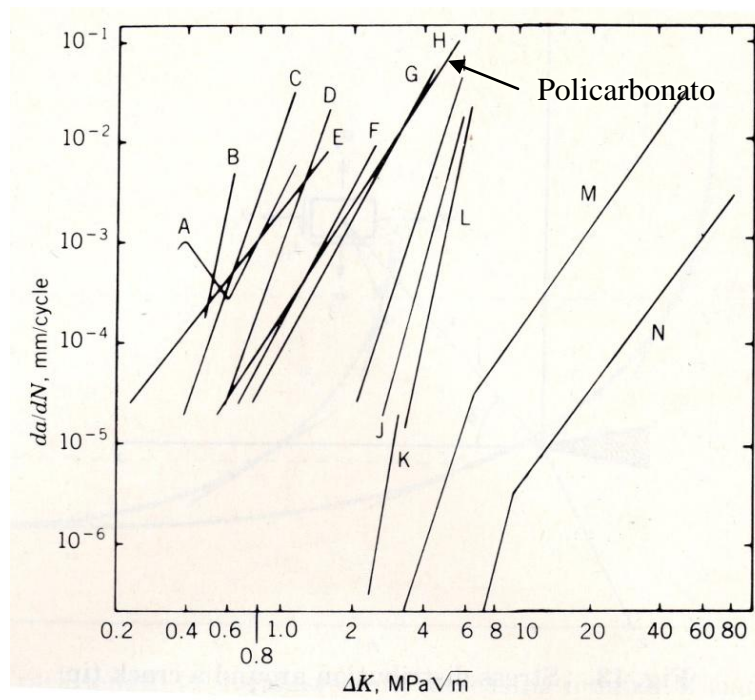


Figura 4.7- Taxas de propagação de trincas por fadiga vs ΔK para vários plásticos e metais. A, LDPE; B, epóxi; C, *poly(methyl methacrylate)*(PMMA); D, *polysulfone*; E, *polystyrene*; F, PVC; G, *poly(phenylene oxide)*(PPO); H, *polycarbonate*; I, *nylon-6,6*; J, *HI-nylon-6,6*; K, *poly(vinylidene fluoride)*; L, *acetal resins*; M, *2219-T851 aluminium alloy*; N, *300 M steel alloy*. (Polymers, 1987)

4.9. Ensaio

Em vista do fato de que precisamos determinar as propriedades de crescimento das trincas de fadiga do PC, testes de linha de base sob tração concentrada modelo C(T) foram realizados para obter a taxa de crescimento de fadiga da/dN versus ΔK . Devemos cuidar de não reduzir a sensibilidade do entalhe com uma sobrecarga porque poderíamos cegar a ponta da trinca.

4.9.1. Preparação do Corpo de Prova ESE(T)

Depois dos ESE(T) ter sido usinados com medidas de espessura, largura e altura de 10 x 70x 240 mm respectivamente foram usinados entalhes com comprimentos entre 24-26mm. Os corpos de prova foram lavados cuidadosamente com água devido ao pó gerado pelo corte do entalhe. A usinagem do entalhe e mostrado segundo a Figura 4.8, feita usando uma serra de cinta. A Figura 4.9 mostra os valores padrão do ESE(T) segundo a norma ASTM E647.



Figura 4.8 - Usinado dos entalhes em corpos de prova tipo ESE(T)

(Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

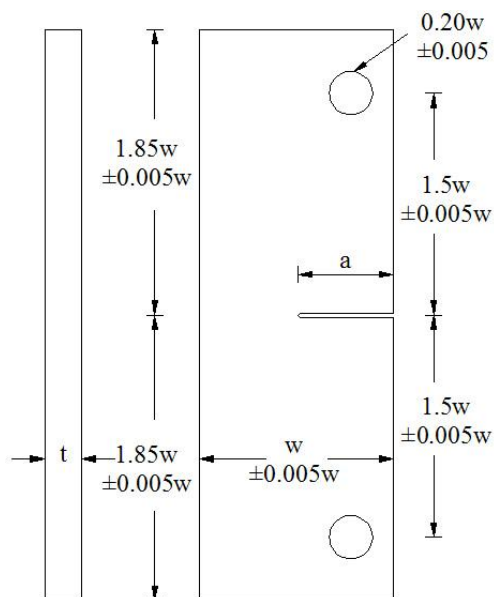


Figura 4.9- ESE(T) - *Eccentrically-Loaded Single Edge Crack Specimen* utilizado no ensaio da/dN para encontrar as propriedades do material a fadiga.

A expressão analítica para o cálculo do fator de intensidade de tensões, modo I, para este tipo de geometria é dado por:

$$K_I = \frac{P}{t\sqrt{w}} \cdot F \quad (4.2)$$

$$F = \alpha^{1/2} \cdot [1.4 + \alpha][1 - \alpha]^{-3/2} G \quad (4.3)$$

$$G = 3.97 - 10.88\alpha + 26.25\alpha^2 - 38.9\alpha^3 + 30.15\alpha^4 - 9.27\alpha^5 \quad (4.4)$$

4.9.2. Ensaio da/dN

Carregamento cíclico (função seno) foi aplicado por uma máquina eletro-hidráulica MTS 810 sobre corpos de prova tipo ESE-PC, segundo a norma ASTM E647 com frequência de 4Hz. Os testes de fadiga foram conduzidos no mesmo espaço para uma razão $R=0.1$. Com o objetivo de encontrar o comportamento da curva da/dN vs. ΔK em suas três fases são usadas as técnicas *K-Decreasing* onde se diminui percentualmente o carregamento até conseguir parar a trinca, com o objetivo de encontrar o valor de limiar ΔK_{th} de propagação, lembrar que o limiar de propagação ΔK_{th} é definido como a maior gama do fator de intensidade de tensões que é incapaz de propagar a trinca, enquanto ΔK for menor que ΔK_{th} o valor de da/dN é igual a zero. A continuação da parada da trinca é usada a técnica *K-Increasing*, onde o incremento de ΔK cresce com o aumento contínuo do comprimento a , a trinca vai se propagando para um carregamento constante até alcançar a fratura da peça. As leituras foram feitas cada 0.002 mm para o ESE(T)-01 e cada 0.05mm nos ESE(T)-02,03,04 registrando o número de ciclos para cada comprimento. A Figura 4.10 mostra um corpo de prova montado para levantamento de curva de fadiga.



Figura 4.10 – Ensaio de *K-Decreasing* e *K-Increasing* para conhecer as propriedades a fadiga do PC, Corpo de prova ESE(T), (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

4.10. Problemas encontrados previa seleção do corpo de prova definitivo para ensaio de propagação bidimensional

A Figura 4.11 mostra um intento de ensaio com corpo de prova experimental CPE-01, PMMA, com dimensões 10x200x380 mm e entalhe semi – elíptico no meio do corpo de prova com dimensões $c=3\text{mm}$ e $a=2\text{mm}$ feito com ferramenta de corte circular com raio de corte de 4mm e espessura 1mm.

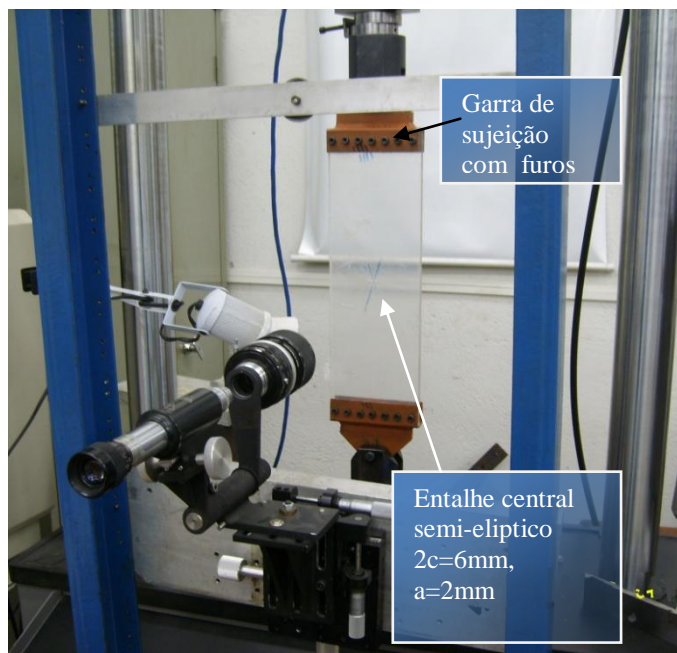


Figura 4.11- Montagem de um corpo de prova com dimensões 10x200x380mm e entalhe semi - elíptico no meio na placa. (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

Foram vários e diferentes os problemas encontrados previa a seleção da geometria do C2D-PC definitivo, por exemplo, a Figura 4.12.a. mostra como os furos passantes alinhados nos extremos do corpo de prova CPE-02, 10x200x380 mm, entalhe semi – elíptico 3x2 mm, não consegue resistir o carregamento cíclico trativo depois de alguns ciclos de carga, sendo que o carregamento foi devidamente calculado segundo o tipo de material, geometria e tipo de entalhe. A Figura 4.12.b. mostra uma trinca gerada por fadiga no CPE-04, 10x200x380 mm, policarbonato, depois de 12000 ciclos. A Figura 4.12.c. mostra a falha do corpo CPE-05, 10x200x380 mm, policarbonato, em um extremo. Também a Figura 4.12.d mostra o CPE-07, 10x200x380 mm , policarbonato, entalhe quarto – elíptico simétrico 2x2 mm, no qual foram coladas placas de alumínio (3x70x200 mm) como reforço estrutural, devido ao policarbonato ser muito elástico o reforço falhou por cisalhamento não conseguindo seu objetivo.

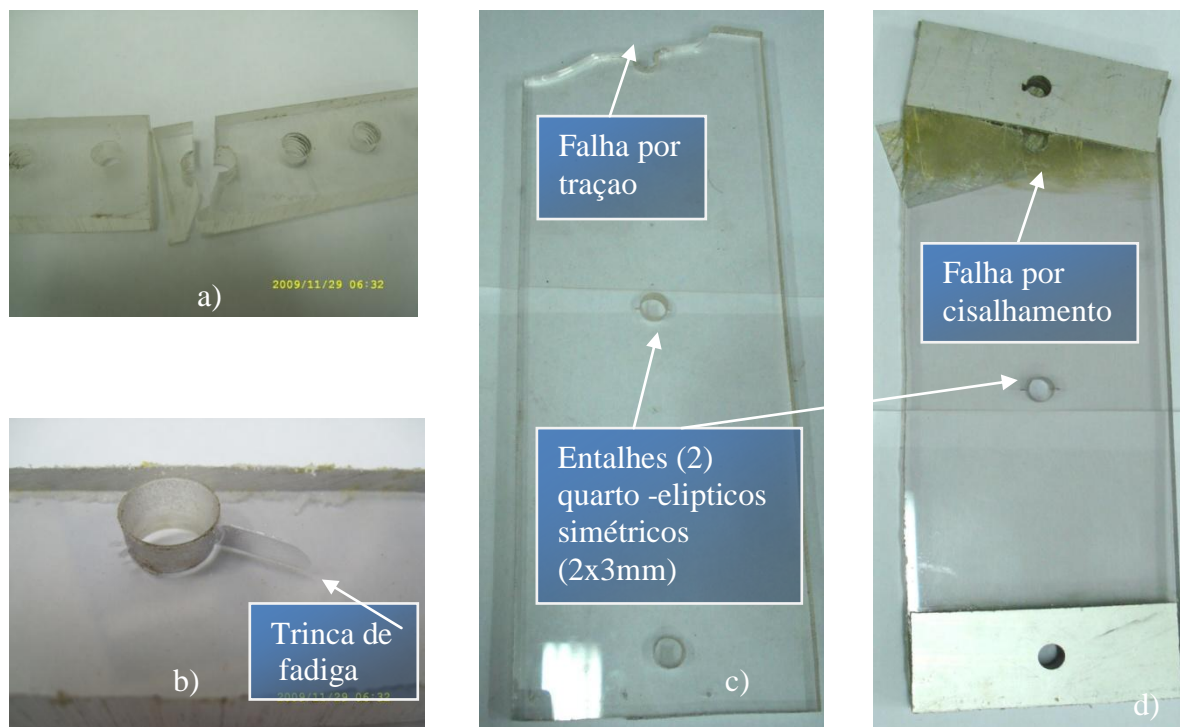


Figura 4.12 – Diferentes problemas encontrados na seleção da geometria do C2D-PC definitivo. a) Extremo de um CPE-02 submetido a carregamento cíclico b) Trinca de fadiga gerada no furo CPE-04 c) CPE-05 com trinca de canto simétrica central d) CPE-07 com reforço de placas de alumínio colado com adesivo epóxico. (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

4.11. Preparação do Corpo de Prova C2D

Depois dos C2D ter sido usinados com medidas de espessura, largura e altura de 10 x 47x 365 mm, Figura 4.13, respectivamente foram aplicados entalhes lineares com comprimentos entre 1 e 2 mm no meio do corpo de prova, o defeito foi feito com um lamina de barbear Gillette já que o raio de corte de ele e muito pequeno aproximadamente 0.2mm. O defeito foi feito com muito cuidado com um carregamento trativo de 100N com a finalidade de eliminar tensões na ponta de trinca e garantir uma iniciação da propagação mais rápida.

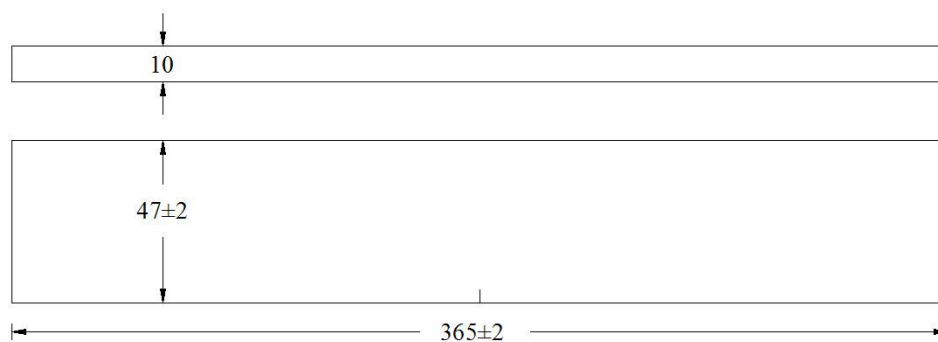


Figura 4.13 – Dimensões do C2D-PC 10x47x365 mm

(Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

A Figura 4.14 mostra como foi feito o defeito linear nos C2D-PC, repare-se que mesmo o defeito sendo linear a forma que a trinca conseguira quando ela nascer será quarto - elíptica.



Figura 4.14 – Introdução do defeito de raio muito pequeno no C2D-PC com uso de um Gillette de barbear, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

4.12. Ensaio Propagação de Trincas Bidimensional

Para comprimentos $a/t \leq 1$ foram calculados fatores de intensidade de tensão predominantes $\Delta K(a)$ e $\Delta K(c)$ ao longo dos semi-eixos a e c respectivamente. A propagação é controlada com os valores obtidos das expressões analíticas segundo Newman-Raju. Os dados foram medidos usando como referencia a direção da propagação de a ajudados pelo microscópio XY. Diferentes carregamentos foram se mudando e diminuindo percentualmente com a finalidade de se manter e controlar os

$\Delta K(c)$ e $\Delta K(a)$ predominantes para conseguir a propagação bidimensional. Foram obtidos os número de ciclos para aproximadamente cada 0.05 mm de avance no semi – eixo a até a trinca atingir $a/t=1$ e com uma frequência de 4 Hz. Porém, para valores $a/t>1$ onde o processo de transição bidimensional para unidimensional tem efeito se manteve o ultimo carregamento alcançado em $a=t$ para que o processo de transição permaneça sem alteração de carregamento como foi feito para $a/t\leq 1$. Se registraram dados para os comprimentos c e c' , se trabalharam com frequências 0.01Hz . A Figura 4.15 mostra a disposição das duas câmaras e o microscópio X-Y. Os comprimentos c foram fotografados com uma câmera Nikon de 8 mm, 10 megapixels de resolução, os dados dos comprimentos a ao longo da propagação foram simplesmente tabelados e medidos, os comprimentos c' foram fotografados com uma câmera Canon 7 megapixels.

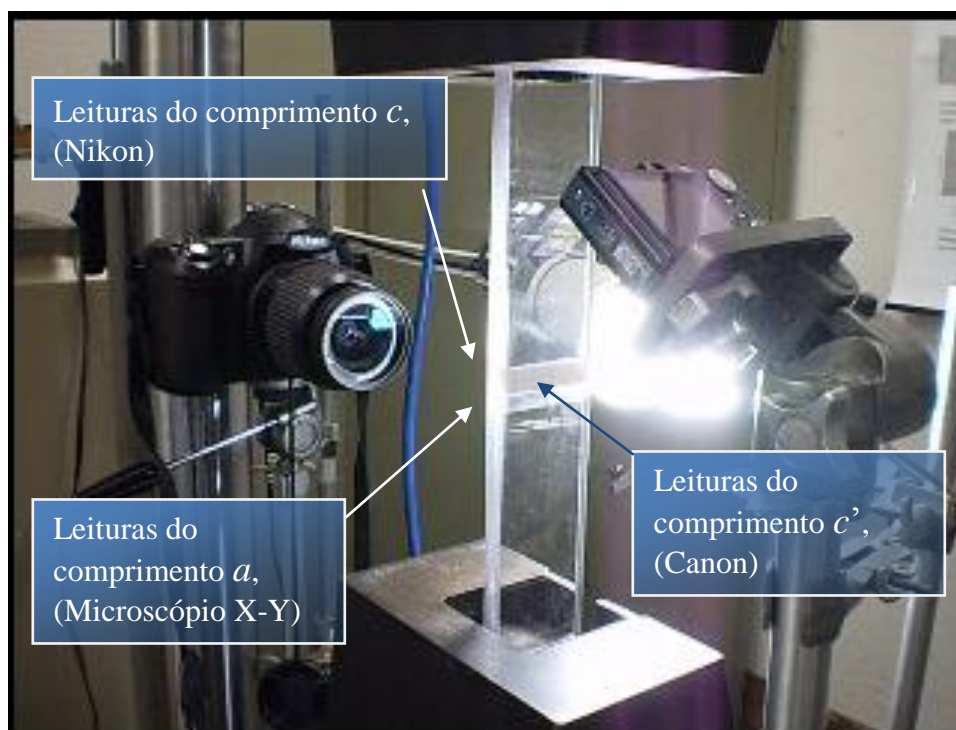


Figura 4.15 – Arranjo de aquisição de dados para os ensaios de propagação bidimensional em trincas quarto – elípticas, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

A Figura 4.16 mostra como os resultados são obtidos por cada uma das câmaras e do microscópio X-Y. A frequência foi sendo diminuída segundo a necessidade do ensaio já que devemos controlar a propagação 2D e sobretudo a transição 2D-1D devido a que

na transição a trinca bidimensional começa a perder estabilidade e quer se propagar rapidamente cortando o corpo, sendo difícil controlar a propagação.

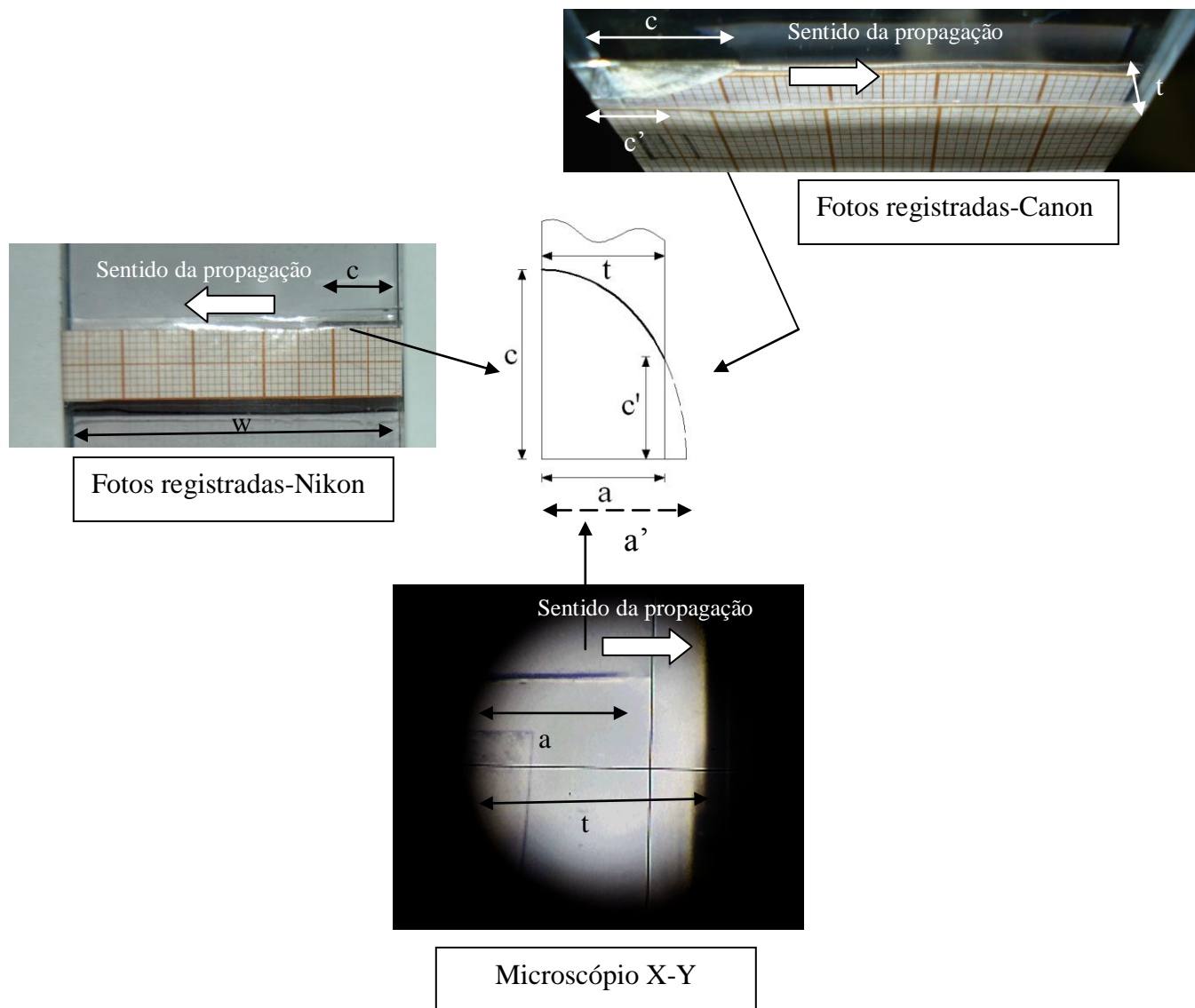


Figura 4.16 - Arranjo dos dados obtidos para cada 0.5 mm de comprimento a .
Usando duas câmaras de alta resolução e um microscópio X-Y.
(Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

4.13. Preparação do Corpo de Prova para Ensaio de Tração

Com o intuito de conhecer os limites da tensão de escoamento e tensão última de tração e módulo de elasticidade foram usinados três corpos de prova CPTT com espessura, largura e altura de 10 x 50 x 360 e chanfros de 8 mm de raio a 90mm dos extremos.

4.13.1. Ensaio de Tração

O ensaio foi controlado por deslocamentos de pistão ate um máximo de 100 mm, devido a que ensaios prévios mostraram bastante ductilidade do material.

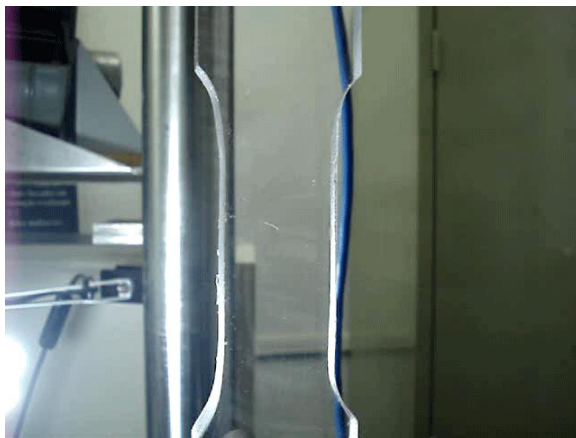


Figura 4.17 - Ensaio de tração uniaxial, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

5. Análise de Resultados

5.1. Pré – Ensaio

A modelagem de propagação de trincas 2D supõe que a geometria elipsoidal permanece invariável e quantifica a variação da taxa a/c entre os semi-eixos da trinca (Castro & Meggiolaro, 2009). A Figura 5.1. mostra o nascimento de uma trinca no corpo de prova CP-PC-010 de policarbonato depois de ela ter passado pela etapa de nucleação, pode-se apreciar que a forma da trinca é muito parecida a uma semi-elipse, com semi – eixos $2c=2.9$ mm e $a=1.2$ mm.

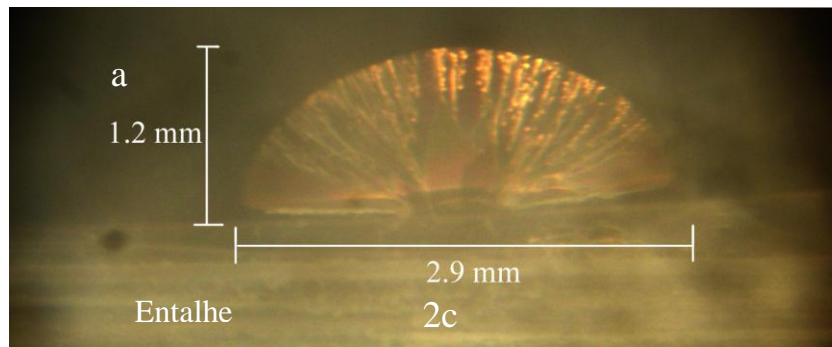


Figura 5.1- Nascimento de uma trinca semi - elíptica bidimensional localizada no meio do entalhe do corpo de prova CP-PC-010, $(w,h,t) = (40\text{mm}, 40\text{mm}, 10\text{mm})$, policarbonato, $P = 400$ N, $N = 8902$ ciclos (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

Depois de alguns ciclos a trinca bidimensional cresce tanto no semi -eixo c como no semi - eixo a , é interessante apreciar que não existe uma distorção da forma superficial. Note-se na Figura 5.2 que a frente da trinca vai se propagando simetricamente em ambos os eixos. As deformações iniciais que ela sofreu no estágio anterior permanecem visíveis deixando um caminho onde se registra pouco a pouco a história daquela trinca.

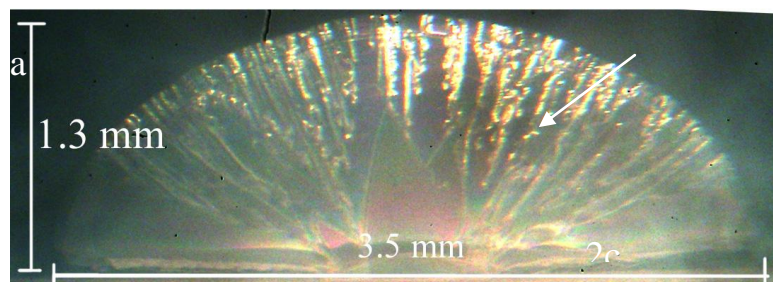


Figura 5.2 – Propagação da trinca em forma bidimensional localizada no meio do entalhe do corpo de prova CP-PC-010, $(w,h,t) = (40\text{mm}, 40\text{mm}, 10\text{mm})$, policarbonato, $P = 400$ N, $N = 11529$ ciclos (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

Perceba - se em Figura 5.3 que a taxa $a/2c$ muda neste estágio, a parte esquerda do semi - eixo c tenta crescer um pouco mais do que a parte direita devido a que uma trinca, também bidimensional, de muito menor superfície do que a maior esta crescendo paulatina e lentamente na parte posterior da trinca. Esta trinca é evidente em Figura 5.3. As trincas tendem a se-coalescer as umas com as outras quando estas se encontram em planos próximos, (depende muito do ângulo coplanar entre elas). A trinca dominante a qual esta sendo controlada por um campo com fatores de intensidade maior ao redor da frente da sua trinca do que a menor trinca domina ao campo de fatores de intensidade de tensões da trinca de menor tamanho.

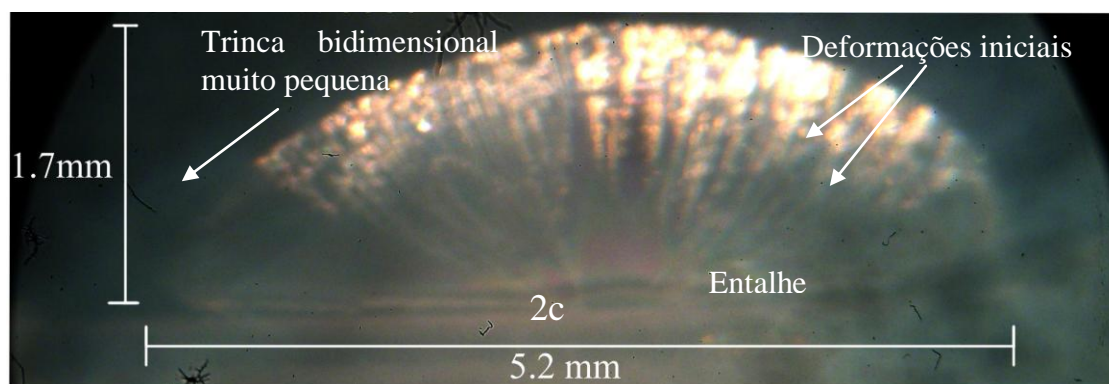


Figura 5.3- Propagação semi - elíptica de uma trinca bidimensional localizada no meio do entalhe do corpo de prova CP-PC-010, $(w,h,t) = (40\text{mm}, 40\text{mm}, 10\text{mm})$, policarbonato, $P = 400$ N, $N = 18084$ ciclos (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

A Figura 5.4 mostra a trinca pequena paralela que esta sendo influenciada pela trinca de maior tamanho. A taxa de deformações naquela região e maior, do que si era só

uma trinca é as deformações das duas trincas vão se encontrar em alguns ciclos mais para diante e as trincas voam fisicamente se unir e se conformar em uma trinca só.

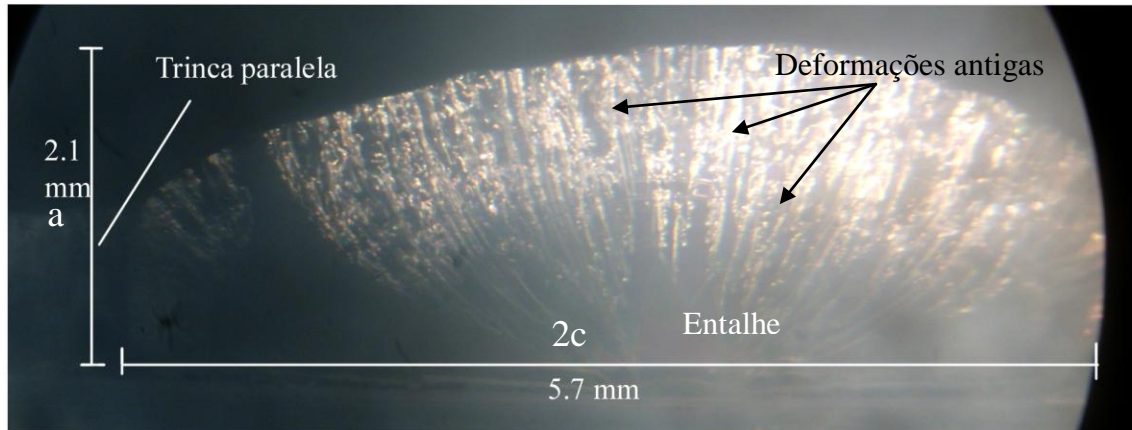


Figura 5.4- Propagação semi - elíptica de duas trincas bidimensionais uma maior e outra menor localizadas no entalhe do corpo de prova CP-PC-010, (w,h,t) = (40mm, 40mm, 10mm), policarbonato, $P = 400$ N, $N = 23772$ ciclos, $f = 4$ Hz, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

A figura 5.5 mostra a sobreposição dos anteriores estágios de propagação. Note-se o incremento do número de ciclos.

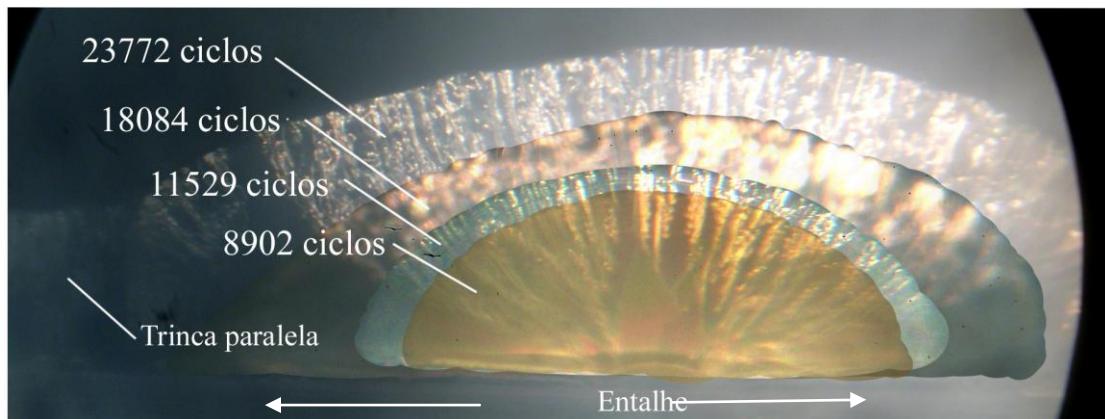


Figura 5.5- Sobreposição fotográfica da propagação da trinca bidimensional antes de atingir as paredes do corpo de prova. (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

A Tabela 5.1 e Figura 5.6 mostram o comportamento da propagação da trinca bidimensional no CP-PC-010. Enquanto a Figura 5.7 mostra a taxa a/c .

N [ciclos]	a [mm]	c [mm]	a/c
8902	1.2	1.45	0.83
11529	1.3	1.75	0.74
18084	1.7	2.6	0.65
23772	2.1	2.85	0.74

Tabela 5.1- Propagação da trinca bidimensional anteriormente mostrada

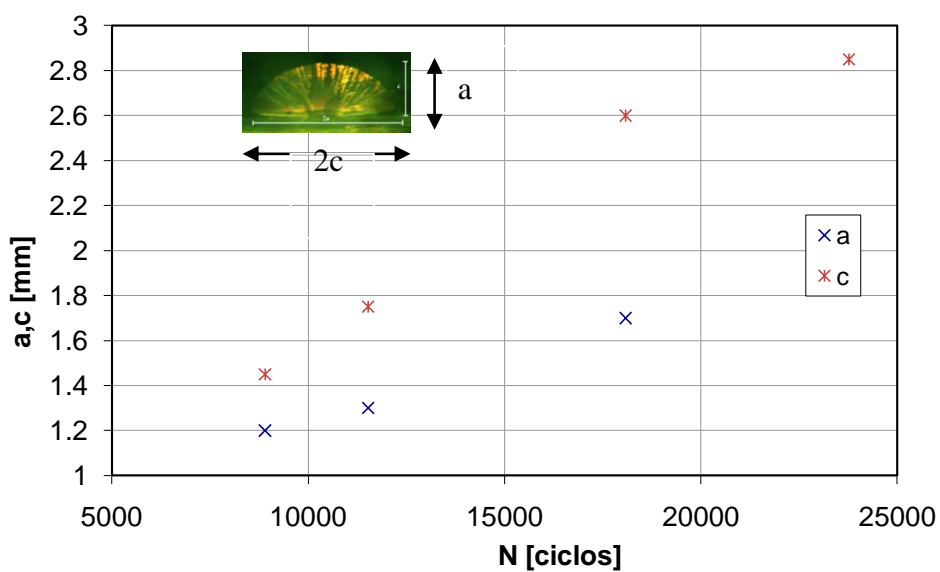


Figura 5.6 - Comparação dimensional da propagação da trinca bidimensional para carregamento constante $P=400N$, CP-PC-010 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

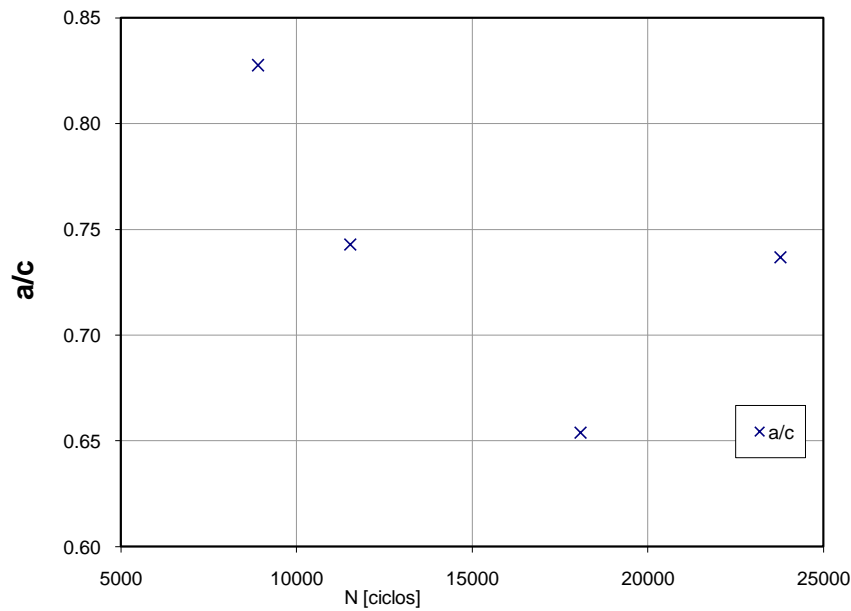


Figura 5.7 - Comparação dimensional da propagação da trinca bidimensional para carregamento constante $P=400N$, CP-PC-010

Nos pré – ensaios também observou-se as múltiplas trincas, Figura 5.8, que nascem no raio do entalhe. Isso é devido a que a ferramenta de corte que se usou deixa muitas imperfeições ou defeitos superficiais na superfície do raio o qual tem uma elevada concentração de tensões e serve como sites de iniciação de trincas por fadiga, em esta região que já tem tensões elevadas pelo entalhe.

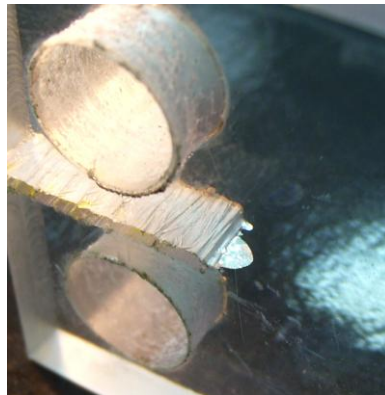
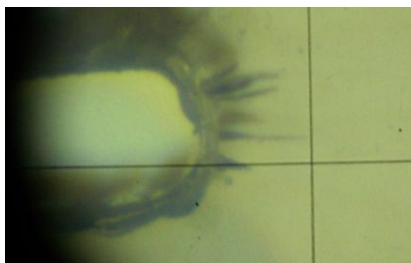


Figura 5.8 – Iniciação de múltiplas trincas bidimensionais por fadiga em polycarbonato (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

O PMMA comporta-se depois iniciada uma trinca de uma maneira muito frágil. No entanto alguns corpos de prova, CP-PP-001, CP-PP-007, CP-PPB-001, conseguiram propagar uma trinca por alguns milímetros. As trincas uma vez iniciadas no entalhe tem formatos bidimensionais com aparência de quarto – elípticas ou semi - elípticas com diferentes valores de $K_I(a)$ e $K_I(c)$, Figura 5.10.b. Elas propagam por alguns milímetros aumentando o fator de intensidade de tensão tanto na direção no semi eixo c , aumentando o $K_I(c)$, quanto no semi eixo a aumentando o $K_I(a)$ para cada ciclo de carga. Porém quando a frente da trinca atinge a face oposta do corpo de prova ele já não incrementa $K_I(a)$ porque não tem restrições naquele sentido, então $K_I(c')$ aparece e começa a tomar importância com um valor maior do que o ultimo $K_I(a)$ sendo neste estagio o fator de intensidade de tensão $K_I(c') > K_I(a)$, ao mesmo tempo a taxa de propagação dc'/dN começa a aumentar sendo que agora $K_I(c') \gg K_I(c)$, o $K_I(c')$ tenta procurar se propagar mais rápido aumentando a taxa dc'/dN a traves do aumento do $K_I(c')$, mais aquela taxa da taxa de propagação dc'/dN que procura o equilíbrio simplesmente alcança a tensão de fratura o material e nenhuma deformação plástica e evidenciada, fraturando se o corpo fragilmente.

Para diminuir o numero de ciclos para a geração de trincas foi usado uma técnica mencionada por Park & Grandt (2006) nos corpos de prova tipo CP-PPB, CP-PPB-001 ate CP-PPB-009, a qual consiste em dar uma pré-carga trativa ou compressiva dependendo do ensaio ao corpo de prova, e cortar com um objeto muito afiado o raio do entalhe eliminando inicialmente as tensões trativas ou compressivas, dita técnica assegura que o entalhe permaneça sem tensões iniciais para a trinca se iniciar mais rapidamente. Podemos apreciar na Tabela 5.2 que há uma diminuição no numero de ciclos que os CPs experimentam quando atingem a fratura com a técnica previa de corte afiado. Já que não podíamos gerar uma propagação estável, devido a baixa tenacidade do PMMA, sendo assim decidimos trocar de material passando a usar o policarbonato.

CP	P [N]	Δa [mm]	N [ciclos]
CP-PP-001	8000 - 9000	1.8	3200
CP-PP-002	2000-3000	0	79346
CP-PP-003	1500-1700	0	333250
CP-PP-004	1700	0	1070596
CP-PP-005	1800	0	90444
CP-PP-006	1800	8.66	80946
CP-PP-007	1800	2.98	633683
CP-PPB-001	350-400	3.7	201260
CP-PPB-007	300	0	9638
CP-PPB-008	300-180	0	12973
CP-PPB-009	300-190	0	37964

Tabela 5.2- Resumo de ensaios com CP-PP

A Figura 5.9 mostra a relação carregamento P[N] versus numero de ciclos N dos corpos de prova ensaiados com PMMA. Pode se apreciar o grande número de ciclos necessários para a propagação acontecer, sendo que uma vez iniciada a trinca os corpos de prova fraturam fragilmente.

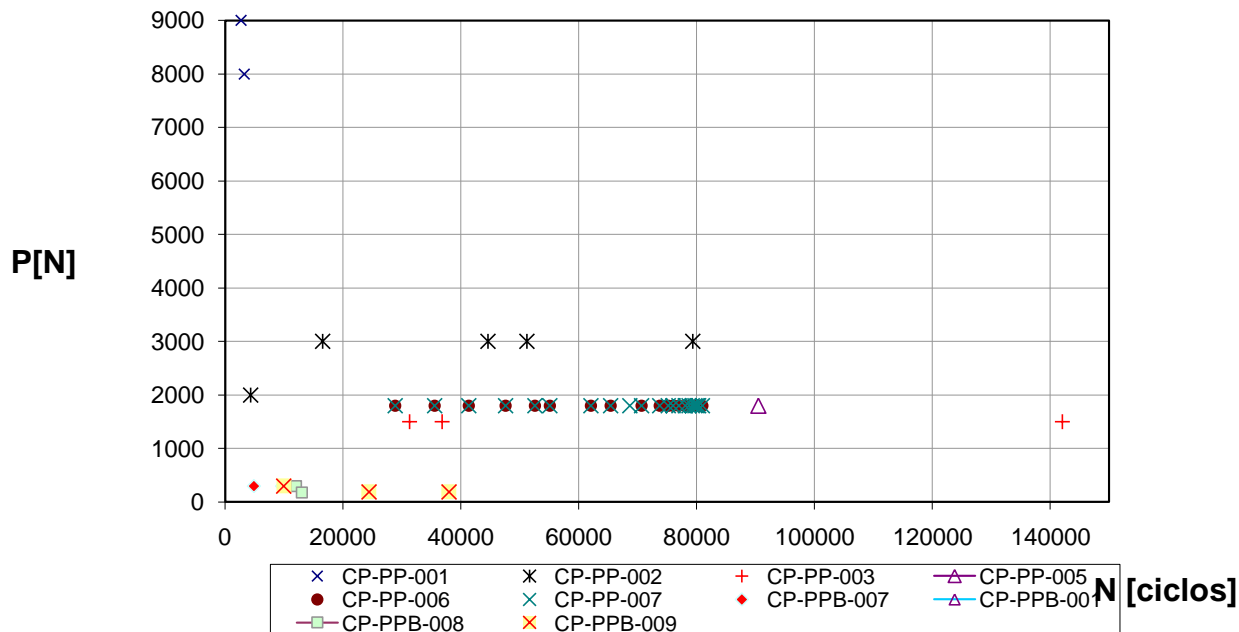


Figura 5.9 – Ensaios de fadiga em corpos de prova tipo CT-PP, PMMA (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

A Figura 5.10 mostra o nascimento onde da trinca, depois de um período de nucleação, e posterior propagação bidimensional, repare-se a simetria das estrias semi - elípticas e como elas van se desenvolvendo em relação à origem, ensaio feito no CP-PC-023.

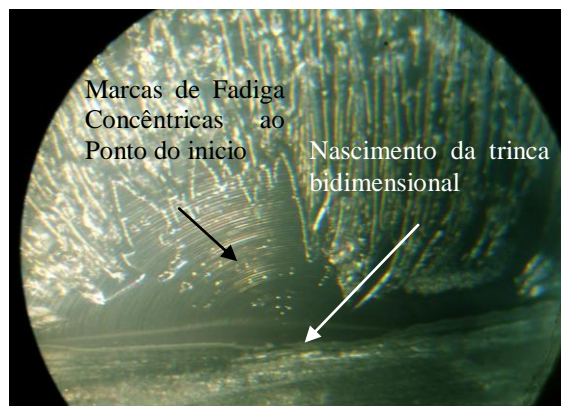


Figura 5.10 – Nascimento de trinca bidimensional, CP-PC-023. (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

Na Figura 5.11.a. se mostra um CP que apresenta fratura frágil onde o K_I atinge o K_{Ic} depois de alguns ciclos sem dar oportunidade à trinca se gerar, observe se também que na superfície depois da parte da fratura frágil se forma uma área com deformação plástica. A Figura 5.11.b mostra um comportamento parecido ao anterior onde a trinca nasce e depois propaga bidimensionalmente (depois de um período de nucleação), quando é alcançado o valor crítico $a=t$ a trinca começa a entrar em transição 2D-1D no entanto o fator de intensidade de tensões naquela região é alto e o corpo fratura fragilmente.

A Figura 5.11.c. mostra um policarbonato onde se percebe que a propagação da trinca depois de atingir um determinado comprimento inicial, passa a fraturar inicialmente fragilmente e depois em uma maneira dútil.

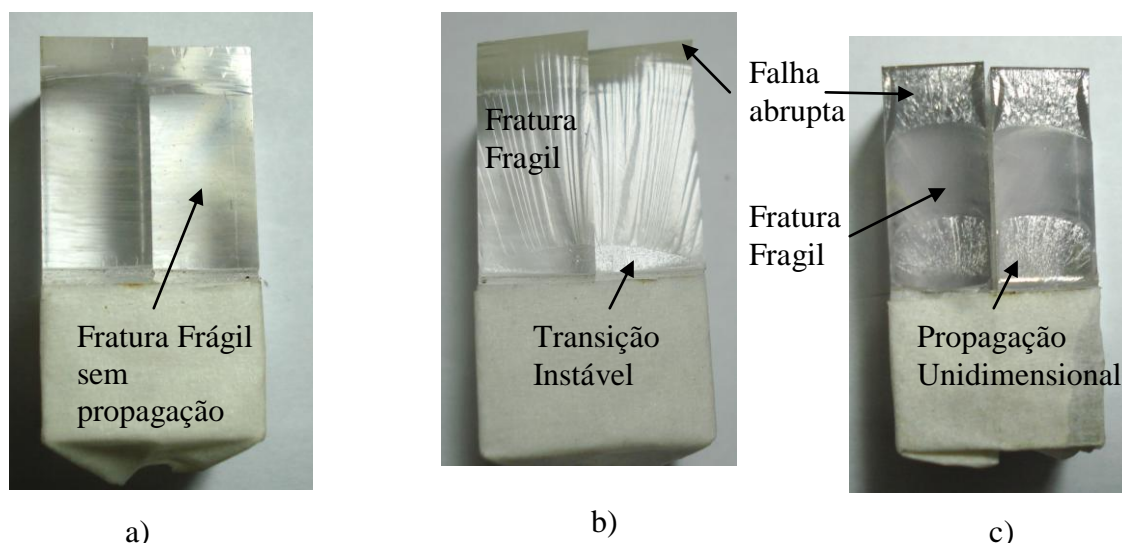


Figura 5.11- Propagação de trincas, C(T) (w,h,t) = (40mm, 40mm, 10mm a) CP-PP-003 b) CP-PPB-007 c) CP-PC-014 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010) .

A Figura 5.12 mostra o comportamento a versus N do CP-PC-023 onde se percebe um comportamento da propagação aceitável como para escolher a este material para fazer ensaios de propagação. A Figura 5.13 mostra a relação carregamento numero de ciclos dos corpos de prova ensaiados com Policarbonato.

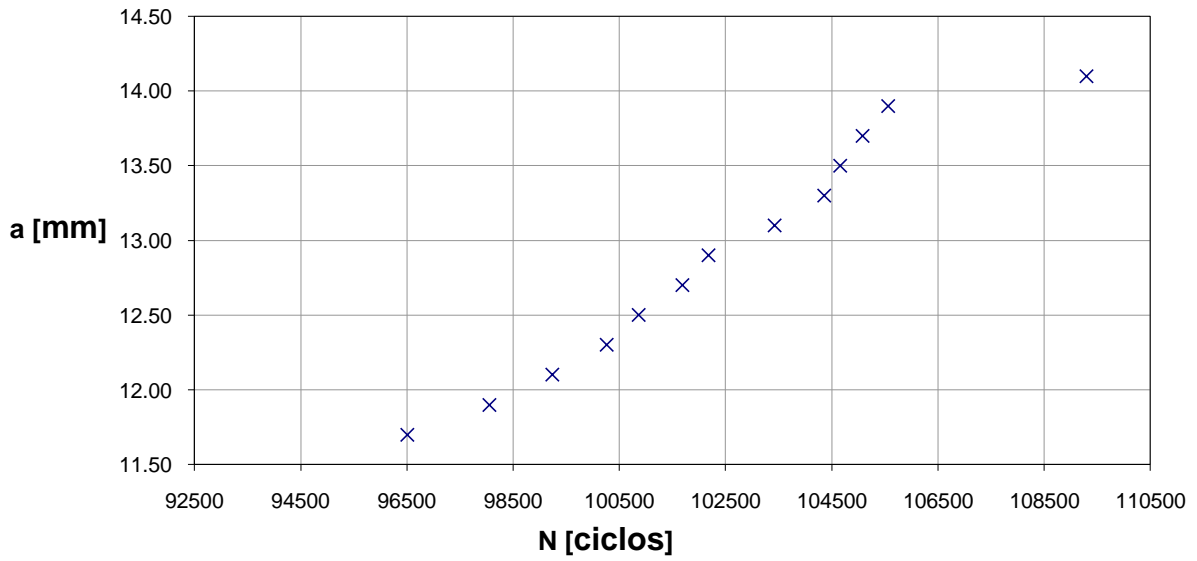


Figura 5.12- Propagação de trinca de fadiga no policarbonato, pré-ensaio CP-PC-023, comparação a vs N . (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

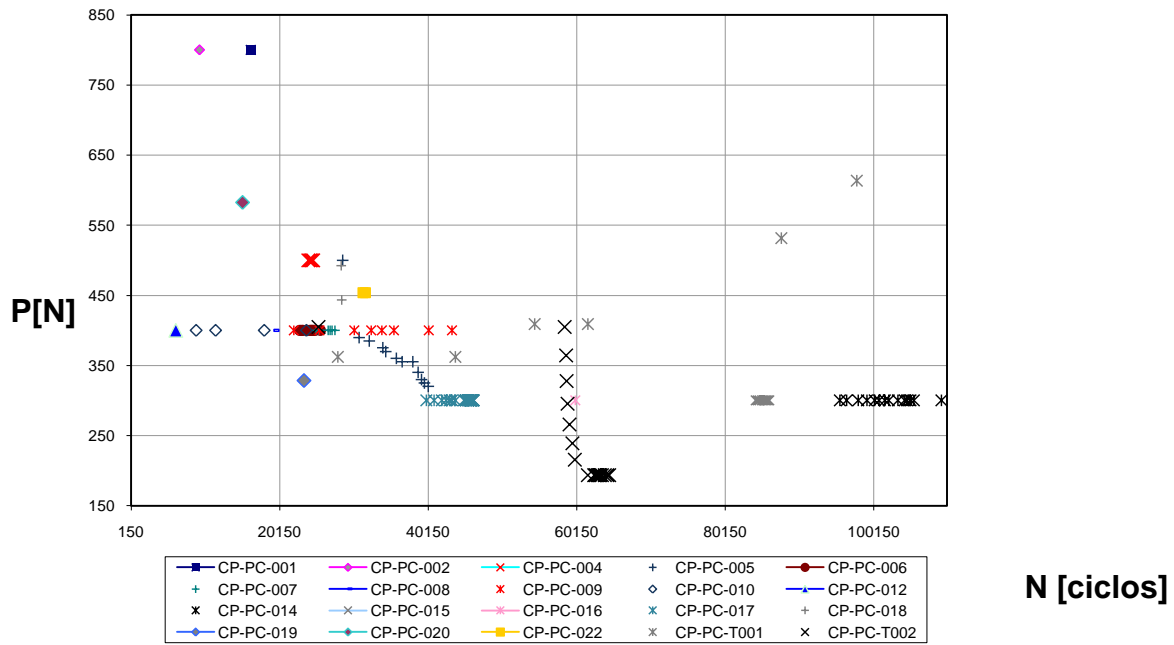


Figura 5.13– Ensaio de fadiga em corpos de prova tipo CT-PC, Policarbonato

A comparação do comportamento a vs. N de vários CT-PC é mostrada na Figura 5.14. Observe-se que também alguns pré-ensaios com policarbonato falharam em poucos ciclos. Obtiveram-se bons resultados de propagação de trinca bidimensional e unidimensional com este tipo de material, devido a isso que os subseqüentes ensaios foram feitos com policarbonato, além, claro das boas propriedades mecânicas já descritas.

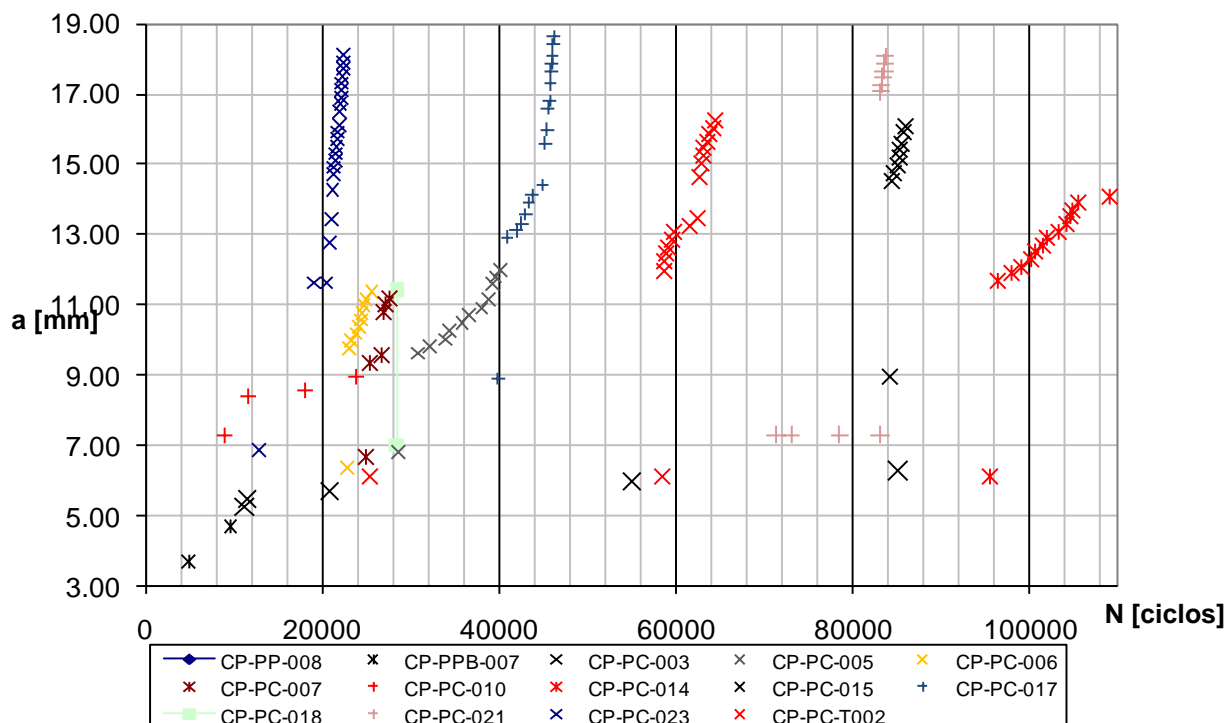


Figura 5.14 – Comportamento a vs N , Pré-Ensaio com Policarbonato

(Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

5.2. Ensaio da/dN

As taxas de crescimento da trinca por fadiga foram calculadas da relação dos comprimentos das trincas versus os dados de número de ciclos, para obter a relação da/dN - ΔK do policarbonato. Uma das características observadas nestes ensaios foram o coalescimento produzido por múltiplas trincas se iniciando na raiz do entalhe. Nos consideramos que os dados de crescimento da trinca podia ser considerada quando ela estabilizava sua geometria depois de se – unificando as varias trincas menores e produzindo uma frente única. A Figura 2.19, no Capítulo 2, descreve o acontecido com o processo de coalescimento das trincas observado nestes tipos de corpo de prova ESE(T).

Outro fenômeno que foi registrado na experimentação do policarbonato foi o chamado microfibrilamento ou *crazing*. *Crazing* é um mecanismo de deformação de materiais poliméricos que está associado à fratura. Polímeros que apresentam tendência à deformação por microfibrilamento são mais frágeis que outros que deformam por bandas de cisalhamento. No ensaio foi muito difícil obter os dados de propagação de trinca através do microscópio devido a este mecanismo, foi difícil porque existe uma incerteza de qual é o valor verdadeiro da ponta da trinca, e, sobretudo porque as microfibrilas (*crazes*) consomem parte da energia necessária para crescer a trinca. Também, o microfibrilamento induz fratura frágil, pois a microfibrilas agem como sítios de nucleação de trincas. A Figura 5.15.a mostra o corpo de prova ESE(T)-04 ensaiado segundo norma ASTM 647, a Figura 5.15.b mostra uma vista em perspectiva do corpo usado e finalmente a Figura 5.15.c mostra o microfibrilamento do policarbonato.

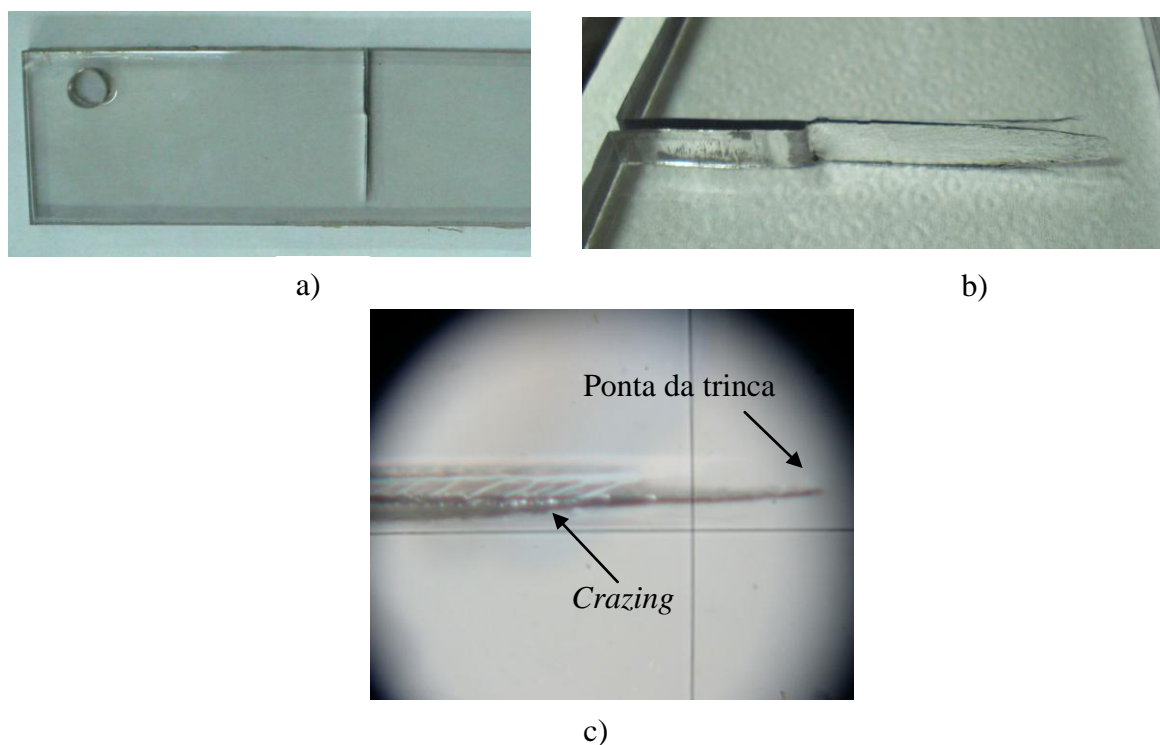


Figura 5.15 – Propriedade a fadiga do policarbonato. a)Corpo ensaiado
b) Propagação c) *Crazing* ou Microfibrilamento. (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

Na Figura 5.16 são relacionados os resultados obtidos através da regra de Paris e Elber que relaciona o fator de intensidade de tensões com o comportamento do crescimento de trincas por fadiga baseado nos resultados base da/dN vs ΔK , resultados

obtidos dos corpos de prova ESE(T)-01, ESE(T)-02, ESE(T)-03, ESE(T)-04. A figura mostra o ajuste dos quatro ensaios feitos para determinar a propriedade de fadiga do material, os dados foram ajustados pelo método de mínimos quadrados a uma curva log-log de forma potencial (mostradas nas equações embaixo do gráfico) que representa a forma típica da zona de propagação estudada por Paris como: $(da/dN)_{\text{Paris}} = 0.0001 \Delta K^{3.1679}$. No entanto, melhoramos o ajuste dos dados experimentais para descrever o comportamento $da/dN \times \Delta K$ usando o efeito do limiar de propagação ΔK_{th} proposta na regra de Elber obtendo como resultado $(da/dN)_{\text{Elber}} = 3.5E-4(\Delta K - 0.3)^{2.5}$. Devemos lembrar que o comportamento a fadiga dos polímeros é muito mais sensível à frequência de carregamento comparado com os metais, a frequência usada foi de 4Hz. Quando os polímeros são submetidos a ciclos de alta frequência e/ou tensões relativamente grandes, pode ocorrer um aquecimento localizado; conseqüentemente as falhas podem ser devidas a um amolecimento do material, é não um resultado de fadiga propriamente dito.

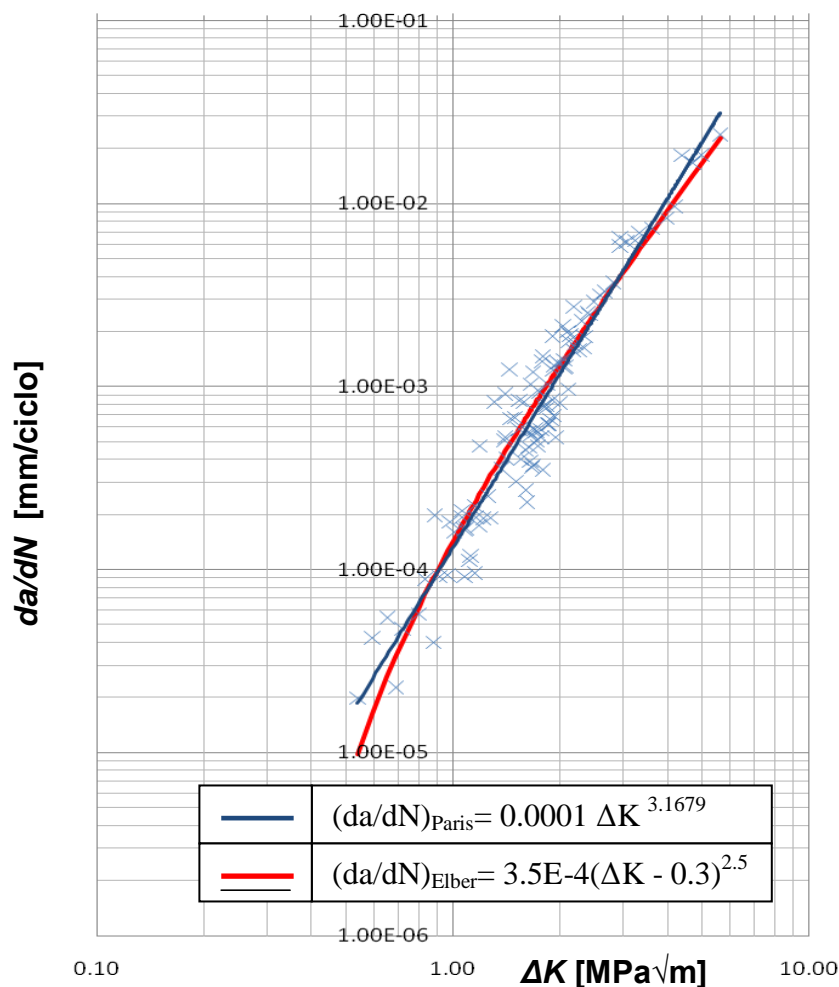


Figura 5.16 – Propriedade $da/dN \times \Delta K$ do policarbonato, ajustado a Paris e Elber. (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

A Figura 5.17 mostra o comportamento a vs N do corpo de prova ESE-02, enquanto a Figura 5.18 mostra a comparação da relação a/w versus o fator de forma $f(w/a)$ usando os dados experimentais obtidos nas equações para ESE(T). São mostrados também na Figura 5.19 a relação entre o carregamento aplicado P e o número de ciclos N usando K -Decreasing e K -Increasing.

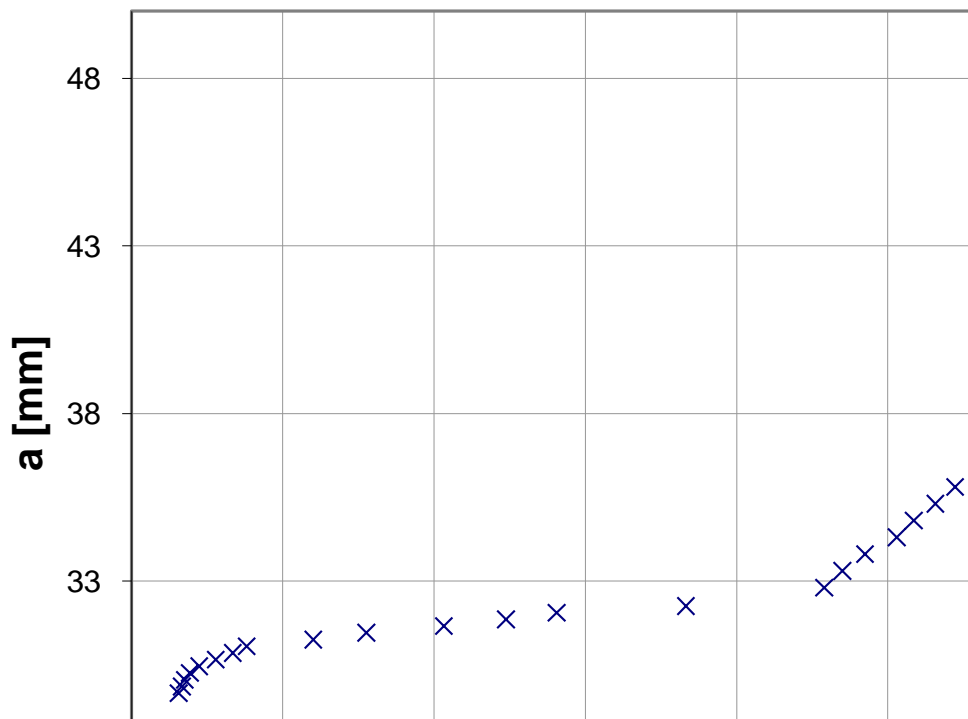


Figura 5.17– Comparação a vs N corpo de prova ESE(T)-02

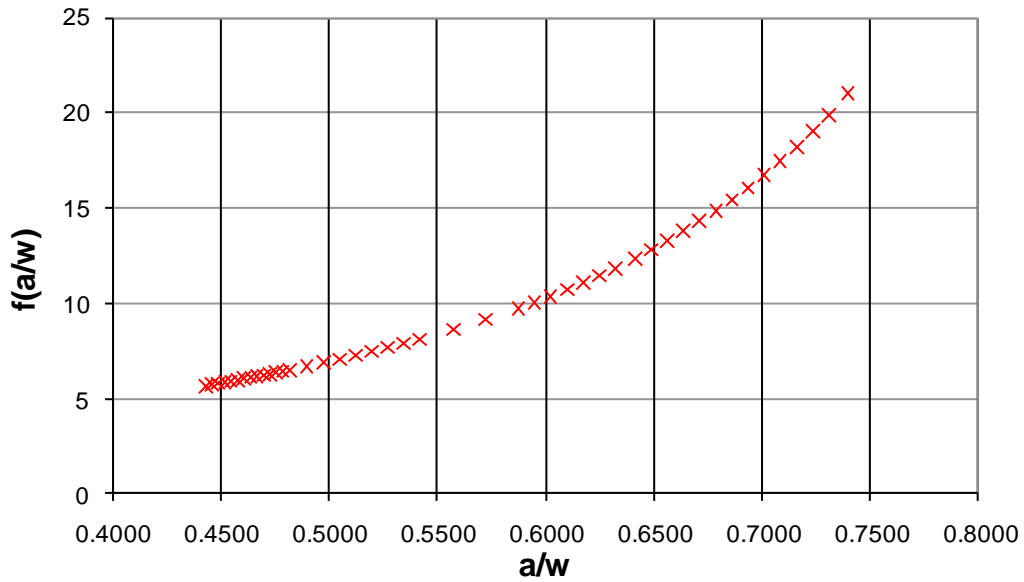


Figura 5.18– Comparação $f(a/w)$ vs a/w , corpo de prova ESE(T)-02

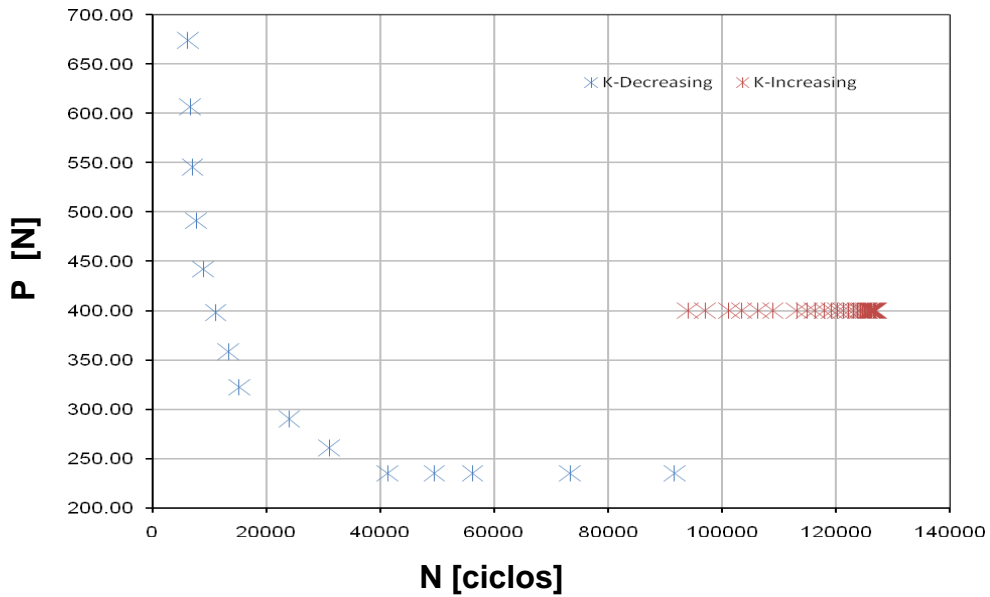


Figura 5.19– Comparação P vs N , corpo de prova ESE(T)-02

A Figura 5.20 expõe os resultados da técnica *K-Decreasing* e *K-Increasing* feita no ESE(T)-02 onde se foi diminuindo o carregamento até a trinca parar para encontrar o limiar de propagação $\Delta K_{th}=0.6 [MPa\sqrt{m}]$, uma vez feito isto se aumentou o

carregamento para a trinca se propagar novamente até fraturar. ΔK é calculado usando os dados experimentais obtidos nas equações para ESE(T).

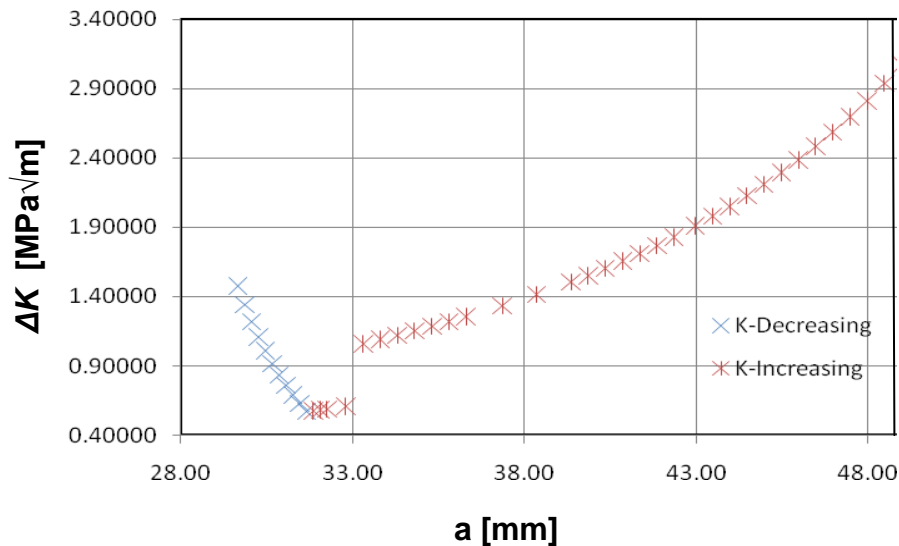


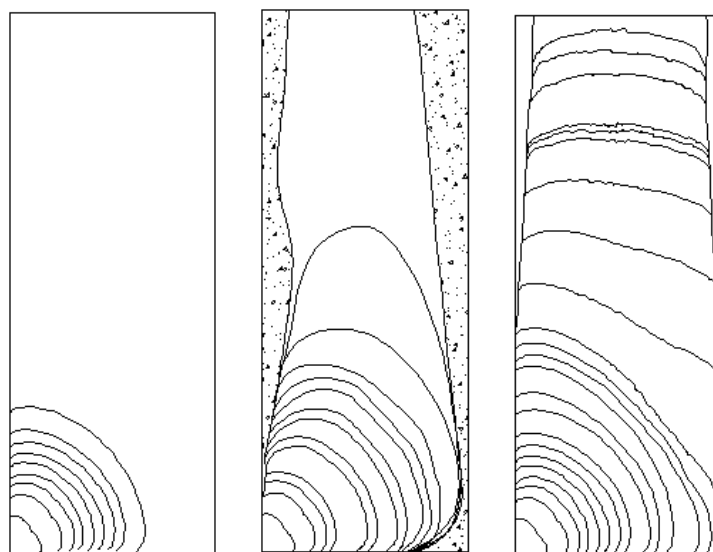
Figura 5.20– Comparação ΔK vs a corpo de prova ESE(T)-02

5.3. Resultados Ensaio de Propagação de Trincas Bidimensional

Os corpos de prova para o estudo da transição de trinca bidimensional para unidimensional recebem a nomenclatura C2D-00. Devido a que foram realizados diferentes tipos de controle para conseguir que a transição seja alcançada e para mostrar uma melhor informação dos ensaios dividimos nossos experimentos segundo os resultados observados, em três diferentes grupos.

A Figura 5.21 explica os três grupos de trincas bidimensionais observadas nesta dissertação. No primeiro caso (C2D-08, C2D-09, C2D-12), Figura 5.21.a, um dos fatores de intensidade $\Delta K_I(a)$ ou $\Delta K_I(c)$ atingem rapidamente a tenacidade a fratura e o corpo fratura fragilmente. No segundo caso (C2D-01, C2D-05, C2D-06), Figura 5.21.b, o carregamento aplicado inicial e alto devido a que precisamos a iniciação da trinca bidimensional, uma vez iniciada a trinca o carregamento é abaixado de um 10 a 20%, o suficiente para o fator de intensidade $\Delta K_I(a)$ e $\Delta K_I(c)$ se manter sem fraturar fragilmente, contudo há uma propagação interna bidimensional (que poderia ser invisível no caso de sólidos opacos) e também uma transição 2D para 1D. Uma vez a trinca virar

passante o fator de intensidade de tensão na frente da trinca aumenta muito e a frente da trinca avança se deformando em comprimentos cada vez maiores porém só internamente, efeito *tunneling*, as deformações são altas na ponta da trinca, e, as faces do corpo que estavam no início, começa a plastificar e se abrir abruptamente ate atingir a tenacidade a fratura do material. No tercer caso (C2D-010, C2D-11, C2D-13), Figura 5.21.c, os $\Delta K_I(a)$ e $\Delta K_I(c)$ são controlados com muito cuidado diminuindo o carregamento gradualmente mantendo $\Delta K_I(a)$ dentro da faixa de 1 [$MPa\sqrt{m}$] aproximadamente, com este tipo de técnica podemos observar como a trinca completa toda a propagação bidimensional para após entrar em transição 2D-1D, após de alguns ciclos virar para trinca passante e finalmente fraturar.



Primeiro Caso

Segundo Caso

Tercer Caso

Figura 5.21 – Tipos de propagação bidimensional e transição 2D para 1D.
 a) Propagação com fratura frágil b) Propagação interna invisível ou *tunneling* com $\Delta K_I(c)$ e $\Delta K_I(a)$ altos c) Propagação controlada visível com $\Delta K_I(c)$ e $\Delta K_I(a)$ baixos

5.3.1. Primeiro Caso – Fratura Frágil

Corpos de prova tais como C2D-08, C2D-09, C2D-12 fraturaram fragilmente com $a/t \leq 1$, a Figura 5.22 mostra o comprimento a e c versus o número de ciclos N alcançado.

Lembre se que o policarbonato é um tipo de polímero artificial que pertence ao grupo dos termoplásticos, que significa que sua rigidez se altera com a temperatura, tanto a fratura frágil como a fratura dúctil é possível. Sendo que os fatores que favorecem a fratura frágil são redução na temperatura, aumento na taxa de deformação ou a presença de um entalhe afiado. Dependendo da tensão aplicada e a espessura do corpo de prova os mecanismos de propagação por fadiga podem ser frágil ou dútil.

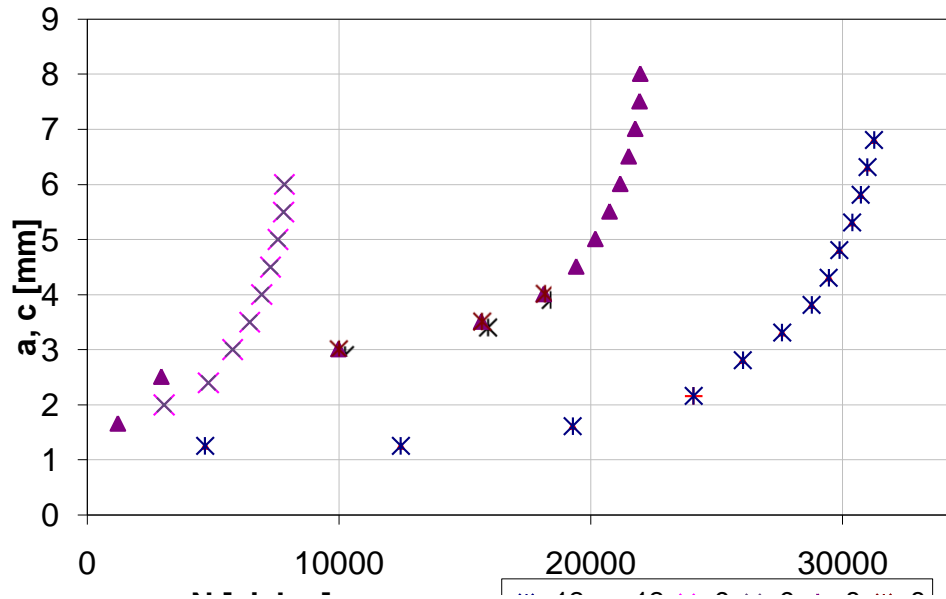
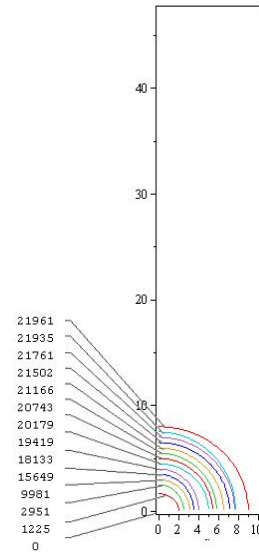


Figura 5.22 –Trinca bidimensional $a/t \leq 1$, C2D-08, C2D-09, C2D-12

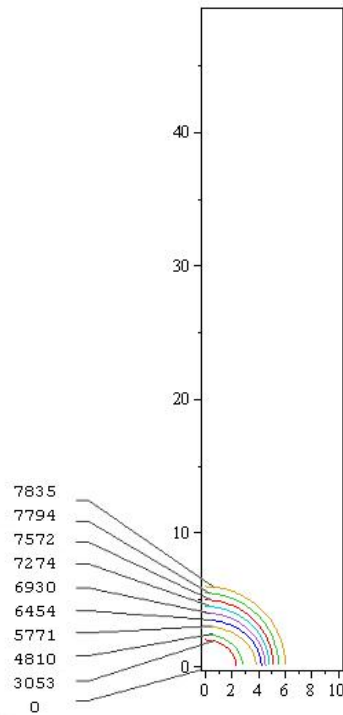
A Figura 5.23 e 5.24 detalham o número de ciclos através de semi-elipses como resultado dos ensaios de diferentes corpos de prova, foram usados os dados obtidos de comprimento a , c , c' para desenhar os diferentes estágios da propagação para diferentes ciclos de carga experimentais. O formato das quarto – elipses esta em função das razões

$a/c \leq 1$ ou $a/c > 1$ onde é usada a equação geral da elipse $y = a\sqrt{1 - \frac{x^2}{c^2}}$ e

$y = c\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}$ respectivamente, escolhendo os semi eixos maior e menor dependendo do caso.

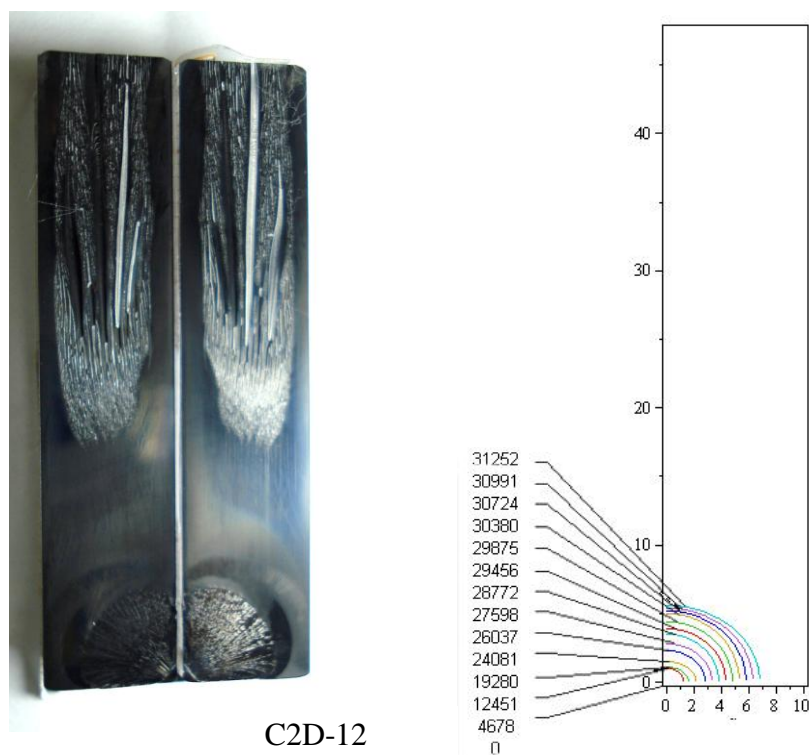


C2D-08



C2D-09

Figura 5.23 – Fratura frágil em trinca bidimensional $a/t < 1$, C2D-08,09 com numero de ciclos, a geometria éfeita com dados experimentais da propagação.



C2D-12

Figura 5.24 – Fratura frágil em trinca bidimensional $a/t < 1$, C2D-12 com numero de ciclos e geometria feita com dados experimentais da propagação, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

A Figura 5.25 mostra como a trinca se propagou em forma bidimensional, C2D-12, e depois fraturou fragilmente. Perceba se a região de instabilidade bidimensional a qual produz a fratura frágil da peça devido aos elevados fatores de intensidade de tensão predominantes. Em nossos ensaios, vários corpos de prova fraturaram durante o período da elevação da taxa dc'/dN . A continuação é descrito o comportamento da trinca bidimensional no C2D-12 através de diferentes gráficos.

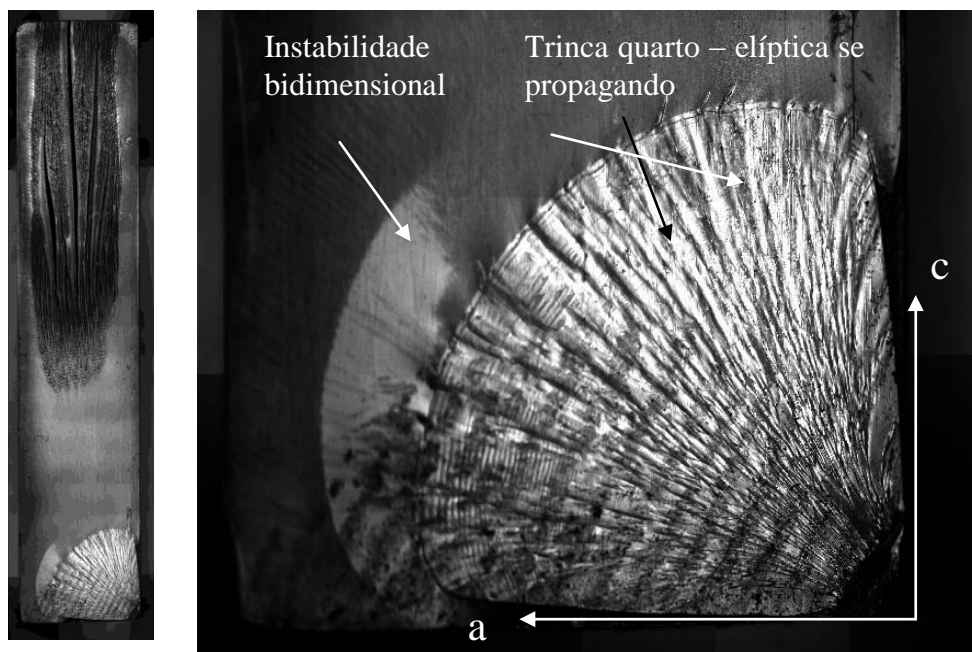


Figura 5.25– Propagação Bidimensional e fratura frágil C2D-12

A Figura 5.26 mostra a relação tanto da profundidade a quanto da largura c versus o número de ciclos N , repare-se que neste caso o crescimento da trinca bidimensional corresponde a uma relação $a/c=1$, os pontos na Figura 5.26 estão sobrepostos como resultado da simetria da propagação, poderíamos dizer que a trinca tem um formato quarto-circular nestes estágios. A Figura 5.27 explica a comparação entre os comprimentos a , c e os fatores de intensidade predominantes de tensão $K_I(a)$ e $K_I(c)$ calculados segundo Newman-Raju, também são mostrados $K_I(a)$ e $K_I(c)$ encontrados experimentalmente ajustando os valores a propriedade de fadiga do material com o uso da regra de Elber.

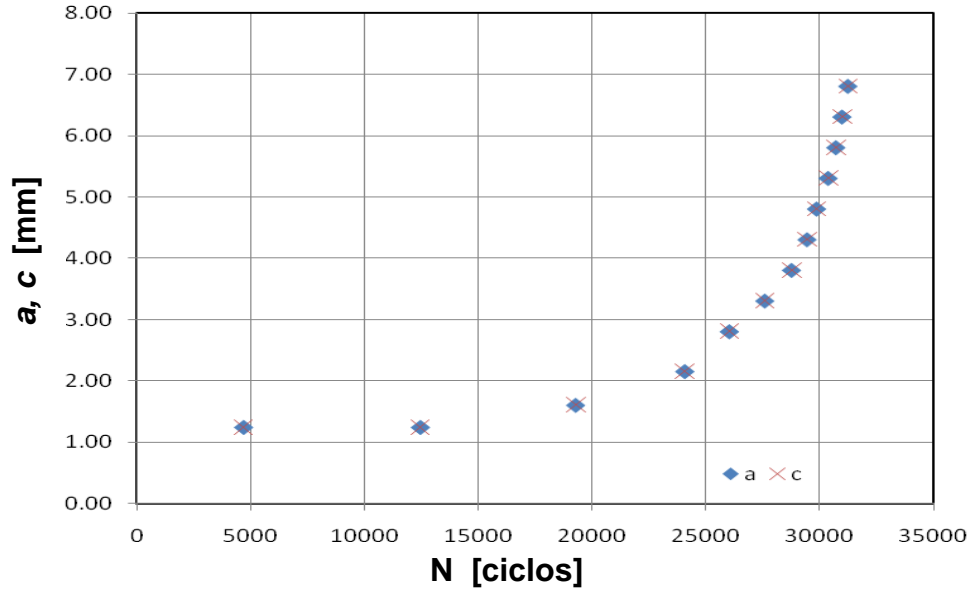


Figura 5.26– Propagação Bidimensional a,c vs. N C2D-12

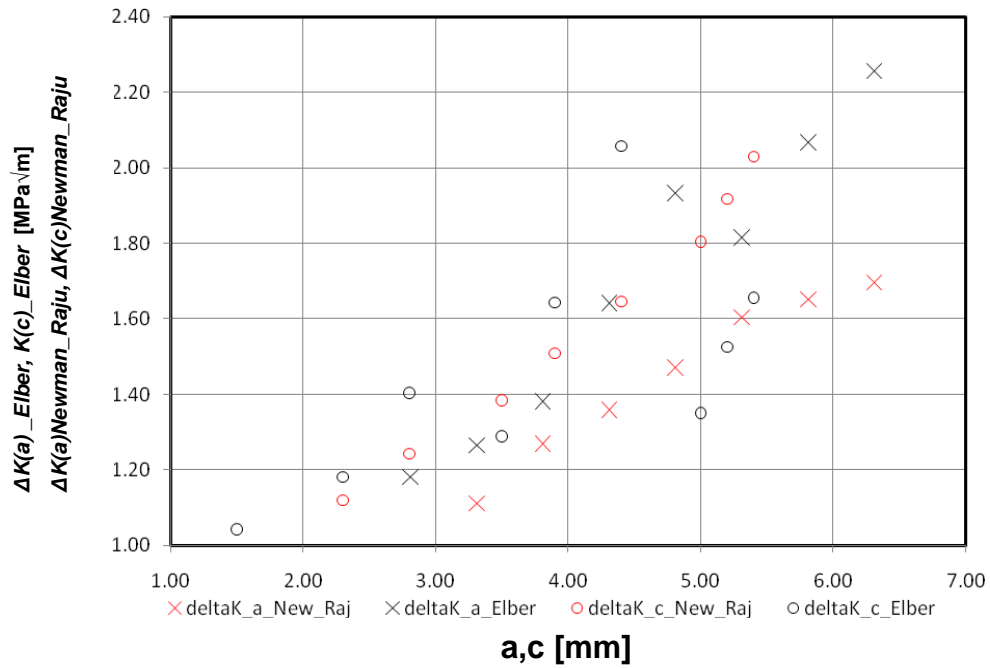


Figura 5.27– Propagação Bidimensional a,c vs ΔK_{New_Raj} , ΔK_{Elber} , C2D-12

A Figura 5.28 mostra a comparação entre os fatores predominantes $K_I(a)$ e $K_I(c)$ calculados usando Newman-Raju versus os fatores experimentais ajustados com a regra de Elber. Também é mostrado na Figura 5.29 o comportamento de (c/w) , (a/t) vs. $f(c/w)$, $f(a/t)$.

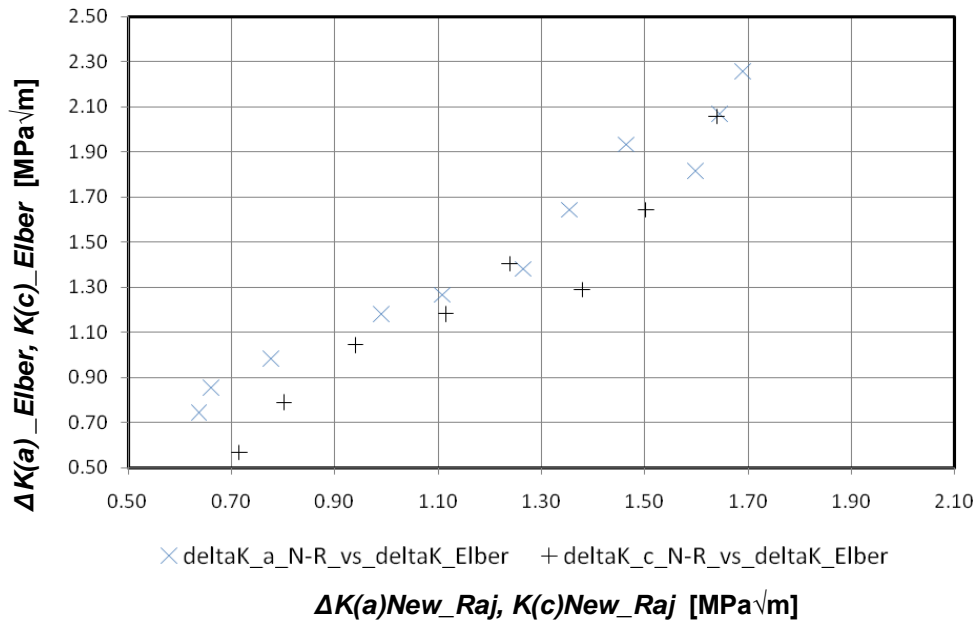


Figura 5.28– Propagação Bidimensional ΔK_{New_Raj} vs ΔK_{Elber} , C2D-12

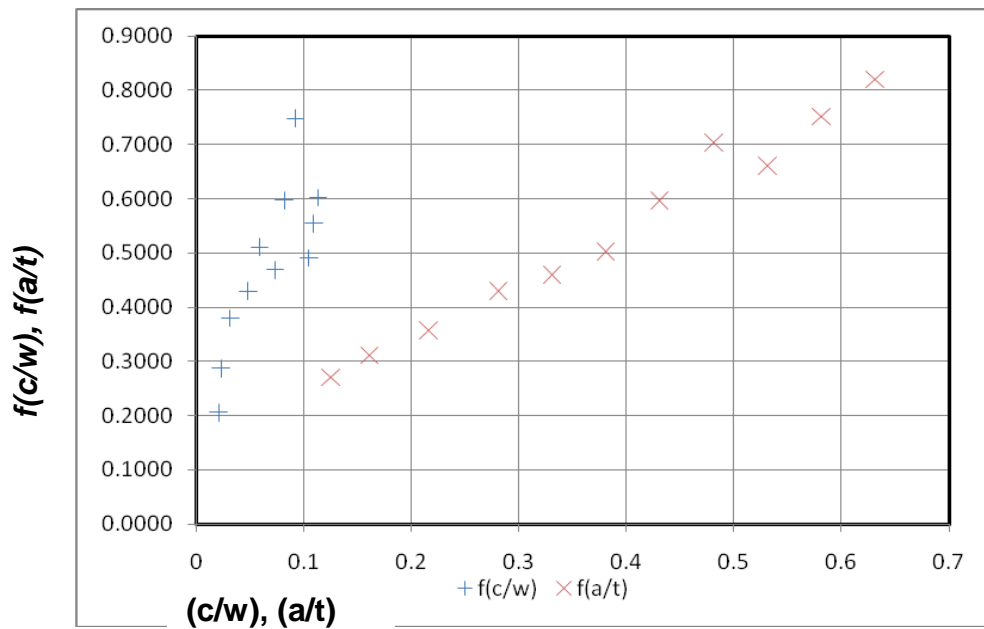


Figura 5.29– Propagação Bidimensional (c/w) , (a/t) vs. $f(c/w)$, $f(a/t)$, C2D-12

São mostradas nas Figuras 5.30 e 5.31 os fatores de forma (ou fator de intensidade de tensões normalizado) para trinca quarto - elíptica como função de a/t e c/w usando as expressões de Newman-Raju e comparados com os resultados experimentais (ajustada por Elber), os valores experimentais são importantes já que pode ser calculada a vida a fadiga do material, para valores $a/t \leq 1$.

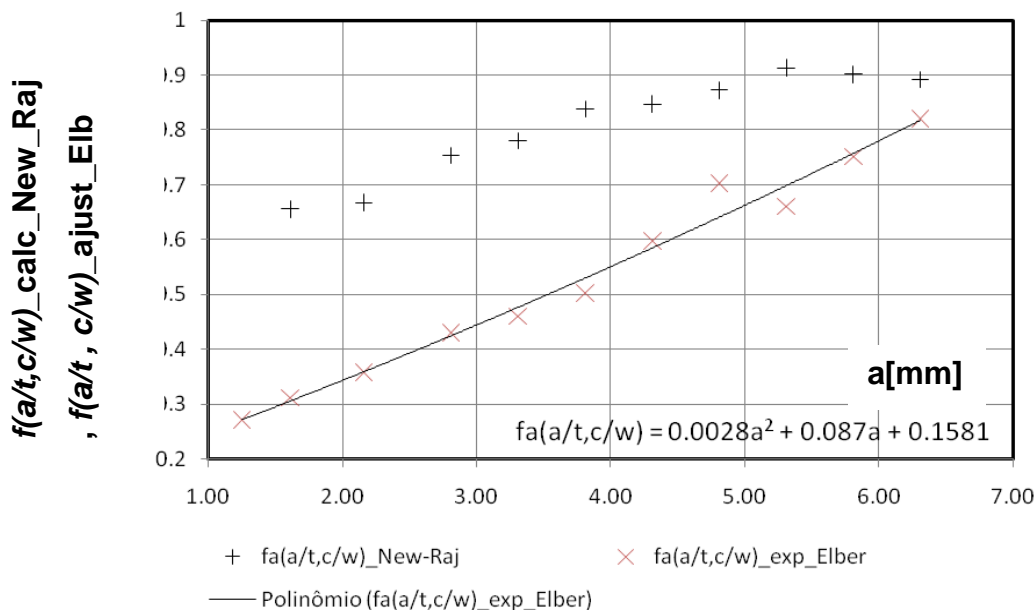


Figura 5.30– Propagação Bidimensional

a vs $f(a/t, c/w)$ _calc_New_Raj vs. $f(a/t, c/w)$ _ajust_Elber, C2D-12

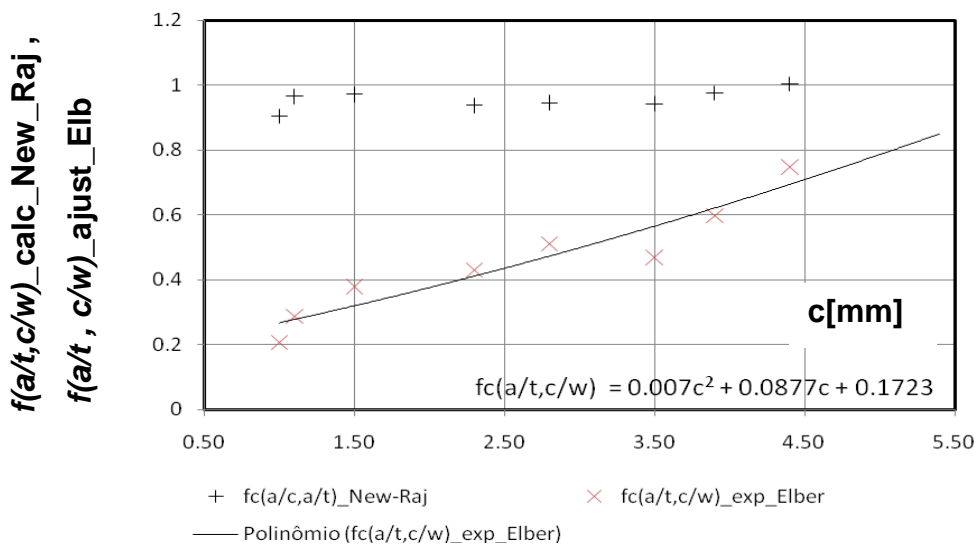


Figura 5.31– Propagação Bidimensional

c vs $f(a/t, c/w)$ _calc_New_Raj vs. $f(a/t, c/w)$ _ajust_Elber, C2D-12

5.3.2. Segundo Caso - Alta Plasticidade e *Tunneling*

Basicamente os corpos de prova ensaiados neste grupo apresentam alta plasticidade na zona de tensão plana, como resultado disso existe uma grande deformação lateral uma vez que a trinca passa o estágio de transição. Durante e depois a transição o efeito *tunneling* acontece. Foram apreciados dois casos do efeito *tunneling*, o primeiro onde a trinca vai se propagando bidimensionalmente para depois entrar numa transição interna sem cortar as paredes laterais do corpo de prova, como se fosse uma trinca interna invisível a qual não pode ser apreciada por fora da estrutura para finalmente a trinca, e finalmente mudar para um formato muito fechado e com alta concentração de tensões a qual vai produzir alta plasticidade nas faces laterais. O segundo caso é mostrado na figura x, onde a trinca propaga bidimensionalmente até atingir algum lugar na face oposta da barra, que não é necessariamente no vértice $a=t$, no momento que a trinca corta a face oposta ela entra em transição muito rapidamente virando de 2D para 1D e o processo do *tunneling* começa.

O efeito *tunneling* vem acompanhado da propagação elastoplástica. Devido a este fato de plasticidade grande na transição estes ensaios não servem para fazer uma boa análise do que acontece na transição, no entanto os dados obtidos continuam sendo úteis para entender o momento da transição.

No ensaio C2D-01 se percebeu que ao longo da transição a trinca bidimensional tenta se equilibrar para valores $a/t > 1$ mudando rapidamente do estágio bidimensional para unidimensional em poucos ciclos de carga, Figura 5.32, devido a esse efeito se decidiu trabalhar com fatores de intensidade baixos $K_I(a)$ e $K_I(c)$ baixando o carregamento quando $a=t$. Frequências baixas são usadas na transição.

A Figura 5.32.a mostra um ensaio preliminar no corpo de prova C2D-01, no estágio 1 a trinca já se encontra em processo de propagação bidimensional ($a/t \leq 1$), após alguns ciclos a trinca entra em transição (estágios 2 e 3), Figura 5.22.b, onde se acelera mudando rapidamente seu formato de bidimensional para unidimensional ($a/t > 1$) cortando a face traseira do corpo em um intervalo de 1 ciclo, depois de um outro ciclo a trinca ganha estabilidade sem fraturar o corpo fragilmente (estágio 4) e conservando

agora o formato unidimensional (estágio 5) a trinca aumenta rapidamente o $\Delta K_I(c)$ até fraturar (estágio 6).

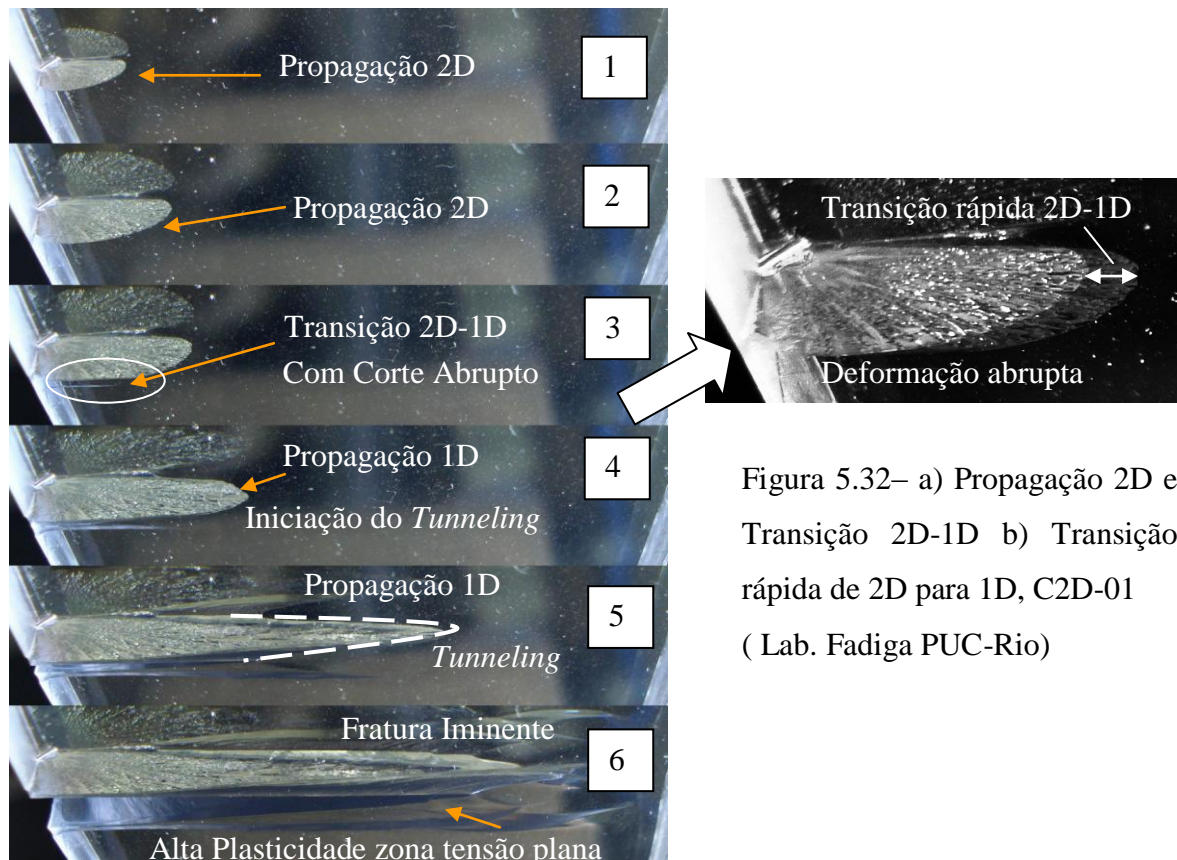
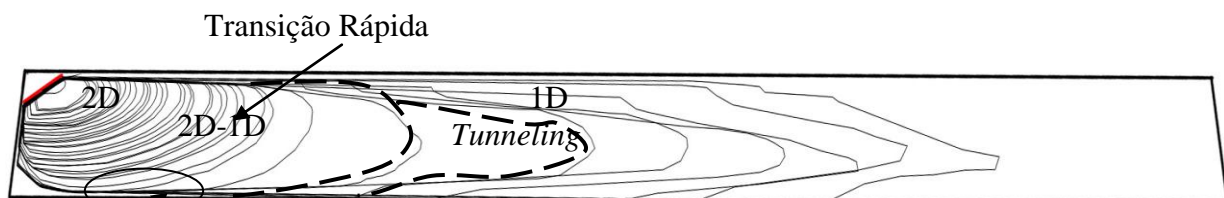


Figura 5.32– a) Propagação 2D e Transição 2D-1D b) Transição rápida de 2D para 1D, C2D-01 (Lab. Fadiga PUC-Rio)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812397/CA

A Figura 5.33 mostra como a trinca no sentido do semi eixo a não atinge a face traseira da barra senão depois da transição, isso devido ao efeito *tunneling* o qual tem dependência com o carregamento aplicado.



Corte abrupto da face traseira feito pela frente da trinca bidimensional em transicao

Figura 5.33– Sobreposição das fotografias tomadas no C2D-01 mostrando a evolução dos frentes da trinca nestagios 2D, 2D-1D, 1D (Lab. Fadiga PUC-Rio)

A Figura 5.34 mostra os resultados das medições feitas para os diferentes comprimentos a, c e c' , percebe-se a interseção entre a e c' é feita muito antes de o comprimento a atingir a espessura t , devido a que a trinca se propagou internamente devido ao *tunneling*.

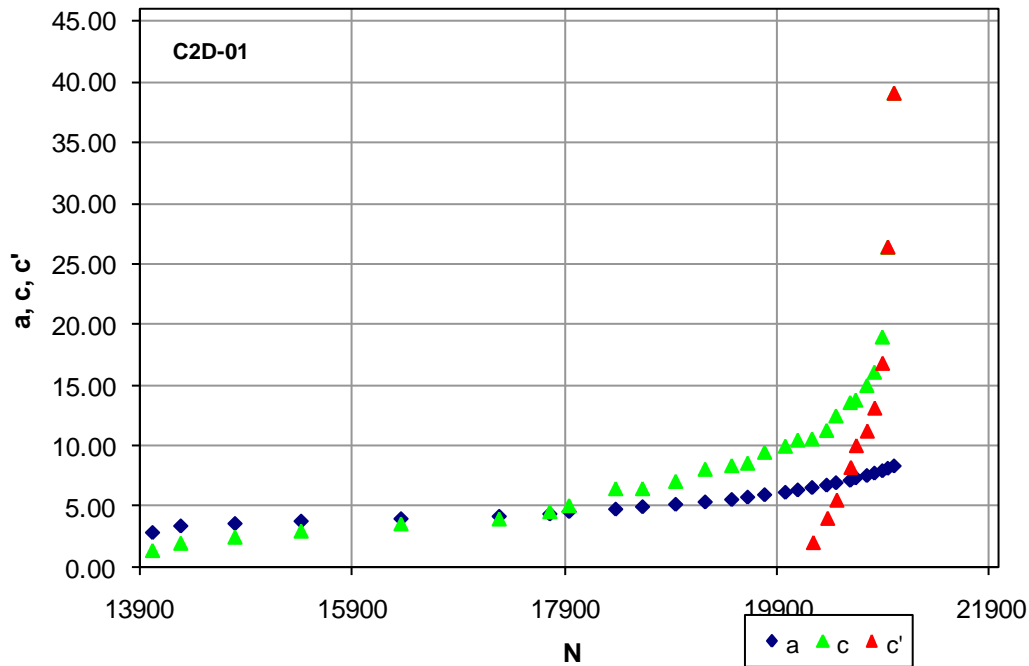


Figura 5.34 – Transição trinca bidimensional para unidimensional, C2D-01 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

A Figura 5.35 mostra os C2D-05 e C2D-06, que pertencem ao primeiro caso de propagação chamada de invisível. As Figuras 5.36 e 5.37 mostram o desenvolvimento dos diferentes comprimentos a , c e c' para os mesmos corpos de prova.

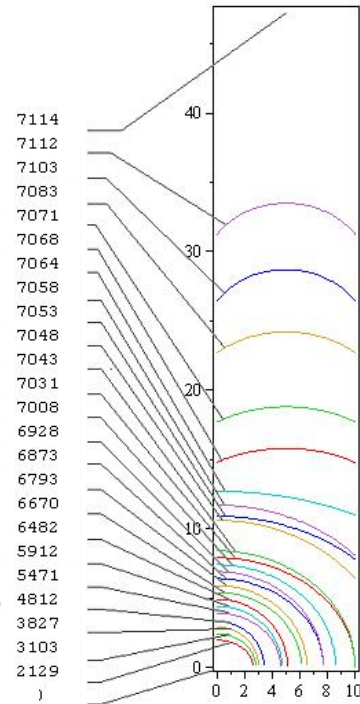
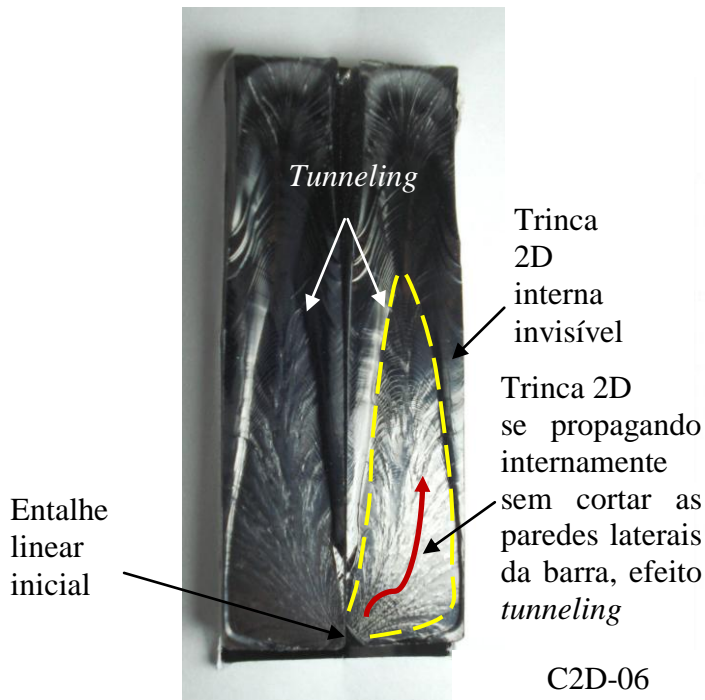
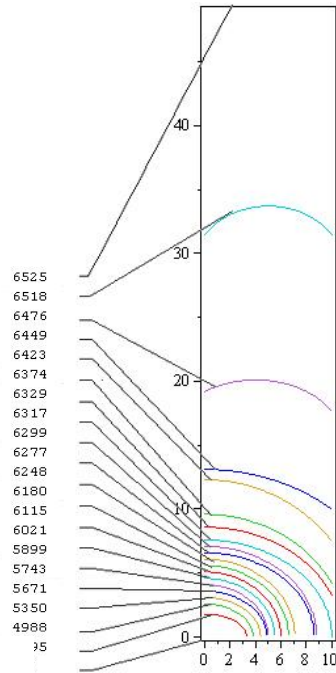


Figura 5.35 – Transição de propagação de trinca bidimensional $a/t > 1$ para unidimensional, C2D-05,06 com numero de ciclos e geometria feita com dados experimentais da propagação, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

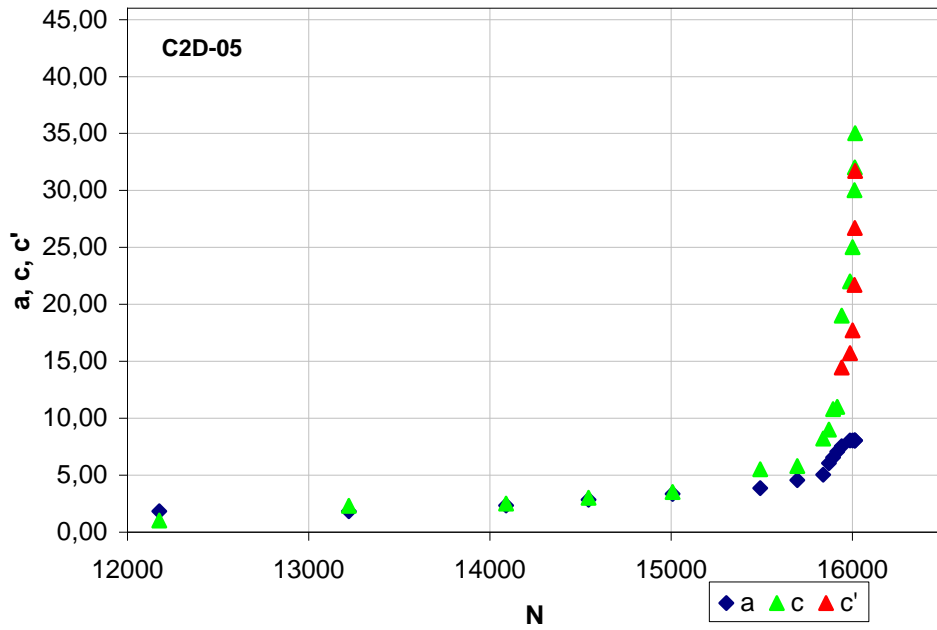


Figura 5.36 – Transição trinca bidimensional para unidimensional , C2D-05

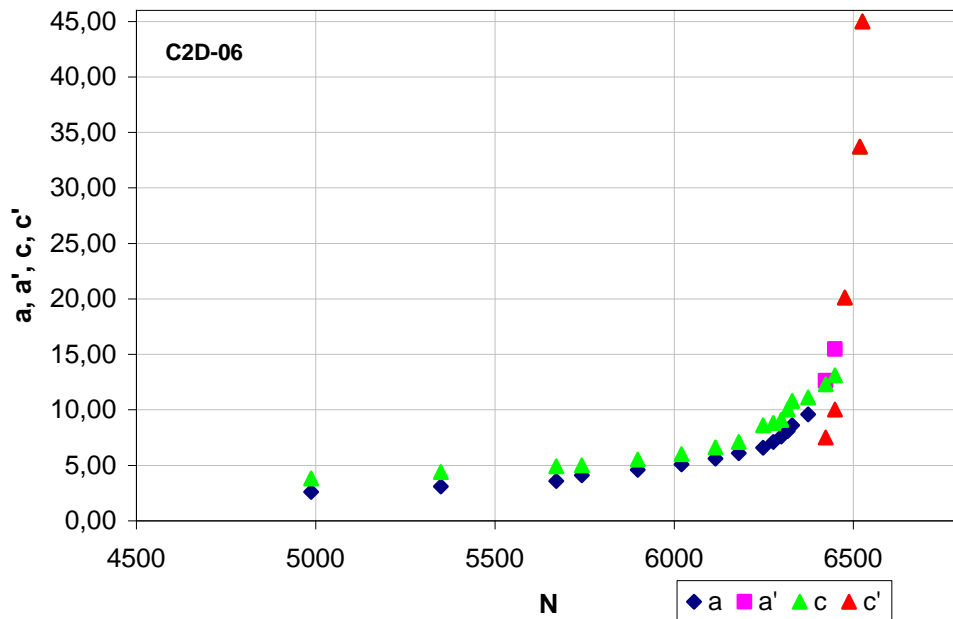


Figura 5.37 – Transição trinca bidimensional para unidimensional , C2D-06

Na Figura 5.38 se mostram a taxa c/c' para conhecer como os comprimentos c e c' vão mudando na transição, as razões c/c' dos corpos de prova C2D-1, C2D-5, C2D-7 são muito mais rápidas comparadas com C2D-10, C2D-11, C2D-1, isto é devido a que o carregamento aplicado se diminui de 8550 N até 6840 N, diminuindo os $\Delta K_I(c)$ e $\Delta K_I(a)$ muito pouco, neste período a trinca bidimensional não atingiu a face oposta do CP como e mostrado na Figura 5.38.

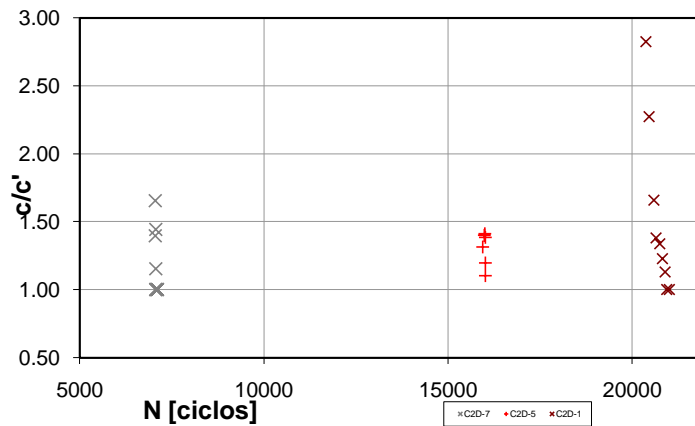


Figura 5.38 – Razões c/c' para diferentes corpos de prova C2D-01, C2D-05, C2D-07, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

5.3.3. Terceiro Caso – Transição 2D-1D

Neste terceiro caso se mostra corpos de prova C2D os quais conseguiram passar a etapa de transição de trinca bidimensional para unidimensional sem ter altas deformações por tensão plana. A Figura 5.39 explica os resultados das medições de comprimentos a e c na propagação da trinca bidimensional para $a/t \leq 1$, ao mesmo tempo a Figura 5.40 explica o comportamento da trinca ao longo de aproximadamente 70000 ciclos.

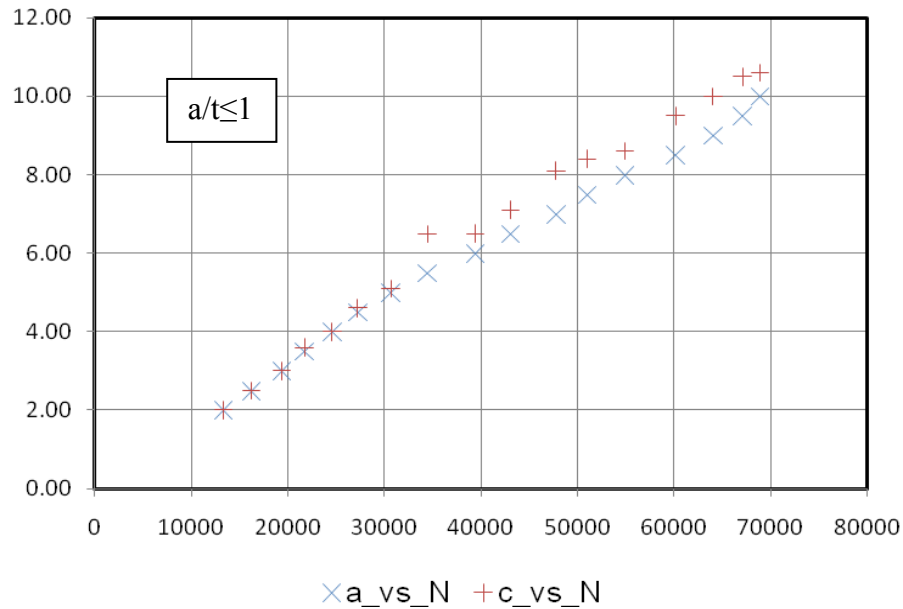


Figura 5.39 – Comparação a, c vs. N , trinca bidimensional, $a/t \leq 1$, C2D-13

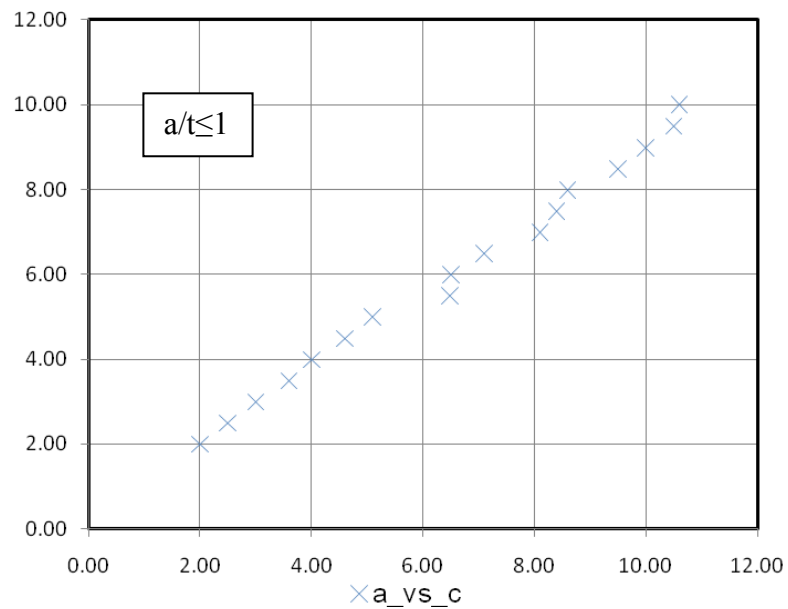
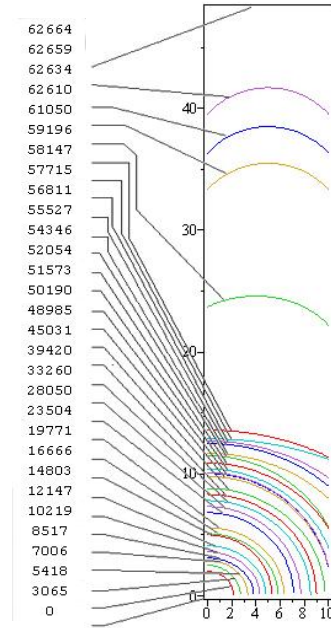
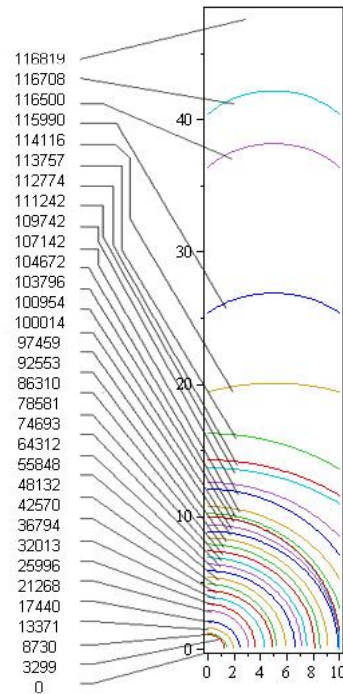


Figura 5.40 – Comparação a vs. c , trinca bidimensional, $a/t \leq 1$, C2D-13

As Figuras 5.41.a e 5.41.b mostram o desenvolvimento dos diferentes comprimentos a, c e c' para C2D-10, C2D-11. Os gráficos que ilustram a evolução da trinca bidimensional e o número de ciclos para cada frente de trinca acompanham quase perfeitamente as medições tomadas experimentalmente. Para o caso $a/t > 1$ é usado o a' imaginário usando obviamente os dados experimentais dos comprimentos c e c' .



C2D-10



C2D-11

Figura 5.41 – Transição de propagação de trinca bidimensional $a/t > 1$ para unidimensional, com numero de ciclos e geometria feita com dados experimentais da propagação, a) C2D-10, b) C2D-11 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

As Figuras 5.36 e 5.37 mostram o desenvolvimento dos diferentes comprimentos a , c e c' para os mesmos corpos de prova.

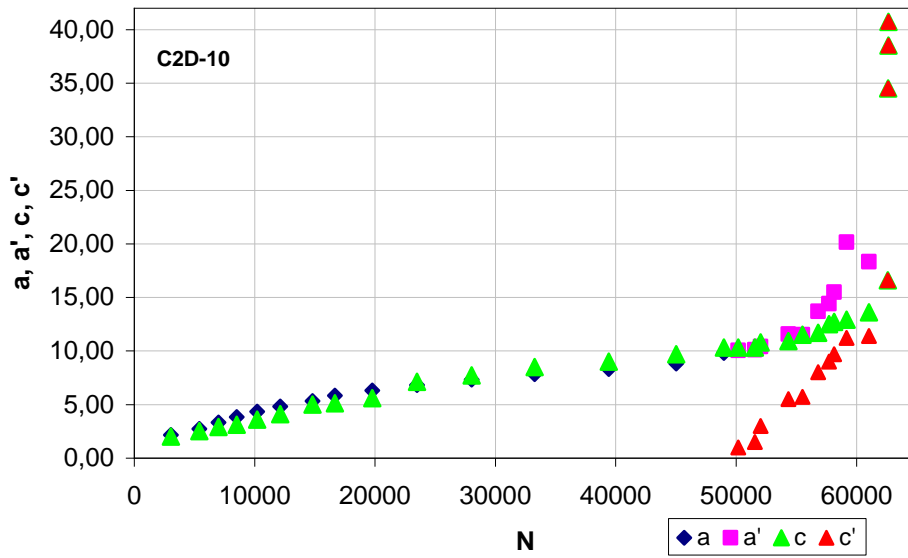


Figura 5.42 – Transição trinca bidimensional para unidimensional , C2D-10
(Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

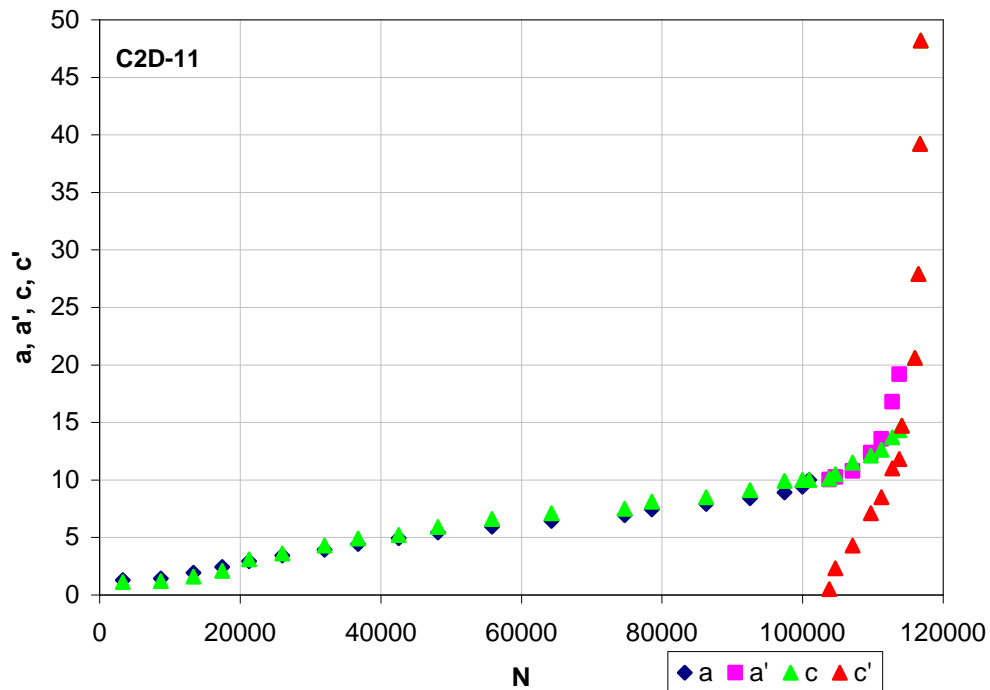


Figura 5.43– Transição trinca bidimensional para unidimensional , C2D-11

Na Figura 5.44 é mostrado o resultado do carregamento aplicado ao longo do ensaio de transição de trinca bidimensional para unidimensional, C2D-13, usaremos os

resultados obtidos neste ensaio para determinar vários resultados importantes relacionadas a propagação 2D, transição 2D-1D e propagação 1D.

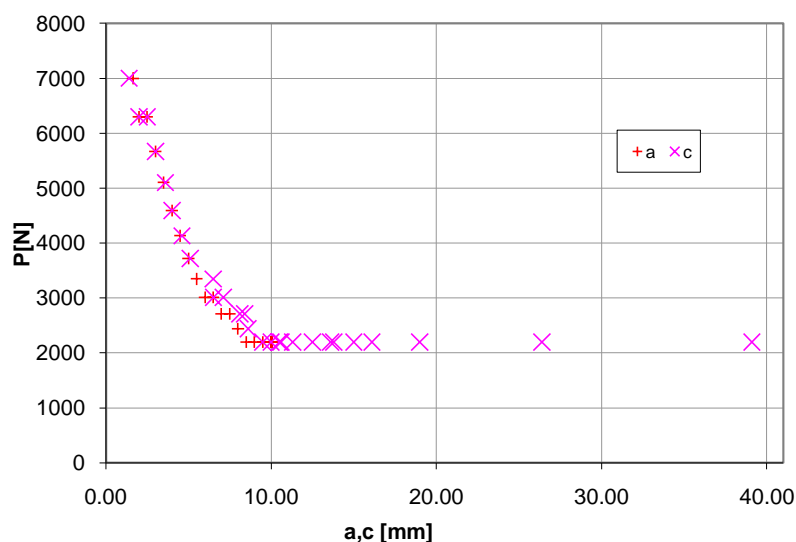
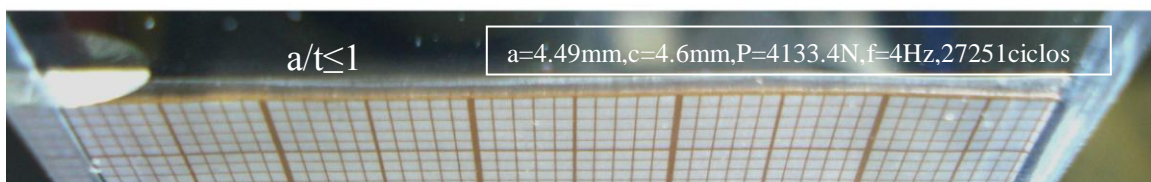
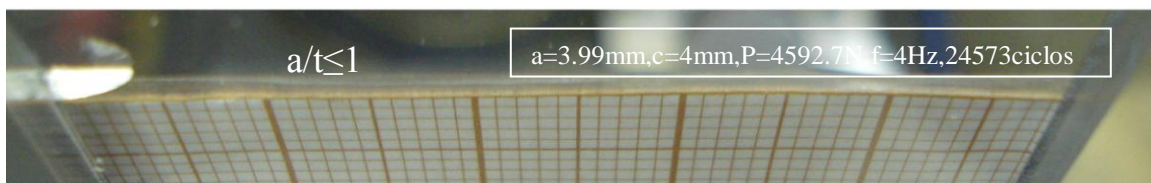
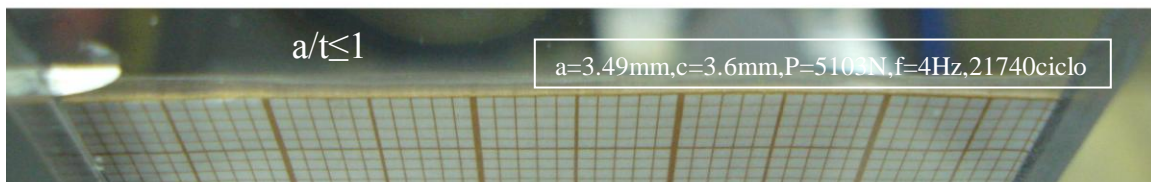
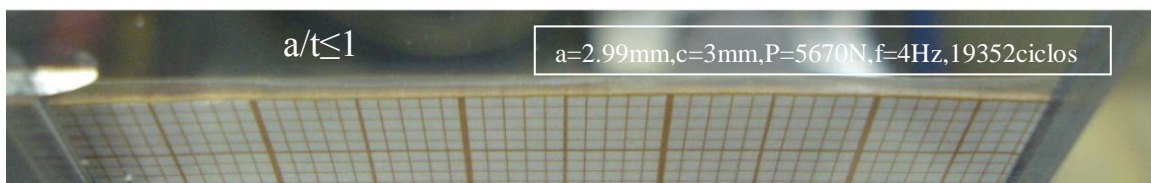
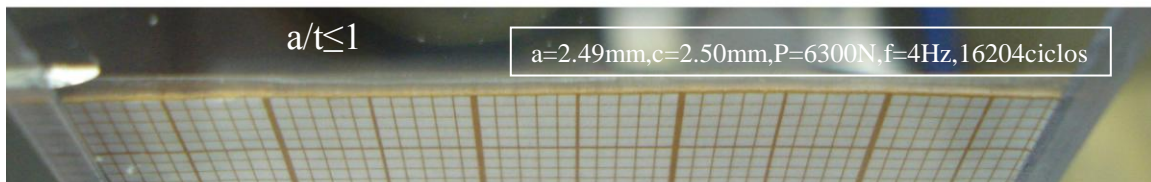
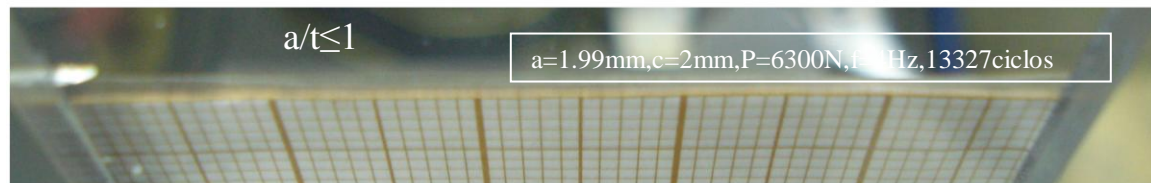
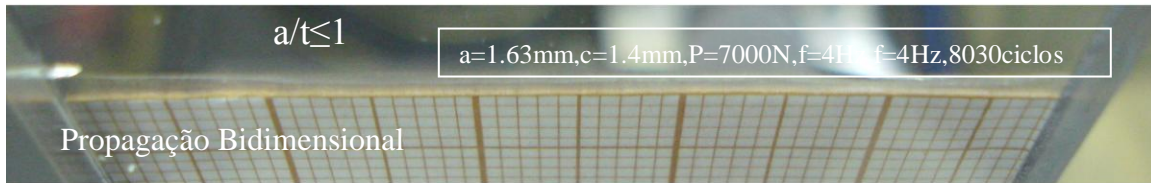
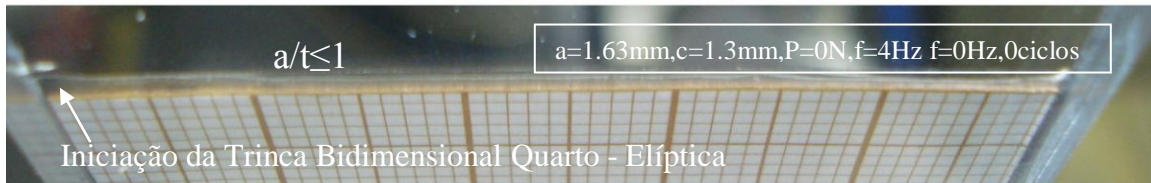
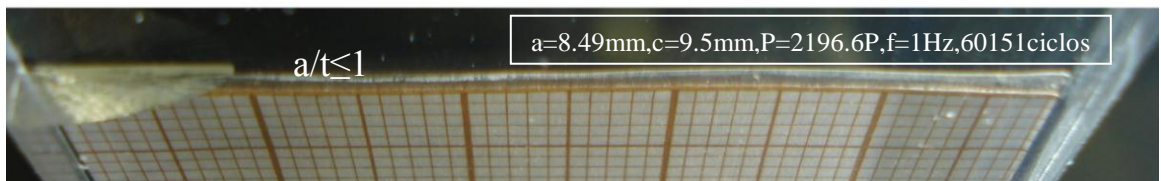
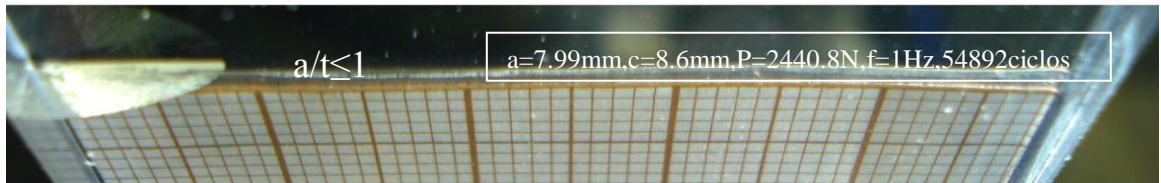
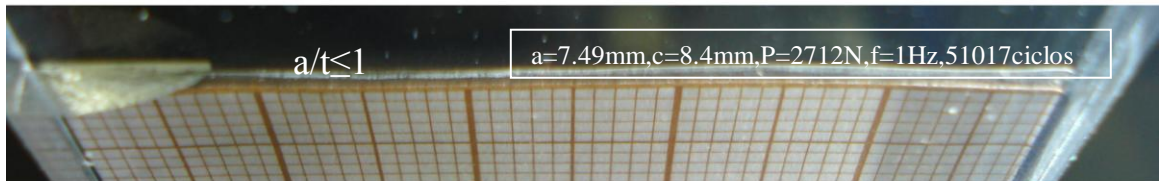
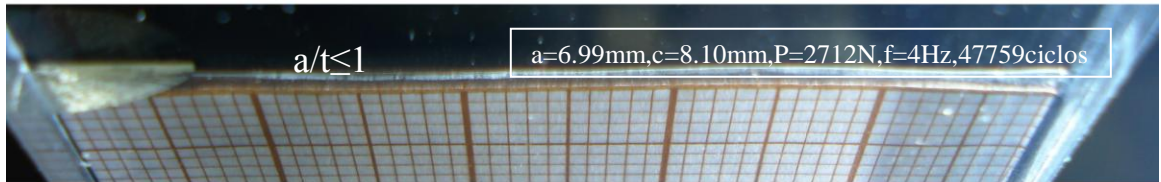
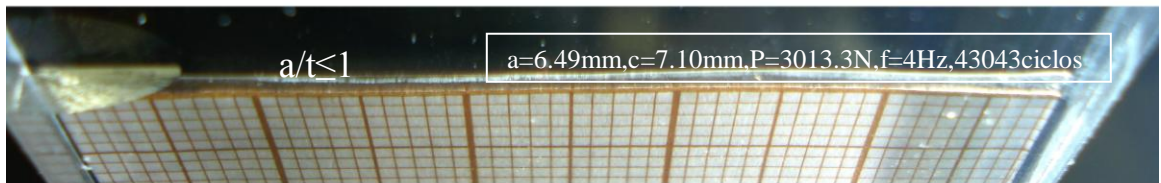
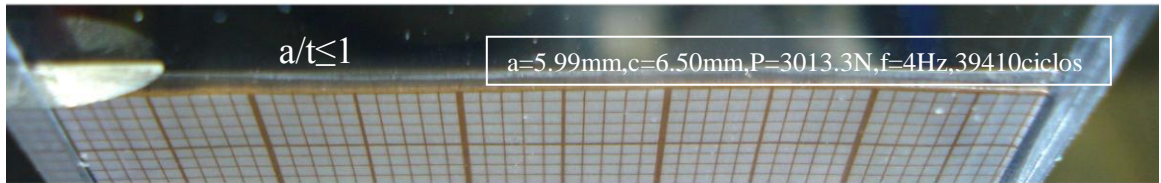
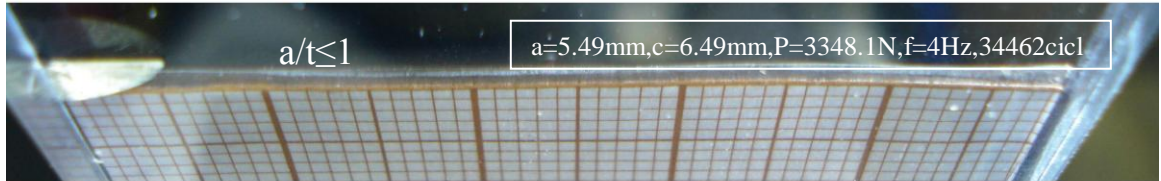
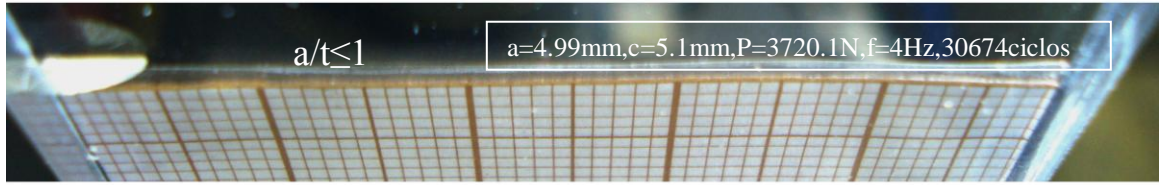


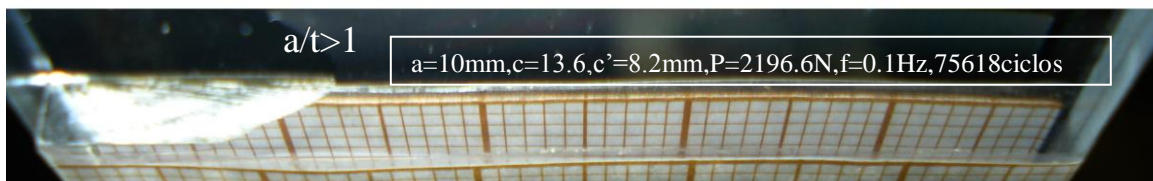
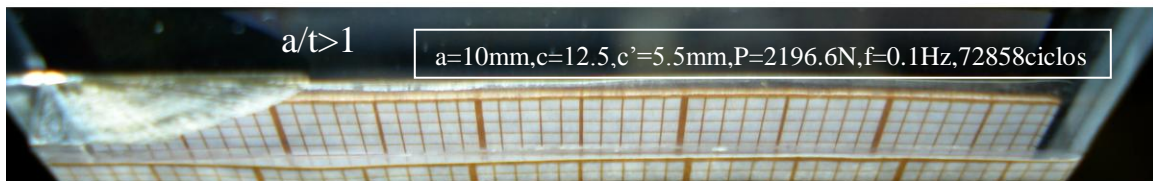
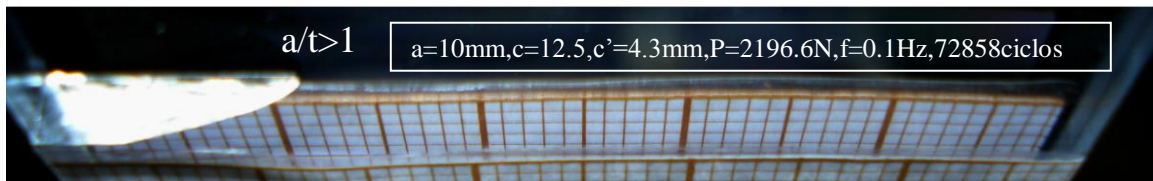
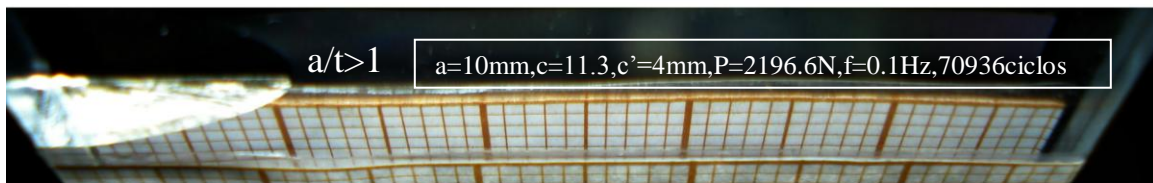
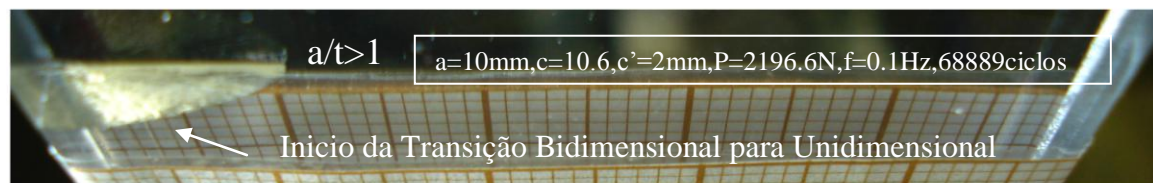
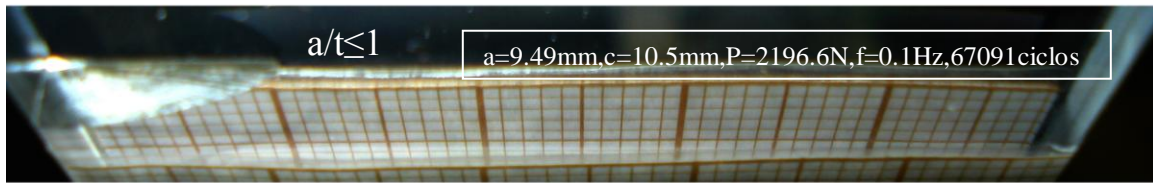
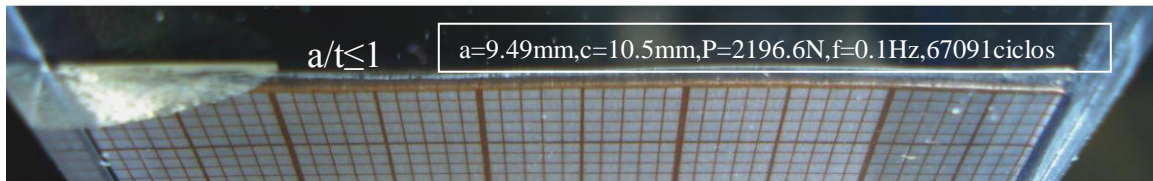
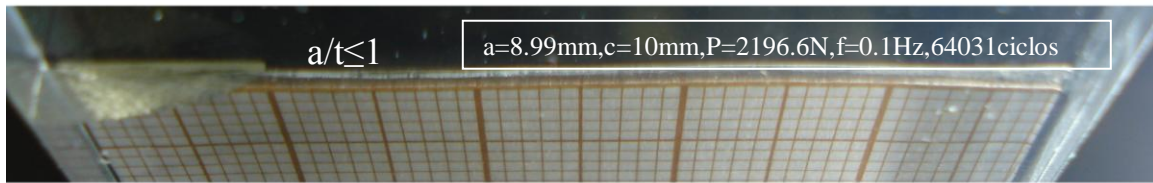
Figura 5.44 – Diminuição do carregamento aplicado para conseguir registrar a transição, C2D-13 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

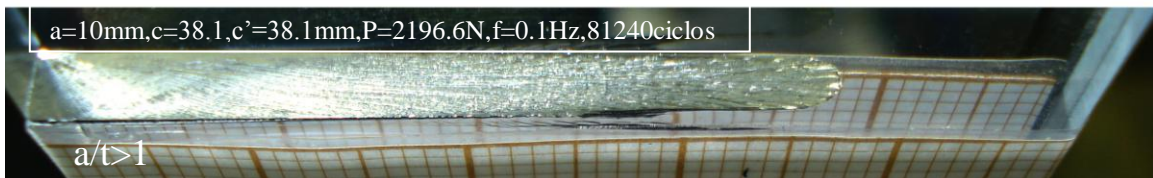
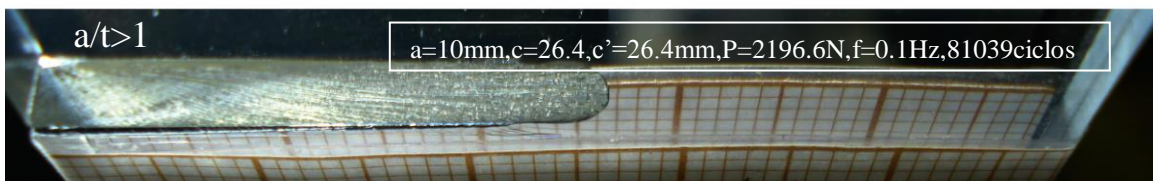
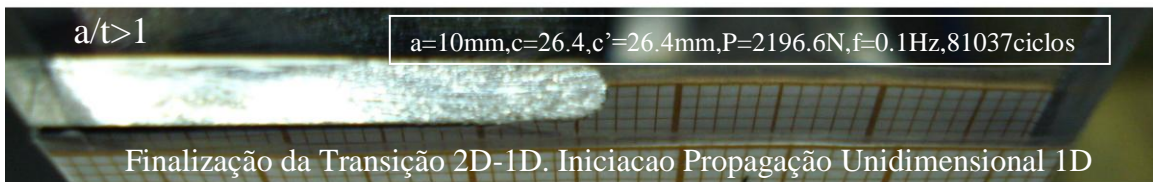
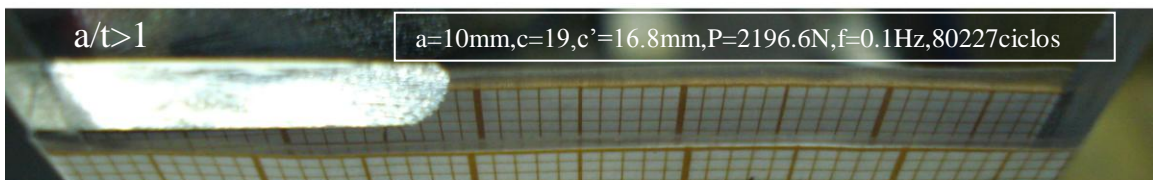
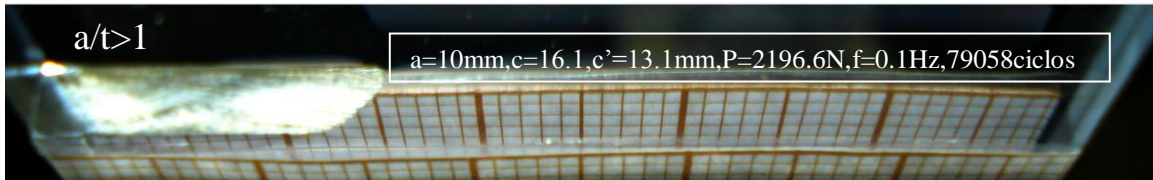
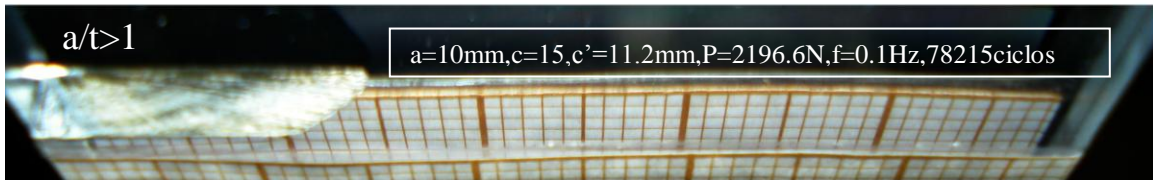
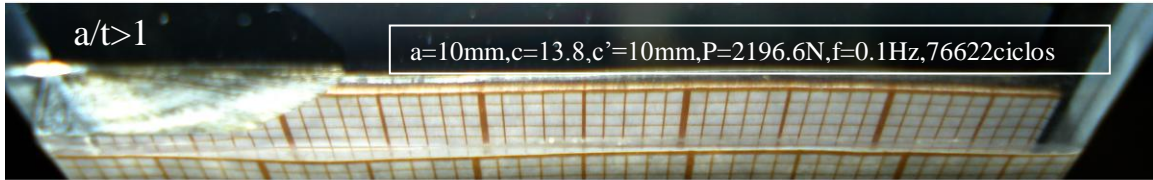
A Figura 5.45 mostra a evolução da trinca bidimensional desde o nascimento dela no corpo de prova C2D-13. Pode-se conferir que independentemente de qual seja a geometria do defeito, (neste caso nos colocamos um defeito linear num dos vértices $a=1.63\text{mm}$ e $c=1.3\text{mm}$), a trinca se inicia de forma bidimensional e quase elíptica, se propagando em seus dois eixos, no cenário participam agora a taxa dc/dN no semi-eixo c e a taxa da/dN no eixo semi-eixo a . Ao atingir a face traseira em $a/t=1$ a trinca começa a se propagar rapidamente, começando assim o estágio de transição, enquanto a taxa dc/dN continua crescendo e ao mesmo tempo desacelerando um pouco, o comprimento c' vai mudando sua taxa de propagação dc'/dN no corpo procurando sempre conseguir um equilíbrio na frente da trinca. Devido a que $K_I(c) < K_I(c')$ o formato da frente quarto-elíptica vão mudando a cada ciclo, na transição de trinca bidimensional para unidimensional o formato muda e deixa de se parecer a uma elipse. A transição 2D para

1D ocorre em aproximadamente em 12148 ciclos, porém quando a trinca adota formato 1D ela falha depois de 1050 ciclos devido ao alto $K_I(c)$ na frente da trinca.









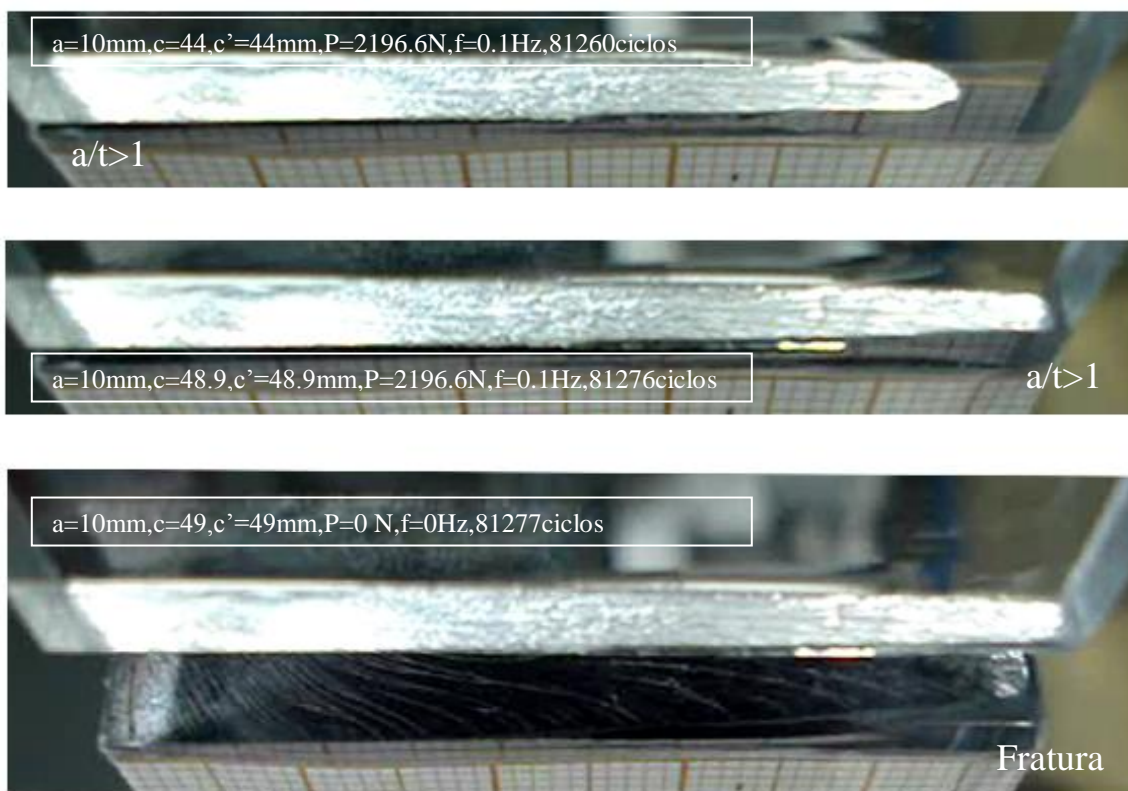


Figura 5.45 – Transição de trinca Bidimensional para Unidimensional por fadiga, C2D-13, Policarbonato, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

A Figura 5.46 mostra o resultado final do ensaio de fadiga no qual foi controlada tanto a propagação bidimensional, transição e propagação unidimensional do C2D-13. Figuras 5.47 e 5.48 explicam o comportamento da trinca ao longo do ensaio. A curva mostrada como a' na Figura 5.48 simplesmente ajuda a entender a relação entre a' e c' .

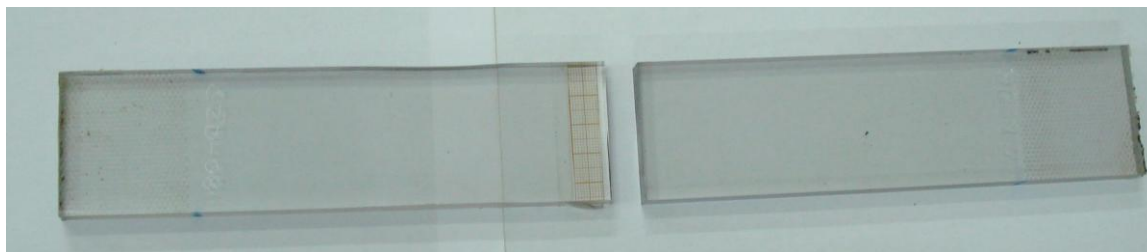


Figura 5.46 – Fratura final de um corpo de prova sob carregamento cíclico trativo, propagação de trinca bidimensional, 81277 ciclos (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

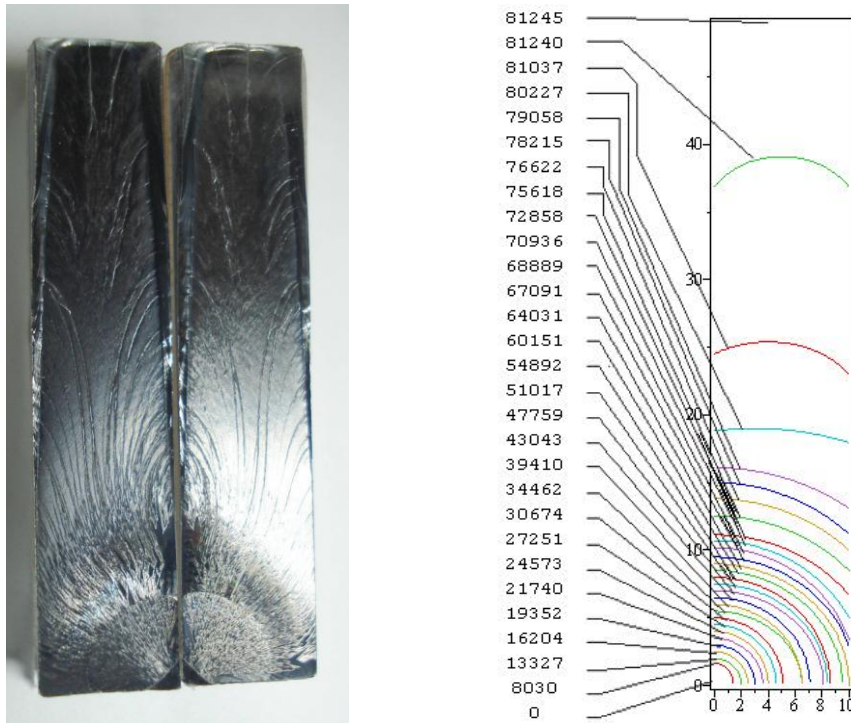


Figura 5.47 – Transição de propagação de trinca bidimensional $a/t > 1$ para unidimensional, C2D-13 com numero de ciclos e geometria feita com dados experimentais da propagação, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

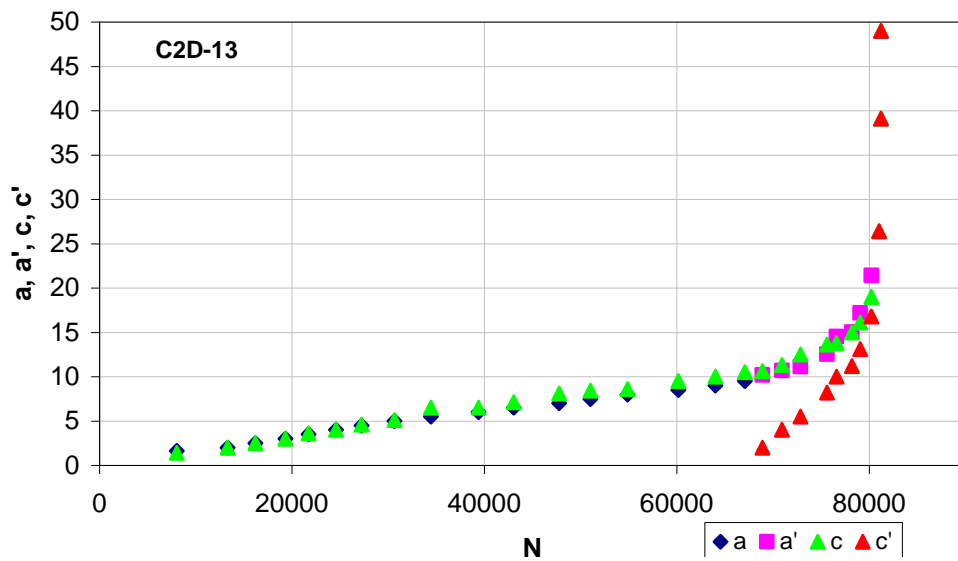


Figura 5.48 – Transição trinca bidimensional para unidimensional, C2D-13

A Figura 5.38 mostrou-se um tipo de comportamento para as razões c/c' , ensaios C2D-01, C2D-5 e C2D-7, nestes ensaios o $\Delta K_I(a)$ foi controlado com o objetivo de não fraturar fragilmente as barras, no entanto esses ensaios mostraram bastante plasticidade, aprendendo disso, os ensaios C2D-10, C2D-11, C2D-13 foram melhor controlados com tensões e frequências baixas. A Figura 5.49 apresenta por isso um outro tipo de comportamento, a razão c/c' vai diminuindo de um estagio muito grande até um baixo (onde a transição termina), esse diminuição é devido ao controle sobre o carregamento que foi aplicado nestes corpos de prova, nestes ensaios a diminuição da carga foi feita mas vezes ao longo do comprimento do semi eixo a .

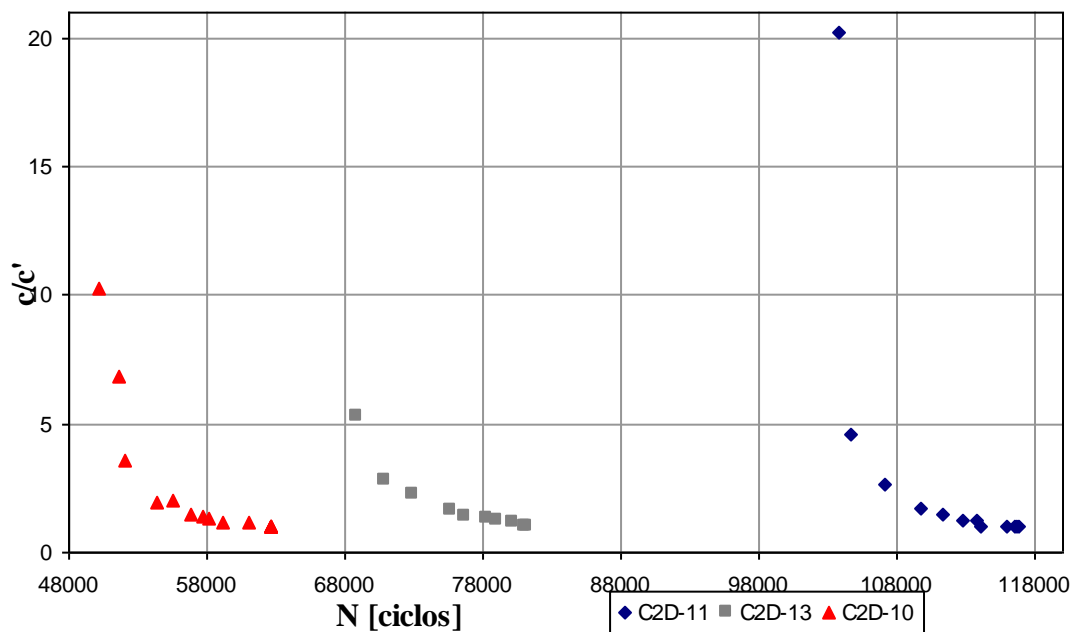


Figura 5.49 – Razões c/c' para diferentes corpos de prova C2D-10, C2D-11, C2D-13, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

A Figura 5.50 é um mosaico que contém aproximadamente 140 microfotografias, C2D- 13, o propósito destas fotografias foi de obter dados deixados pelas marcas de praia por fadiga na transição da trinca bidimensional para unidimensional. Existe uma grande variedade de linhas que ajudam a rastrear a propagação, contudo não foi possível rastrear todas elas como mostrado na figura embaixo. Pode se apreciar que o formato inicial da trinca 2D e quase quarto-circular, quer dizer $c/a \approx 1$ para valores $a/t < 1$. Pode se observar também as diferenças das taxas dc'/dN e dc/dN na transição 2D para 1D, onde $dc'/dN > dc/dN$ devido a que $K_I(c') > K_I(c)$ ao longo da transição.

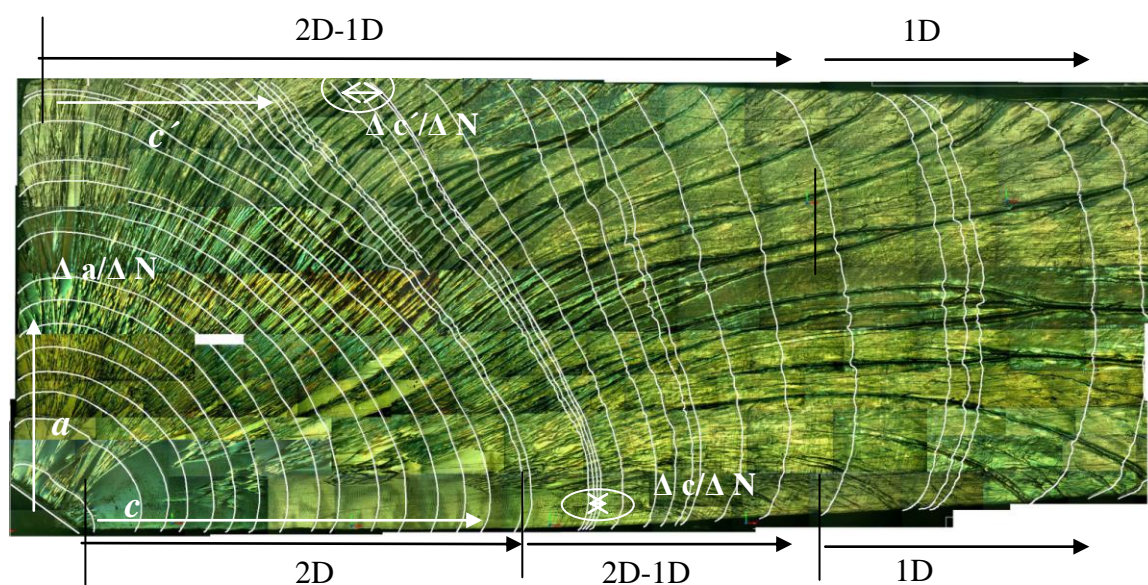


Figura 5.50 – Mosaico de 140 microfotografias mostrando Propagação 2D, Transição da trinca 2D para 1D e propagação 1D, C2D-13 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

Também se observa na Figura 5.51 duas regiões 1 e 2, de maior e menor densidade de marcas de fadiga, o aumento de número de marcas de fadiga para um mesmo comprimento ($50\mu\text{m}$) na transição 2D para 1D, onde $\Delta KI(c')$ (região 2) $>$ $\Delta KI(c)$ (região 2) $>$ $\Delta KI(c)$ (região 1).

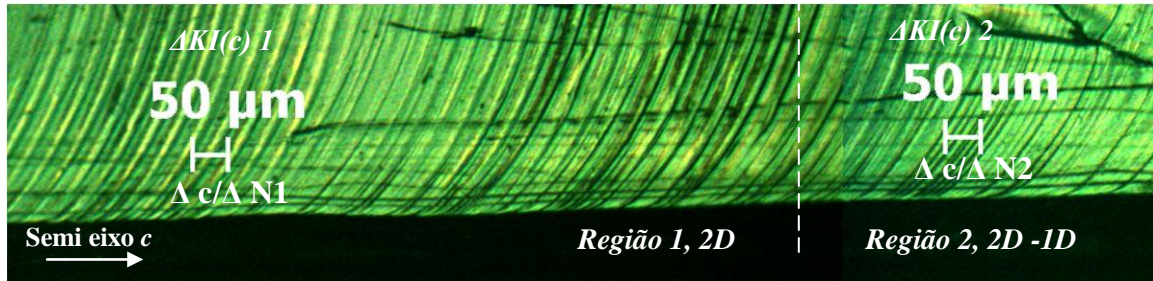


Figura 5.51 – $\Delta K_I(c)$ predominante controla a taxa de propagação dc/dN ao longo do semi-eixo c , C2D-13 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

A Figura 5.52 mostra os valores obtidos do comprimento a versus $\Delta K_I(a)$ usando as expressões de Newman-Raju e comparando os mesmos parâmetros usando as propriedades a fadiga do policarbonato, ajustados a Regra de Elber, $a/t \leq 1$.

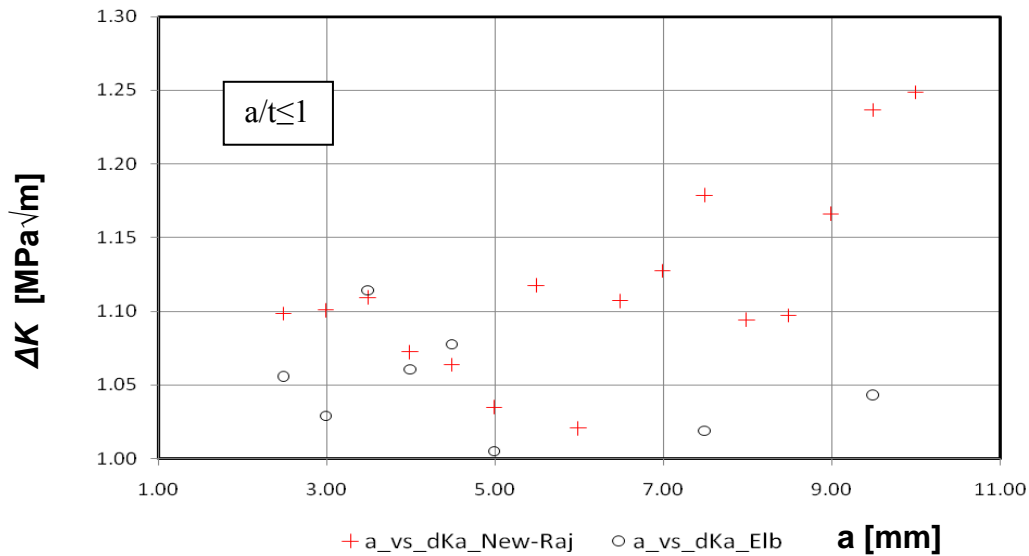


Figura 5.52– a vs, $\Delta K_I(a)$, por Newman-Raju e Experimental ajustados a Elber, C2D-13, $a/t \leq 1$

A Figura 5.53 mostra os valores obtidos do comprimento c versus $\Delta K_I(c)$ usando as expressões de Newman-Raju e comparando os mesmos parâmetros usando as propriedades a fadiga do policarbonato, ajustados a Regra de Elber, $a/t \leq 1$.

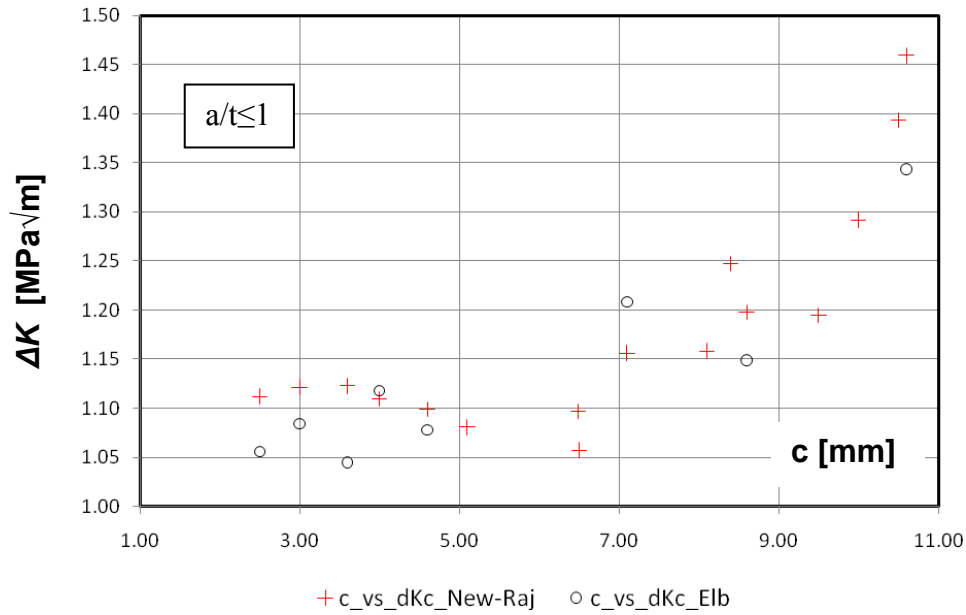


Figura 5.53 – c vs $\Delta K_I(c)$, por Newman-Raju e Experimental ajustados a Elber, C2D-13, $a/t \leq 1$

A Figura 5.54 mostra os valores obtidos do comprimento c versus $K_I(c)$ e c' versus $\Delta K_I(c')$ usando as expressões de Newman-Raju e comparando os mesmos parâmetros usando as propriedades a fadiga do policarbonato, ajustados a regra de Elber, $a/t > 1$. Na realidade são os valores reais que controlam a transição já que não existem expressões para reproduzir isso.

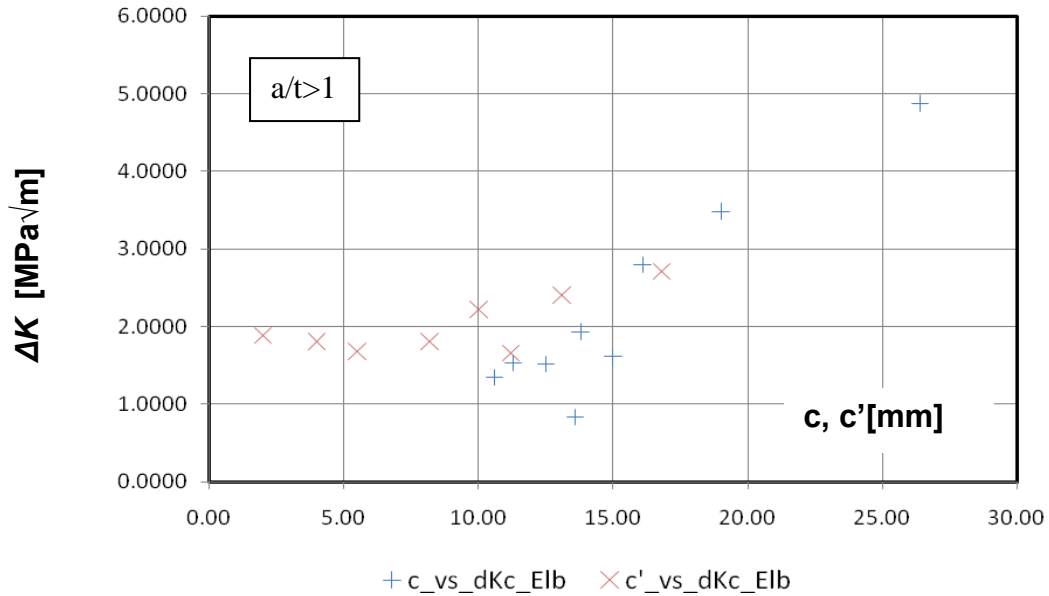


Figura 5.54 – c vs. $\Delta K_I(c)$, c' vs. $\Delta K_I(c')$, Experimental ajustados a Elber, C2D-13, $a/t > 1$

A comparação da Figura 5.54 mostra os $\Delta K_I(c)$ e $\Delta K_I(a)$ calculados por Newman-Raju versus os Experimentais ajustados com a regra de Elber.

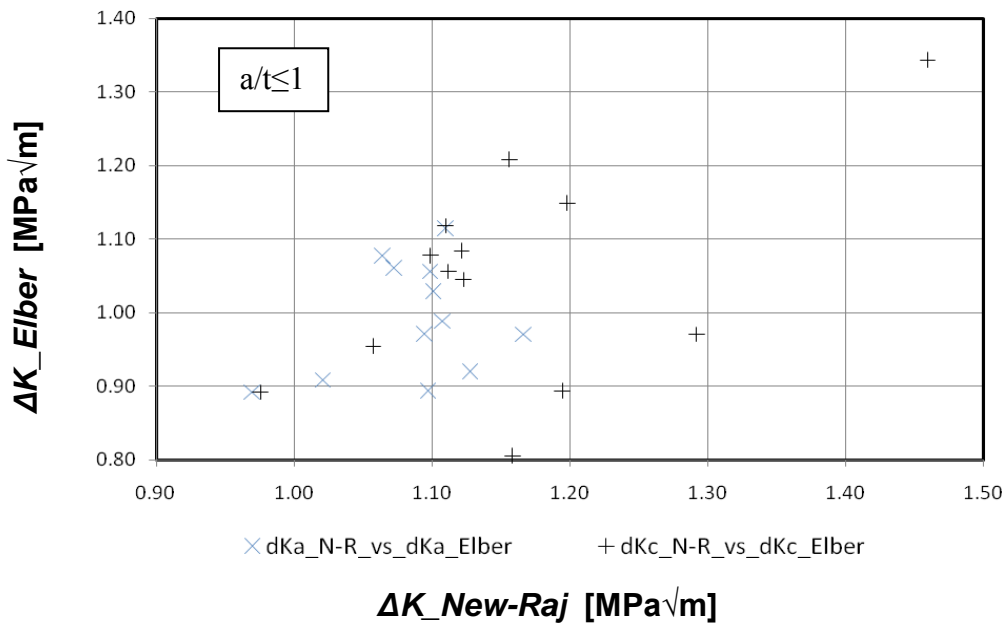


Figura 5.55– $K_I(a)$ e $K_I(c)$ dados experimentais vs calculados, C2D-13, $a/t \leq 1$

As próximas figuras, Figura 5.56 e 5.57, são de muita importância já que reproduzem os valores obtidos experimentalmente para o fator de intensidade normalizado, que também pode ser mostrado como o fator de forma, Equação 5.1, que para nosso caso esta em função das taxas a/t e c/w da propagação bidimensional, ou seja, analisaremos o fator $f(a/t, c/w)$ usando tanto as expressões de Newman-Raju quanto os valores obtidos experimentalmente ajustados a Elber e compararemos com os comprimentos a e c , para $a/t \leq 1$. Essa comparação foi também feita para o Primeiro Caso, fratura frágil, CP-12.

Para conhecer os fatores de intensidade de tensão tanto para c' quanto para a e c podemos usar o fator de forma experimental para c' e usando as equações de fator de intensidade de tensões em modo I temos:

$$f(g) = \frac{K_I(c')}{\sigma \sqrt{\pi c'}} \quad (5.1)$$

Também

$$\left[\frac{dc' dN}{A} \right]^{1/m} = \Delta K = (1-R) \sigma_{\max} \sqrt{\pi c'} f(g) \quad (5.2)$$

Isolando $f(g)$

$$f(g) = \frac{\left[\frac{dc' dN}{A} \right]^{1/m}}{(1-R) \sigma_{\max} \sqrt{\pi c'}} \quad (5.3)$$

O fator f das expressões de Newman-Raju para trinca bidimensional será

$$K_I(a) = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot F \cdot \frac{M}{\sqrt{Q}} \cdot G_a, \quad f_a(a/t, c/w) = F \cdot \frac{M}{\sqrt{Q}} \cdot G_a \quad (5.4)$$

$$K_I(c) = \sigma \sqrt{\pi c} \cdot F \cdot \frac{M}{\sqrt{Q}} \cdot G_c \cdot \frac{a}{c}, \quad f_c(a/t, c/w) = F \cdot \frac{M}{\sqrt{Q}} \cdot G_c \cdot \frac{a}{c} \quad (5.5)$$

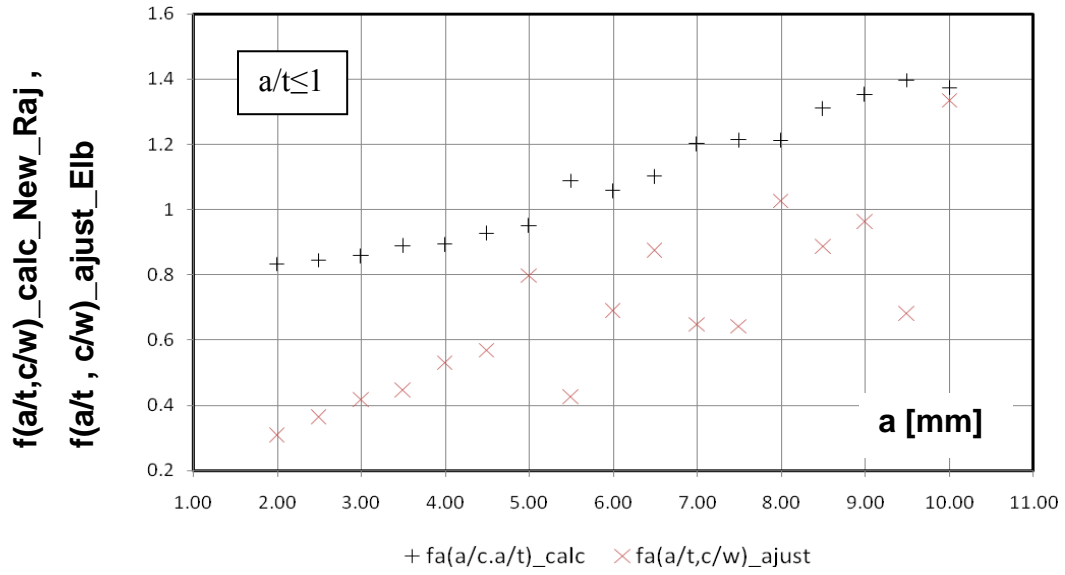


Figura 5.56– $f(a/t, c/w)$ dados experimentais vs calculados, C2D-13, $a/t \leq 1$
 a vs $f(a/t, c/w)_{\text{calc_New_Raj}}$ vs. $f(a/t, c/w)_{\text{ajust_Elber}}$

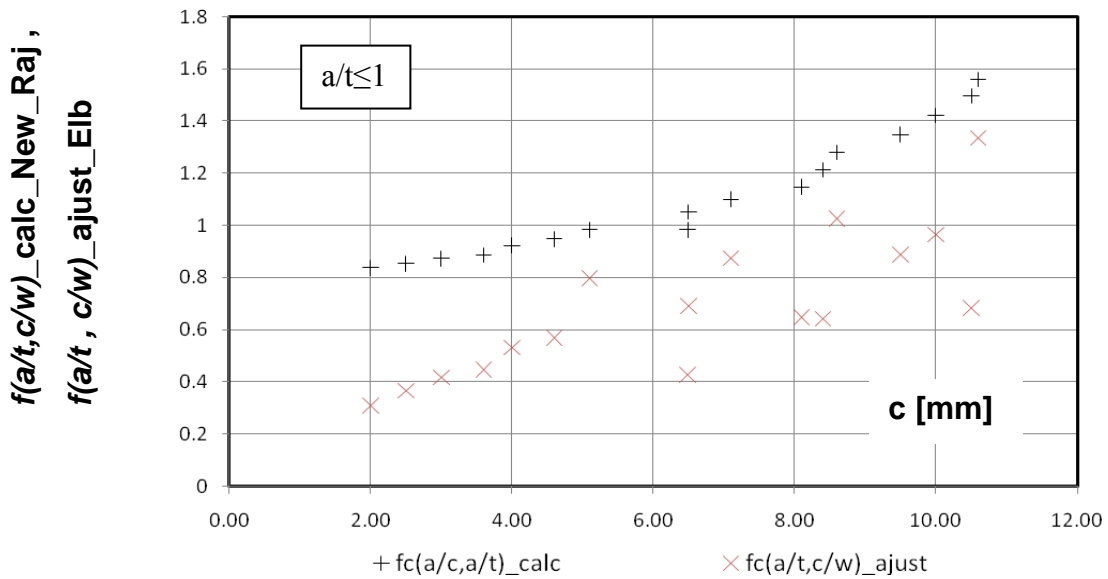


Figura 5.57– $f(a/t, c/w)$ dados experimentais vs calculados, C2D-13, $a/t \leq 1$
 c vs $f(a/t, c/w)_{\text{calc_New_Raj}}$ vs. $f(a/t, c/w)_{\text{ajust_Elber}}$

Já que não existe uma expressão analítica que reproduza nosso fator de forma na transição 2D-1D obtivemos diretamente o fator de forma experimental usando a mesma metodologia explicada na forma reversa. Explicar que quando $c=10$ mm o fc_{Elb} equivale 1.334 e no mesmo instante da transição $c'=2$ mm com um fc'_{Elb} igual a 1.875, assim deve- se interpretar o gráfico 5.58 mostrado embaixo.

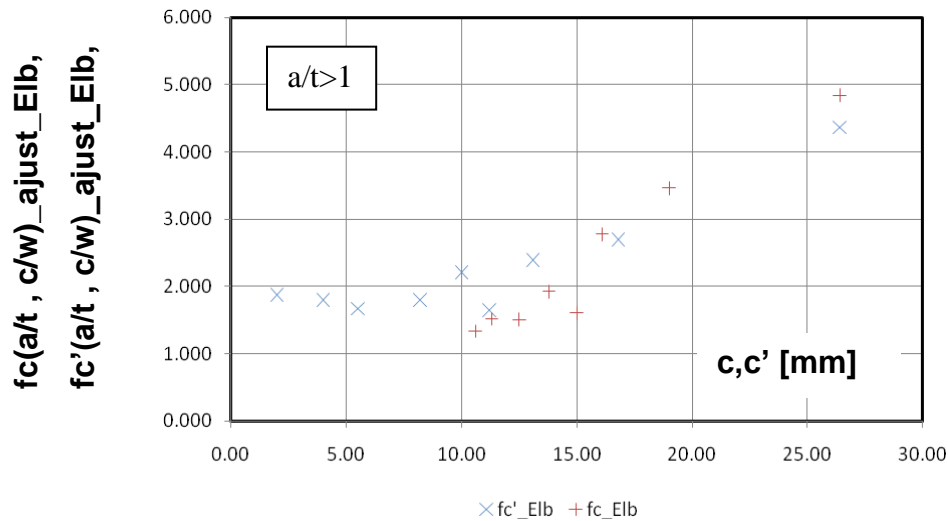


Figura 5.58– $f(a/t, c/w)$ dados experimentais vs calculados, C2D-13, $a/t > 1$
 c e c' vs. $f(a/t, c/w)_{ajust_Elber}$

c [mm]	fc	c' [mm]	fc'
10.60	1.33	2.00	1.875
11.30	1.52	4.00	1.796
12.50	1.51	5.50	1.667
13.60	0.83	8.20	1.796
13.80	1.92	10.00	2.207
15.00	1.60	11.20	1.648
16.10	2.78	13.10	2.390
19.00	3.46	16.80	2.694
26.40	4.84	26.40	4.362

Tabela 5.3- Valores experimentais do fator de forma na transição 2D-1D, C2D-13

A Figura 5.59 mostra um processo inverso, encontrando quais seriam os valores de da/dN e dc/dN tanto para valores ΔK -exp usando as propriedades de fadiga do material quanto para os valores de ΔK -calc usando os resultados das expressões analíticas para $a/t \leq 1$. Podemos conferir que os fatores de intensidade de tensão são bastante aproximados à propriedade a fadiga do material.

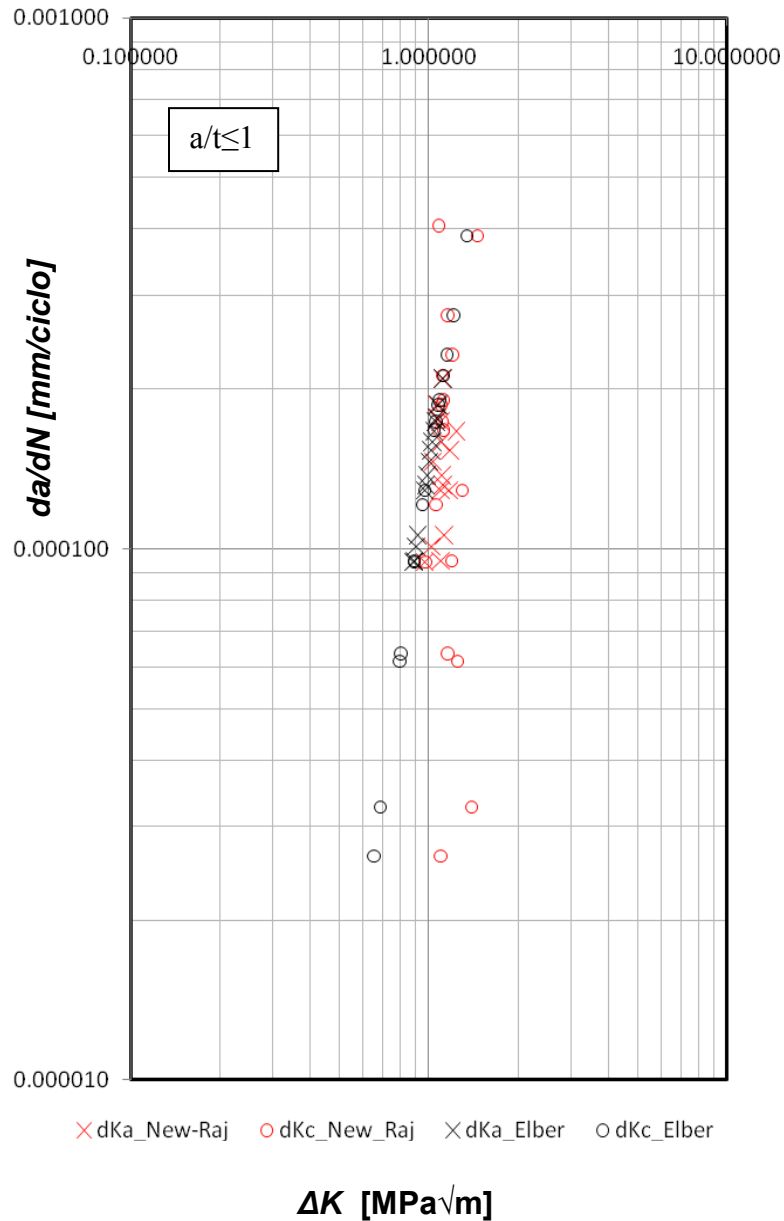


Figura 5.59– Comparação dos ΔK_{exp} e ΔK_{cal} com dados da/dN_{exp} e da/dN_{Elber} usando propriedade a fadiga do policarbonato

5.4 Fractografia da Propagação 2D e Transição 2D-1D

Mostra-se na Figura 5.59 o aspecto da propagação, apesar de ter colocado um defeito linear no corpo de prova retangular, a forma quarto - elíptica vai se consolidando em cada ciclo de carga. Depois de alguns ciclos a geometria da frente da trinca e totalmente quarto - elíptica. Ao mesmo tempo verifica-se através dos dados experimentais, Figura 5.40, que o crescimento nos semi- eixos a e c são quase iguais para valores $a/t < 1$. Já na etapa de transição o formato das deformações das seguintes quarto - elipses começam a mudar com a mudança da geometria ao final do semi-eixo a , onde a taxa de propagação dc'/dN no semi-eixo c' começa a se aumentar até um nível maior que a taxa no semi - eixo c . Perceba-se também na figura dois tipos de deformações quarto - elípticas umas menos marcadas que outras. As mais marcadas representam cada instante onde para cada deslocamento no semi-eixo a de 0.5 mm (500 μ m) se abaixa o carregamento.

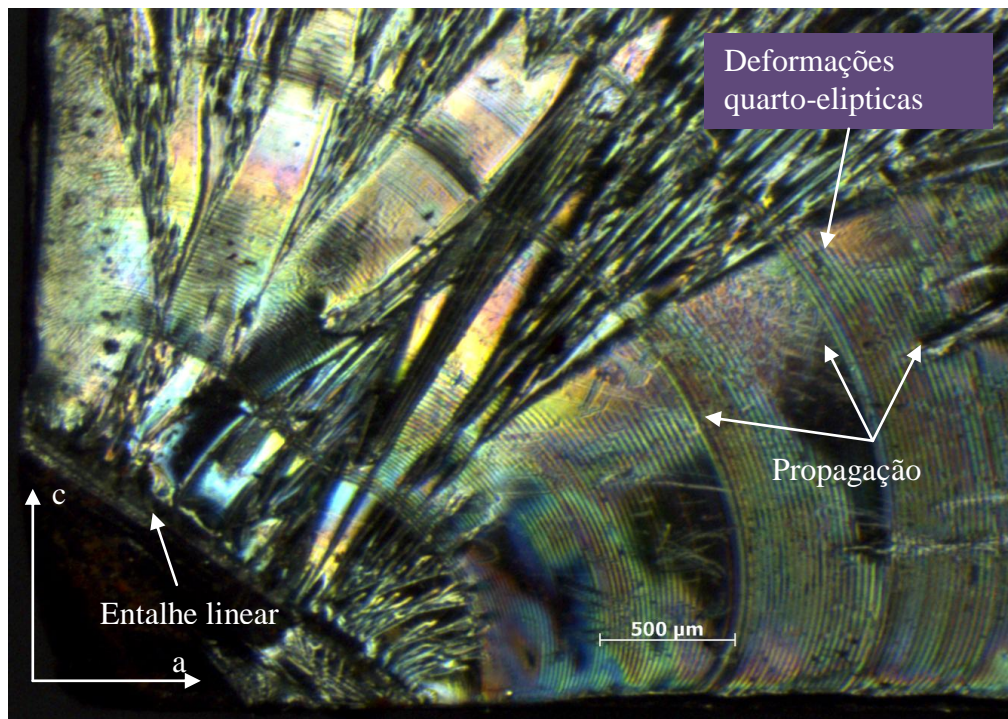


Figura 5.60 – Início da propagação bidimensional para um entalhe linear, fractografia, C2D-13 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

Deve-se lembrar que a frente das trincas encontra-se sob deformação plana na profundidade do corpo de prova e tensão plana nas laterais é devido a isso há uma mudança da geometria ao final das frentes das quarto – elipses. Elas vão se - fechando formando um ângulo com as superfícies laterais, Figura 5.61.

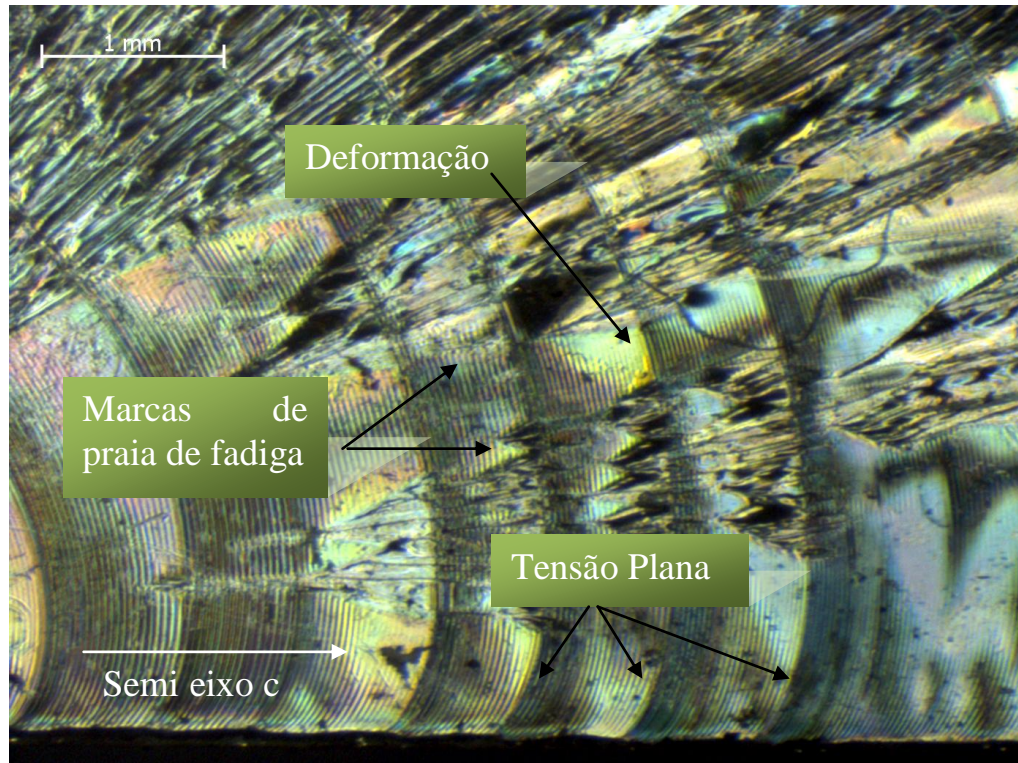


Figura 5.61 – Fechamento sob tensão plana nas faces laterais e deformação plana na profundidade, C2D-13 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

A Figura 5.62 mostra varias microfotografias com deformações compreendidas entre $\approx 5\mu\text{m}$ e $\approx 500\mu\text{m}$ que foram tomadas da fractografia com um microscópio ótico, ampliação 5X, se mostra também a direção que a propagação vai percorrendo ao longo do comprimento w . Elas foram tomadas com o intuito de observar realmente o histórico de propagação através das diferentes formas das frentes da trinca que são representadas por deformações ou marcas de praia por fadiga as quais a sua vez tem variados comprimentos de deformação. Dentro das marcas de praia existem as chamadas estrias de fadiga as quais apresentam dimensões microscópicas, cada estria é considerada representar a distancia de avanço de uma frente de trinca durante um único ciclo de carregamento. A

largura entre estrias está em função da faixa de tensões. Poderíamos conseguir ver praticamente cada ciclo através de um microscópio eletrônico (MEV). A Figura 5.62.a é uma fotografia após da iniciação da trinca. As marcas de fadiga tem uma forma quarto-elíptico quase quarto-circular muito simétrica onde é determinada claramente a propagação bidimensional ($a/t \leq 1$) a ordem de grandeza é de $\approx 10\mu\text{m}$, se percebe visivelmente o mecanismo de propagação de trinca de fadiga através de um processo repetitivo de abaulamento e afilamento plástico da extremidade da trinca. Posteriormente, Figura 5.62.b, a trinca 2D muda levemente o sentido da direção de propagação, percebe-se as linhas de fadiga mais marcadas as quais diferenciam o lugar onde o carregamento foi mudado, lembremos que para fazer os ensaios dos C2D se teve que diminuir aproximadamente um 10% o carregamento por cada 0.5mm de propagação no semi-eixo a para controlar os fatores de intensidade de tensões $K_I(a)$ e $K_I(c)$ diminuindo assim o valor da sua intensidade. Esta diminuição proporcional foi feita ate atingir o valor $a=t$ (10mm), depois a trinca bidimensional foi crescendo de forma natural para estudar o comportamento da transição. Na Figura 5.62.c as marcas de fadiga alcançam o extremo do semi-eixo c' , estas deformações mostram a transição da trinca bidimensional para unidimensional, para $a/t > 1$. Já na Figura 5.62.d o comprimento das deformações vai aumentando devido a que o $K_I(c)$ tem um valor muito alto, as tensões na ponta da trinca são muito altas. Ao mesmo tempo a Figura 5.62.e. mostra que o tamanho das deformações e muito maior comparado com as anteriores ($> 100\mu\text{m}$), nesta figura se mostra a face lateral do corpo de prova, as tensões são tão elevadas que o material superficial é atraído na direção do centro da peça.

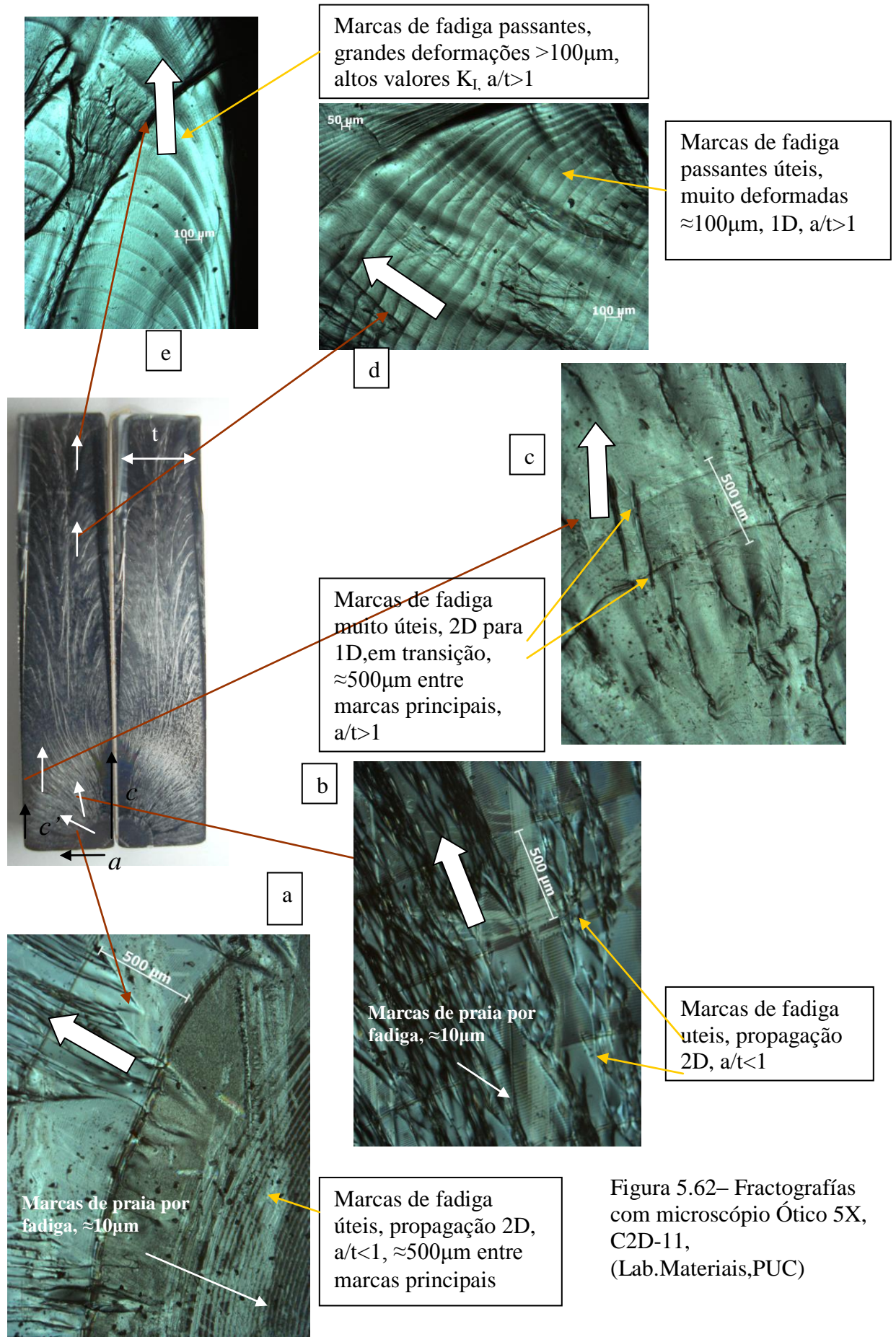


Figura 5.62– Fractografias com microscópio Ótico 5X, C2D-11, (Lab.Materiais,PUC)

5.4.1 Zona Plástica Epsilon

O policarbonato exibe uma considerável zona plástica na ponta da trinca quando ela é submetida ao carregamento cíclico por fadiga, Figura 5.63. Ela aparece na maioria das vezes mais não sempre. Depende das condições de tensão atuantes ao longo da propagação. Também é apreciada em corpos de prova sem entalhe, Takemori (1981) menciona que ditas zonas plásticas, mais conhecidas como *épsilon* devido à sua forma parecida com a letra grega ϵ , aparecem quando estiverem em posições localizadas, sendo que localizado significa uma pequena trinca a qual se inicia em superfícies com rachaduras dentro de corpos de prova sem entalhe. A zona plástica apresenta como característica principal um par de afiadas faixas de cisalhamento mostradas na Figura 5.63.

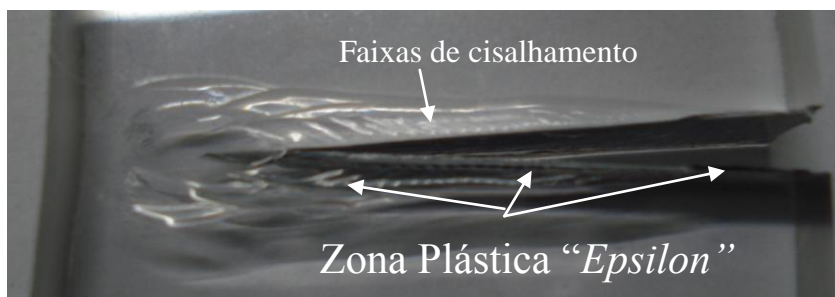


Figura 5.63 – Zona plástica *épsilon* no CP2-01 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

Pode-se apreciar alta concentração de tensões na ponta da trinca da Figura 5.64, esta fotografia foi tomada usando técnicas de fotoelasticidade com o intuito de perceber o campo de tensões atuantes tanto na zona plástica *épsilon* deformada quanto a frente da trinca que pode-se perceber internamente dentro da barra.

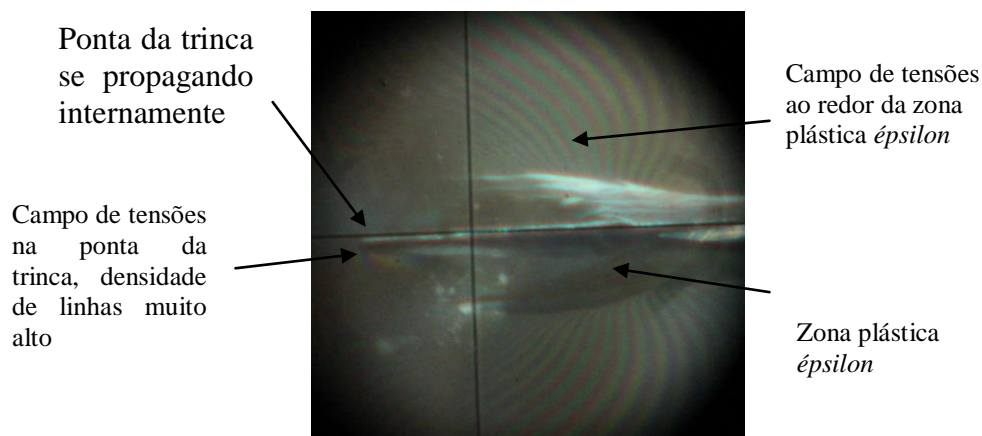


Figura 5.64 – Campo de tensões atuantes na zona plástica *épsilon* no CP2-01 usando técnicas de fotoelasticidade. (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

5.4.2 Problemas Encontrados na Experimentação dos C2D

A grande maioria dos problemas encontrados nos testes se refere a trincas inesperadas que surgiram devido ao carregamento cíclico. Tanto a Figura 5.65.a quanto 5.65.b mostram corpos de prova que não foram polidos devidamente apresentando vários defeitos que gerarem concentrações de tensões ao longo das faces laterais. A Figura 5.65.c mostra em um extremo o entalhe linear para propagação bidimensional e na face oposta uma trinca quarto - elíptica se propagando. A figura 5.65.d. mostra a falha por fadiga no extremo sujeito à garra superior, note-se neste caso uma trinca bidimensional inesperada começa a se desenvolver até fraturar o corpo de prova fragilmente.

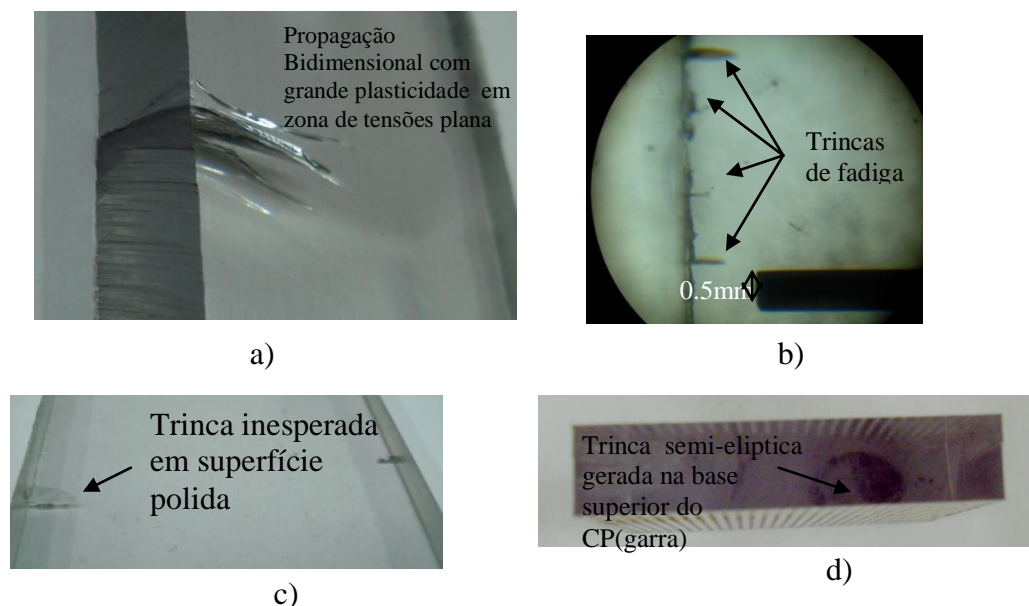


Figura 5.65 – Problemas inesperados na experimentação. a,b,c – Trincas geradas por defeitos que causam concentração de tensões d) Trinca bidimensional na área de sujeição à garra, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

5.5 Ensaio de Tração

Os resultados de ensaio de tração são mostrados nas Figuras 5.66 e 5.67. O policarbonato é um polímero que se comporta de maneira semelhante àquela encontrado para muitos materiais metálicos; a deformação inicial é elástica, a qual é seguida por escoamento e por uma região de deformação plástica. O limite de escoamento é tomado como sendo um valor máximo na curva, o que ocorre imediatamente após o término da região elástica linear; a tensão nesse ponto máximo é o limite de escoamento. Além do mais, o limite de resistência a tração corresponde ao nível de tensão no qual a fratura ocorre. Um fenômeno que precede com frequência a fratura de os materiais termoplásticos é o fendilhamento ou formação de pequenos vazios interligados. Os resultados obtidos são módulo de Young de 2.2 GPa, limite de tensão ao escoamento 80MPa, limite de tensão a tração 70MPa.

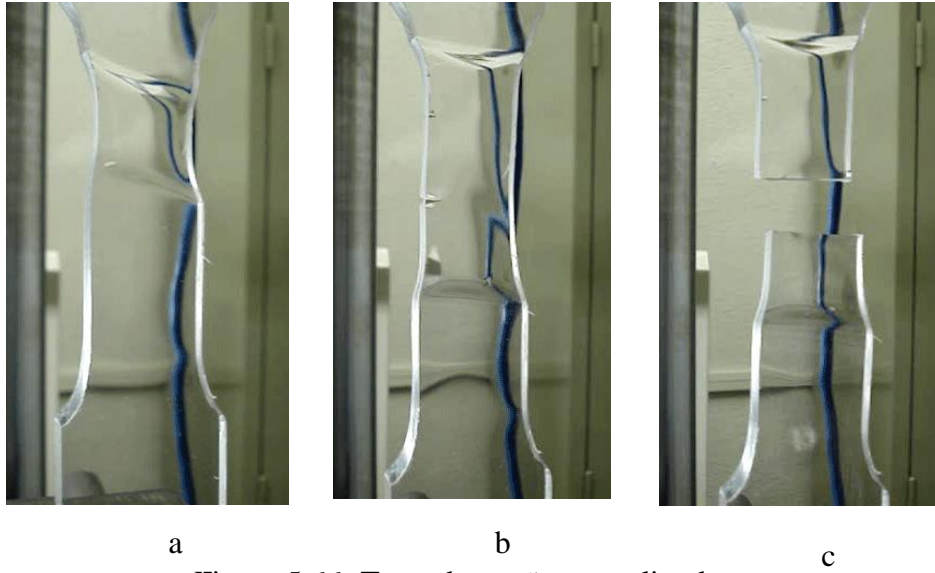


Figura 5.66- Teste de tração em policarbonato

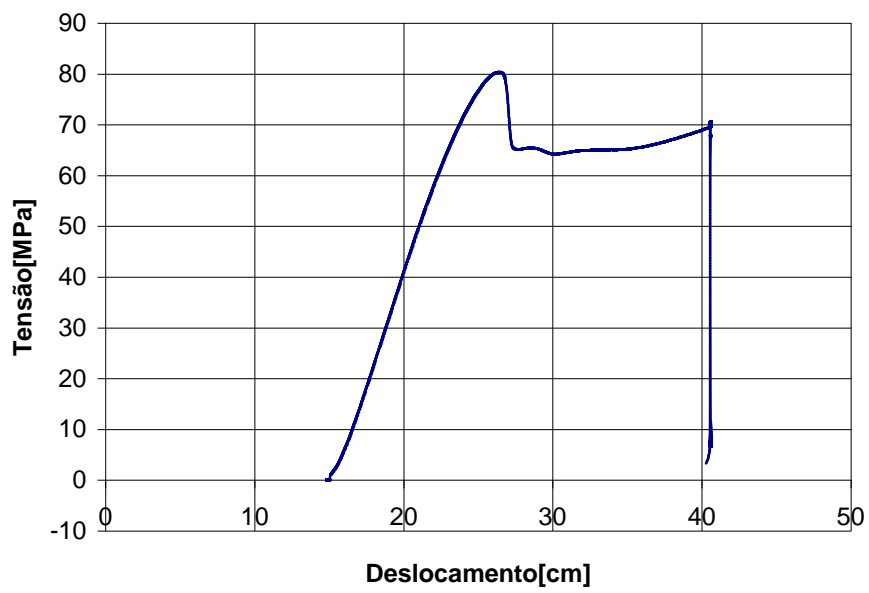


Figura 5.67- Teste de tração em policarbonato

6 Avaliação e Comparação dos Resultados com um Modelo Numérico

6.1. Introdução

Na Figura 6.1 se mostra um mosaico de 45 fotos tomadas com uma lente 5x (aumento de 50 vezes) no corpo de prova C2D-11. Foi feito o seguimento das marcas de praia principais de fadiga mostradas no capítulo 5 com o intuito de conhecer realmente como a transição da trinca bidimensional para unidimensional acontece. Perceba-se que para $a/t < 1$ a propagação é muito simétrica nos semi – eixos a e c , a taxa c/a aumenta vertiginosamente depois de $a=7$ mm as quarto – elipses são mais alongadas no semi – eixo c . Depois, para $a/t > 1$, na transição de trinca bidimensional para unidimensional, as linhas que chegam ao campo q propagam com uma taxa menor dc/dN enquanto a taxa dc'/dN controlado por $\Delta K_I(c')$ avança comprimentos maiores no mesmo numero de ciclos. Observe-se que o comprimento do campo de linhas de fadiga p percorrido pelas taxas de propagação dc'/dN são aproximadamente três vezes maior que o comprimento total percorrido por o campo de linhas de fadiga q percorrido por as taxa dc/dN .

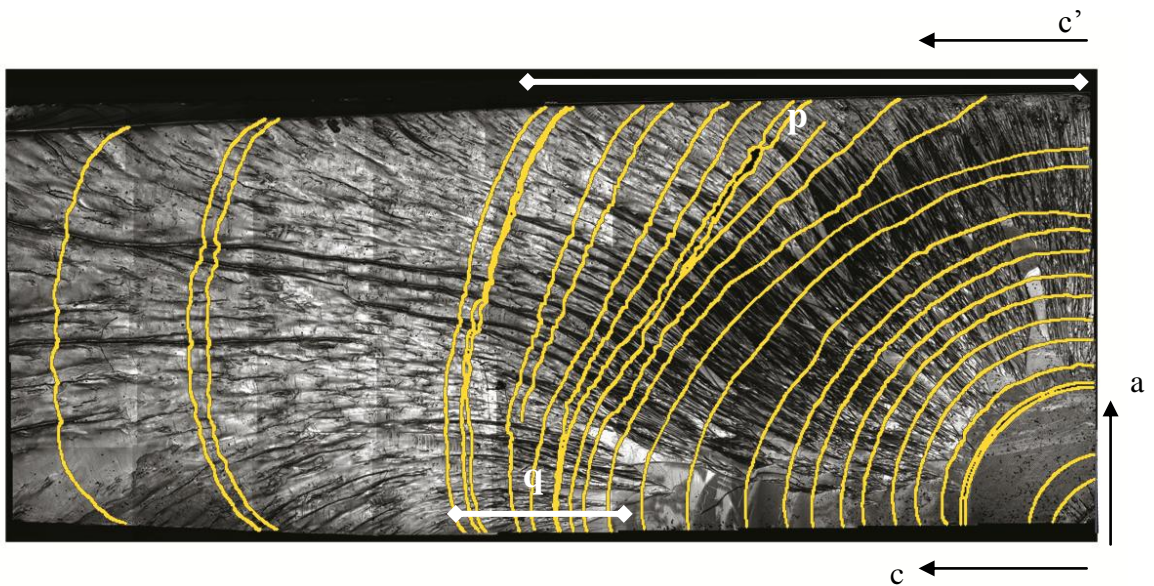


Figura 6.1– Mosaico de 45 fotografias, Transição trinca Bidimensional para Unidimensional, C2D-11, Lab. Materiais PUC-Rio

Observem-se no semi-eixo c os lugares onde a propagação é muito pequena, quer dizer nestes lugares aparentemente a taxa dc/dN é pequena enquanto dc'/dN aproveita de crescer mudando mais rapidamente na outra frente, no semi-eixo c' .

Esse tipo de aumento rápido de dc'/dN pode produzir instabilidade e até iniciar a fratura rápida.

6.2. Software para Simulação

Fatores de intensidade de tensão para trincas em corpos tridimensionais são muito difíceis de obter analiticamente, vários métodos numéricos são usados para determinar K . O método dos elementos finitos (FEM), método de elementos de contorno (BEM) e da função do peso são amplamente utilizados. O software FRANC3D desenvolvido pela Universidade de Cornell é usado no presente trabalho através da análise de elementos finitos para encontrar resultados dos diferentes fatores de intensidade de tensões ao longo da frente da trinca, desejamos avaliar diferentes estágios da propagação tanto para valores $a/t \leq 1$ quanto para $a/t > 1$ onde a transição de trinca bidimensional para unidimensional acontece, como foi mostrado nos exemplos do Capítulo 3.

O objetivo desta análise é conhecer como os valores dos fatores de intensidade de tensão $\Delta K_I(a)$, $\Delta K_I(c)$ e $\Delta K_I(c')$ mudam e principalmente comparar com os valores experimentais, sendo que $\Delta K_I(c')$ aumenta seu valor na transição da trinca bidimensional para unidimensional.

Efeitos ambientais e micro estruturais podem também ser significativos nestes avaliações dos fatores de intensidade, mas são consideradas parte da dispersão experimental, e não são considerados diretamente. Os testes foram projetados de tal forma que só o modo I de carga fosse aplicado, resultando em um crescimento de trinca planar. Porém o FRANC3D pode calcular automaticamente fatores em modo II e III, K_{II} e K_{III} respectivamente.

6.3. Modelagem Numérico da Transição Bidimensional para Unidimensional

O cálculo de fatores de intensidade de tensão $K_I(a), K_I(c)$ são conhecidos na literatura através de expressões analíticas para trincas de canto para $a/t \leq 1$. Como foi mencionado no Capítulo 3 alguns autores como Newman & Raju e Kobayashi mostram a validade da propagação mas com certos limitantes. Não entanto as expressões geradas por Castro & Meggiolaro ajudam a conhecer valores $K_I(a')$ tanto para o comprimento imaginário em a' quanto para $K_I(c)$ para $a/t > 1$ mas não para o $K_I(c')$. Tendo estas limitações de expressões e já que nosso objetivo é conhecer $K_I(c')$ que modifica seu valor na transição bidimensional para unidimensional, usamos o FRANC3D. Com o critério da profundidade imaginária a' usamos os valores experimentais de c, c' e a para inserir diferentes tamanhos de trincas quarto - elípticas dentro de um modelo virtual com geometria igual ao dos corpos de prova C2D. Também são usadas as propriedades mecânicas do policarbonato, carregamento e restrições

Uma vez desenhado o modelo e malha com ajuda do pré-processador ABAQUS 6.9.3 ele é exportado ao FRANC3D, Figura 6.2, onde se insere uma trinca com uma determinada geometria, uma vez inserida a trinca, se procede a refazer uma nova malha de elementos finitos (FE) através de elementos de contorno. Finalmente são computados os fatores de intensidade de tensão ao longo da trinca. Para melhorar a visualização e manipulação de dados a informação gerada pelo FRANC3D pode ser mais uma vez exportada ao ABAQUS.

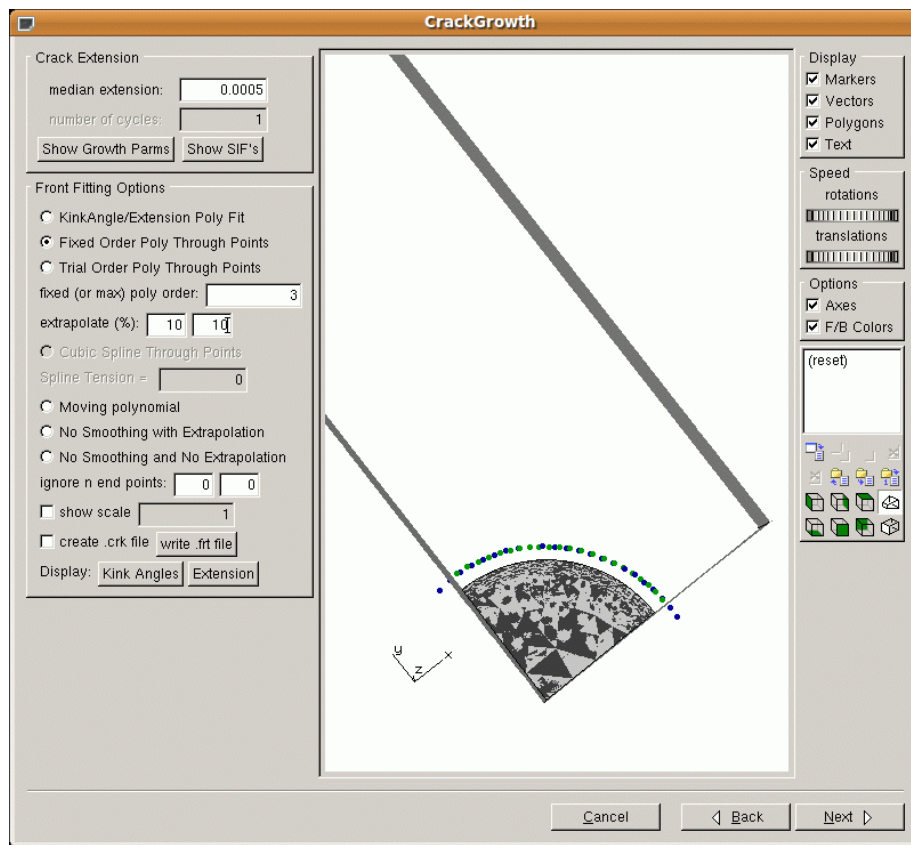


Figura 6.2– Ambiente FRANC3D para modelagem de trincas, Cornell University

A Figura 6.3 mostra a inserção da trinca virtual no FRANC3D com ajuda dos valores experimentais de comprimento c , a , c' , para trincas $a/t > 1$ foi usada uma profundidade imaginária a' a qual possibilita gerar uma interseção na face traseira do modelo simulando o comprimento c' , e, de esta maneira, calcular o fator de intensidade predominante $K_I(c')$ que controla esse ponto.

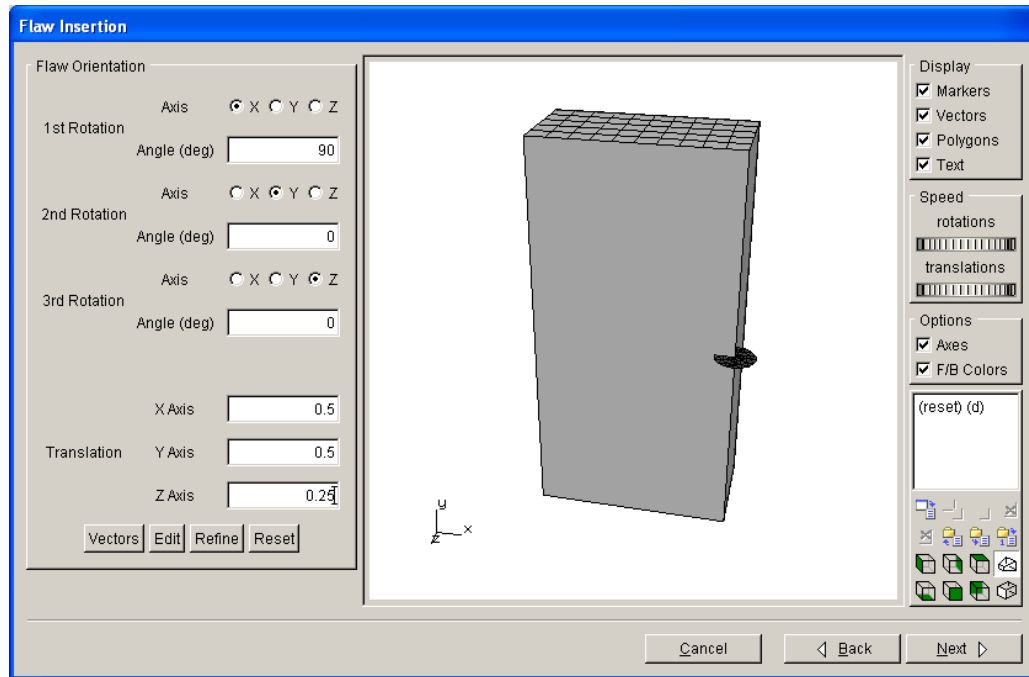
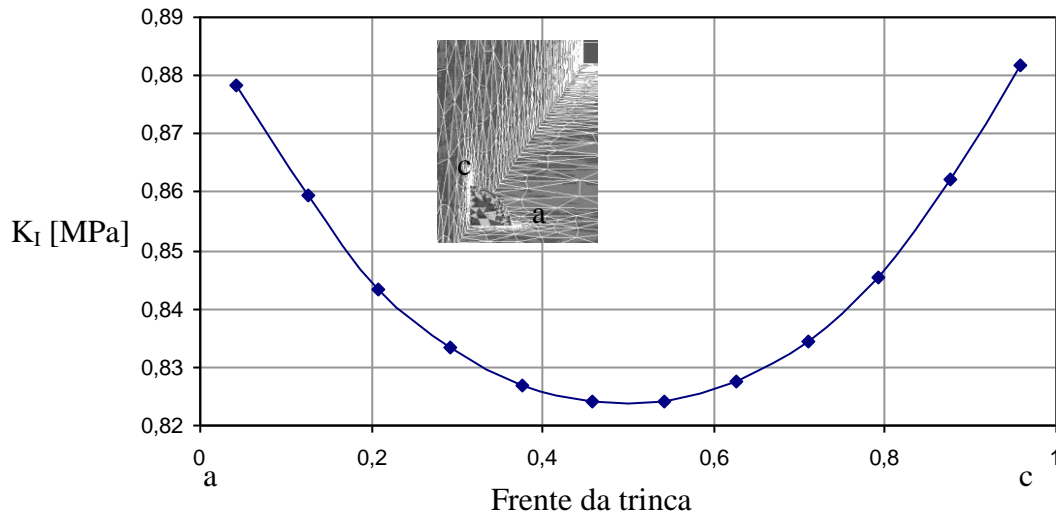


Figura 6.3– Inserção de trinca num modelo com uso do FRANC3D
(Gentileza Universidade de Cornell)

A Figura 6.4 mostra o início da propagação da trinca depois de a trinca ter alcançado um comprimento em $a = 2.49$ mm e $c = 2.5$ mm. Deve-se lembrar que os dados foram tomadas cada 0.5 mm. Os fatores nos extremos da curva mostram $\Delta K_I(a)$ na origem dos eixos e $\Delta K_I(c')$ ao final. Os valores entre 0 e 1 mostram uma diminuição do valor do K_I nos extremos da trinca até chegar um mínimo para depois subir de valor uma outra vez.



. Figura 6.4– Fator de intensidade de tensões ao longo da frente da trinca bidimensional, C2D-13, $a=2.49\text{mm}$, $c=2.5\text{mm}$, usando FRANC3D

A figura 6.5 mostra a simulação da trinca bidimensional para o mesmo estágio, observa-se as deformações, na trinca esta ao redor de $6.79\text{E}-04$ mm, os valores máximos das tensões na frente da trinca segundo o critério de Von Mises estão ao redor de 56 MPa e se localiza num extremo onde o $K_I(c)$ é máximo. Observe-se a zona plástica ao redor das pontas da trinca com a típica forma de borboleta.

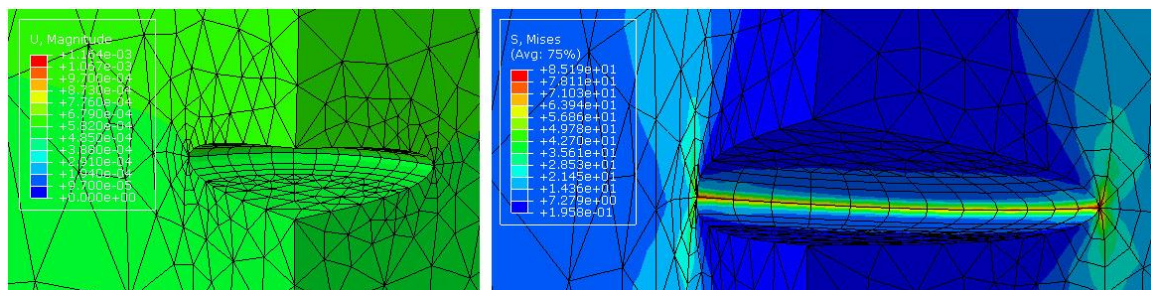


Figura 6.5– Deformações e Tensões de Mises ao redor da trinca bidimensional, C2D-13, $a=2.49\text{mm}$, $c=2.5\text{mm}$, $\sigma_{\max}=12.857$ MPa usando ABAQUS

A Figura 6.6 mostra a trinca bidimensional depois de ter alcançado um comprimento de $a=4.99\text{mm}$ e $c=5.1\text{mm}$, os K nos extremos da curva mostram que o $K_I(a)$ diminuiu de $0.878\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ para $0.79\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ enquanto $K_I(c)$ diminuiu de

0.883 MPa·m^{1/2} para 0.813 MPa·m^{1/2} devido a que houve uma diminuição do carregamento aplicado.

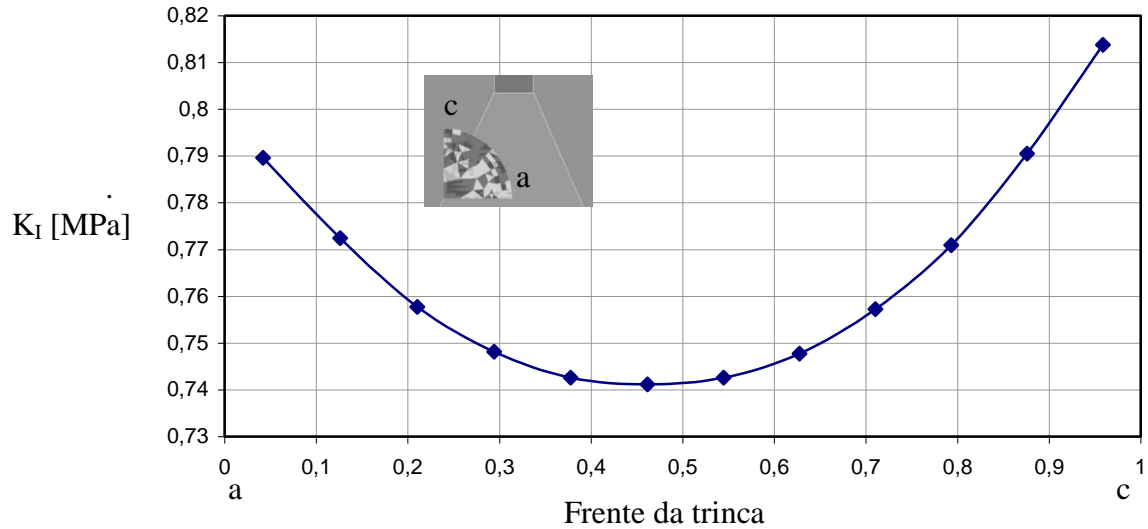


Figura 6.6– Fator de intensidade de tensões ao longo da frente da trinca ,C2D-13, a=4.99mm,c=5.1mm, $\sigma_{\max}= 7.592$ MPa, usando FRANC3D

A Figura 6.7 mostra a simulação da trinca bidimensional para o mesmo estágio, observa-se as deformações, na trinca esta ao redor de 4.653E-4 mm, os valores máximos das tensões na frente da trinca segundo o critério de Mises estão entre 37 MPa ao longo da frente da trinca e de 41 MPa nos extremos.

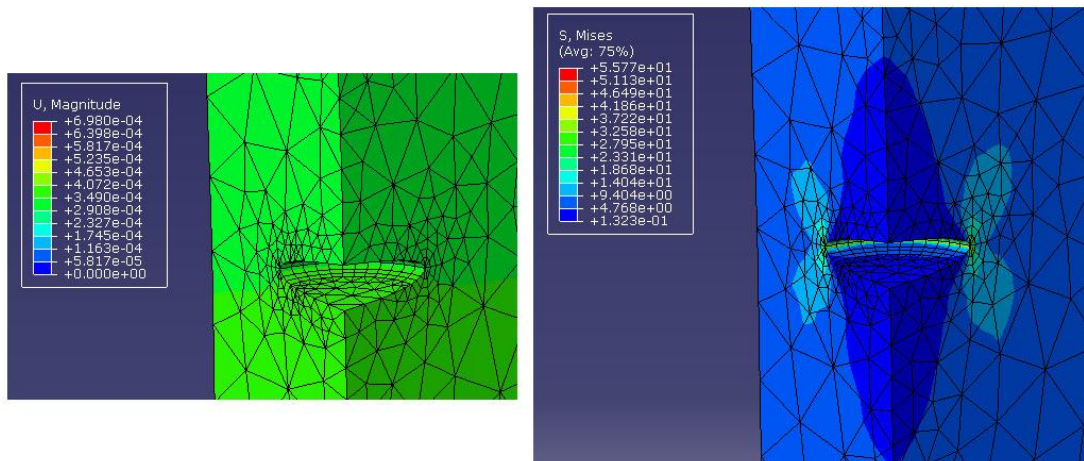


Figura 6.7– Deformações e Tensões de Mises ao redor da trinca bidimensional, C2D-13, a=4.99mm,c=5.1mm, $\sigma_{\max}= 7.592$ MPa, usando ABAQUS

A Figura 6.8 é o resultado substancial dos diferentes fatores de intensidade de tensão para os dados registrados experimentalmente na transição da trinca bidimensional para unidimensional, na figura também foi inserido o comportamento da trinca bidimensional em $a=10\text{mm}$, $c=10\text{mm}$ com a finalidade de comparar os subseqüentes estágios. $K_I(c') > K_I(c)$ durante a transição bidimensional para unidimensional, $\Delta K_I(c')$ ajuda a dc'/dN se incrementar mais rapidamente que dc/dN mudando rapidamente algumas micras em cada ciclo de carga.

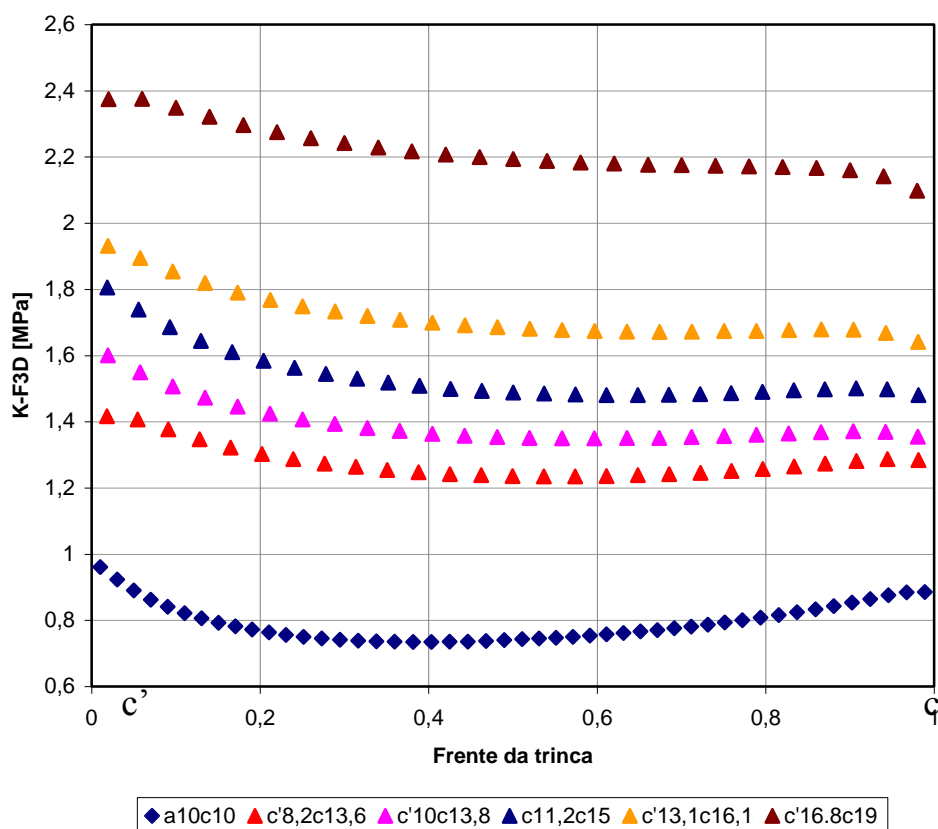


Figura 6.8– Fator de intensidade de tensões ao longo da frente da trinca na transição bidimensional para unidimensional, C2D-13, $\sigma_{\max} = 4.483 \text{ MPa}$, usando FRANC3D

A Figura 6.9 mostra o comportamento dos fatores $K_I(c)$, $K_I(a)$ e $K_I(c')$ segundo os valores obtidos com a modelagem versus os valores $K_I(c)$, $K_I(a)$ e $K_I(c')$ obtidos

experimentalmente. Note - se os valores de $K_I(a)$ e $K_I(c)$ são muito parecidos com $a/t < 1$ ($t = 10\text{mm}$). A partir desse ponto $K_I(c)$ diminui, porém e devido a que $K_I(c')$ começa a se propagar em $c'=0$ $K_I(c') > K_I(c)$. A partir daquele ponto a taxa dc'/dN começa a acelerar aumentando os deslocamentos no semi-eixo c' enquanto $K_I(c)$ aumenta pouco a pouco diminuindo seu avanço até que os dois extremos conseguem propagar com o mesmo K_I . O comportamento das curvas tanto da modelagem quanto a experimental não estão muito distantes, além do erro experimental e computacional podemos supor que o erro também se deve a que as trincas virtuais estão baseadas no conceito de profundidade imaginária a' . Também devemos considerar mesmo que estamos tomando como hipótese que as propriedades de fadiga do material servem totalmente para descrever a tanto a propagação bidimensional quanto a transição. A modelagem se aproxima bastante a realidade e ajuda a compreender a evolução dos fatores de intensidade de tensão que controlam a propagação 2D para 1D.

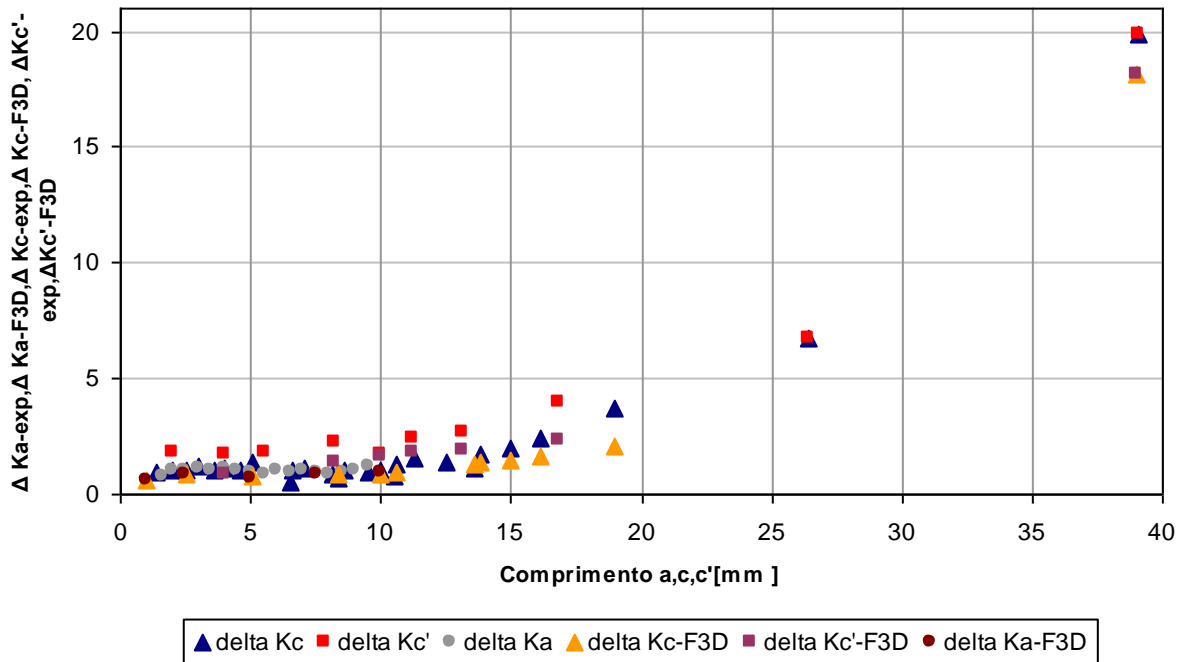


Figura 6.9– Fator de intensidade de tensões ao longo dos semi – eixos a, c e c' . Modelagem versus Experimental. Início, transição 2D para 1D, C2D-13

A Figura 6.10 mostra os dados obtidos da fractografia feita no corpo de prova C2D-13 para algumas marcas de praia, elas se ajustam perfeitamente a geometria mostrada no corpo de prova tanto no início da propagação bidimensional quanto ao longo da transição 2D para 1D, elas estão perfeitamente tabeladas e poderiam ser usadas como dados de entrada para calcular os fatores de intensidade de tensão das frentes da trinca num outro programa de simulação de trincas já que o FRANC3D não e capaz de gerar valores de fator de intensidade de tensão para trincas virtuais com tanta complexidade.

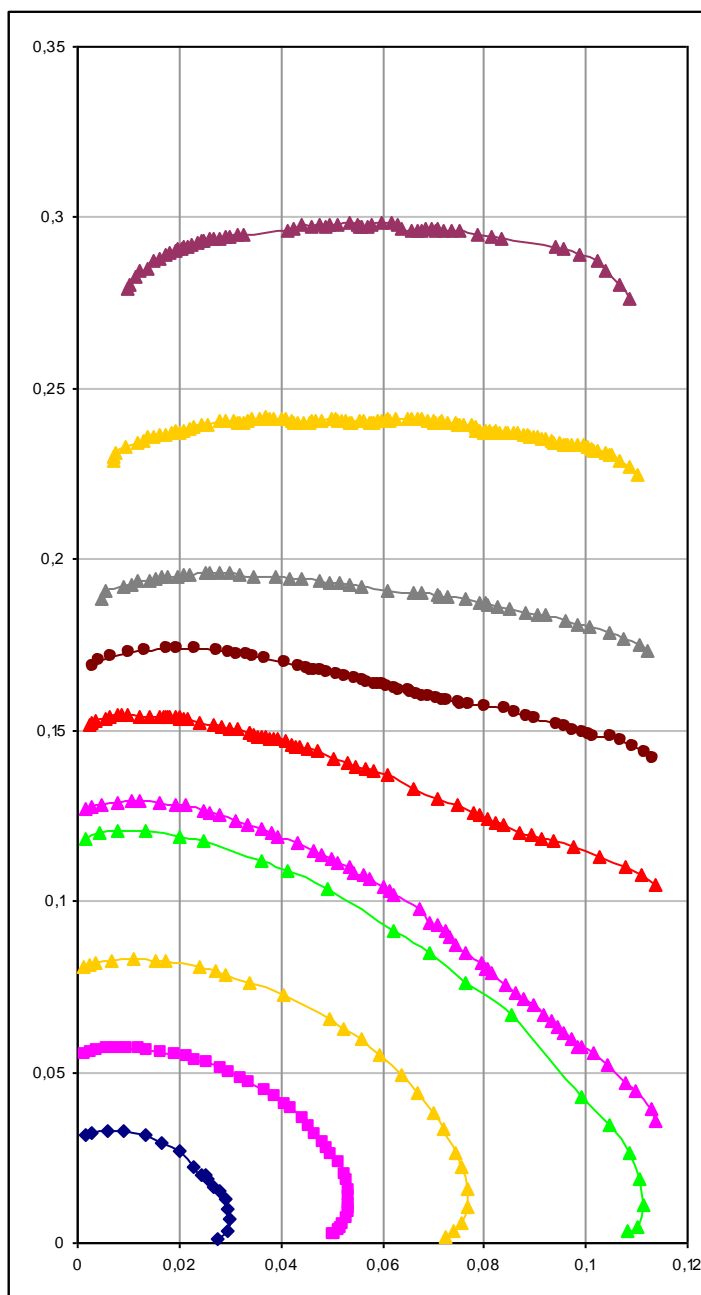


Figura 6.10– Dados tabelados baseados na fractografia do C2D-13

7 Conclusões e Sugestões

7.1. Conclusões

No presente trabalho se conseguiu a estudar o comportamento da transição de uma trinca bidimensional para unidimensional. Isso foi possível devido às propriedades mecânicas do policarbonato especialmente a tenacidade e transparência que permitem observar a transição 2D para 1D através de uma corpo de prova.

Os resultados dos ensaios C2(T) foram separados em três grupos ou casos, o Primeiro Caso devido a Fratura Frágil, o Segundo Caso devido à alta plasticidade e presença do mecanismo chamado *tunneling* e finalmente o Terceiro Caso que permitiu conhecer verdadeiramente a transição 2D-1D e os fatores de intensidade de tensão predominantes $\Delta K_I(a)$, $\Delta K_I(c)$, $\Delta K_I(c')$.

Trincas de fadiga cresceram em policarbonato sob condições de $\Delta K_I(a)$ variável para $a/t < 1$ com o intuito de diminuir os fatores de intensidade de tensão e com $\Delta K_I(c)$ constante no estagio de transição de bidimensional para unidimensional.

Foi encontrada a propriedade de fadiga do policarbonato e ajustados os resultados tanto a regra de Paris quanto Elber.

Foram encontrados os fatores de forma experimental (fatores de intensidade de tensão normalizado) para os corpos de prova CP-12, f_c e f_a ($a/t \leq 1$), ensaio que representa a Primeiro Caso da serie de treze ensaios. Também foram encontrados os fatores de forma experimental para o CP-13, ensaio que representa ao Terceiro Caso (Transição 2D-1D), f_a e f_c ($a/t \leq 1$), e f_c e f_c' ($a/t > 1$).

As trincas bidimensionais foram examinadas com três fontes de aquisição de dados: um microscópio X-Y e duas câmeras fotográficas de alta resolução para medir os comprimentos da trinca c , c' e a , que foram relacionados com o número de ciclos da carga aplicada. Encontraram-se expressões analíticas das taxas de propagação dc/dN , dc'/dN baseados nos dados experimentais.

A técnica desenvolvida para a aquisição de dados serviu para obter os valores de propagação da trinca.

Neste trabalho foram ensaiados a fadiga: vinte corpos de prova de *polimetilmetacrilato*, PMMA, tipo C(T), vinte e oito de policarbonato tipo C(T), quatro de policarbonato tipo M(T) com trinca semi-elíptica, três de PMMA tipo M(T) com trinca semi-elíptica, quatro de policarbonato tipo ESE(T), quinze de policarbonato tipo C2D(T) com trinca quarto - elíptica e defeito com geometria linear, três de policarbonato para um ensaio de tração.

Dos quinze corpos de prova C2D(T): sete conseguiram passar da transição do estagio bidimensional para unidimensional, em dois apareceram trincas por fadiga ao longo do corpo de prova (um deles foi re-usado), um trincou por fadiga na base do corpo de prova, cinco propagaram em forma bidimensional, contudo tiveram fratura frágil.

As expressões usadas para calculo de fator de intensidade de tensões $K_I(a)$ e $K_I(c)$ serviram para comparar resultados experimentais para $a/t < 1$. Como não se tem expressões analíticas para a zona de transição, se conseguiu calcular fatores de intensidade de tensão $K_I(c')$ segundo os resultados experimentais e assumindo que as constantes de propagação da regra formulada por Elber servem também para dita zona de transição.

As fotografias feitas com microscópio digital com um aumento de 50 vezes mostram as deformações produzidas nos C2D(T) a cada ciclo de carga, se observando assim as marcas de fadiga da transição bidimensional para unidimensional. As taxas dc'/dN eram maiores na região de transição do que dc/dN aumentando os deslocamentos no semi-eixo c' até que uma trinca unidimensional foi atingida.

Através da modelagem numérica, entendeu-se melhor como é o comportamento da trinca para diferentes estágios antes da transição durante a transição e depois da transição. Foi utilizado o método dos elementos finitos como ferramenta de simulação. O *software* FRANC3D foi utilizado para a criação do modelo, geração de malhas em cada passo da propagação, aplicação das condições de contorno, das propriedades dos materiais e do carregamento, e cálculo dos fatores de intensidade de tensão. Esse programa tem a opção de trabalhar com o programa ABAQUS, que analisa o modelo de elementos finitos.

7.2. Sugestões

Aproveitando que o policarbonato é um material fotoelástico, usamos filtros polarizadores para observar o campo de tensões tanto no corpo quanto ao redor da ponta da trinca. Poderia ser abordado o estudo dos campos de tensões ao redor da trinca com o uso da fotoelasticidade e fotoplasticidade tanto para comparar o campo de tensões elastoplástico que se encontra ao redor da ponta da trinca quanto à zona plástica propriamente dita. A fotoelasticidade fornece indicações dos pontos mais sobrecarregados, valores de tensões cisalhantes máximas, direções principais. Na Figura 7.1.a percebe-se as tensões residuais causadas pela ferramenta de corte no entalhe para os ESE(T), e a Figura 7.1.b. mostra um C2D(T) em seu quase estágio final de fratura. Esta informação poderia ser usada para futuros trabalhos onde se tentaria comparar os resultados de fator de intensidade de tensão na ponta da trinca com os obtidos neste trabalho.

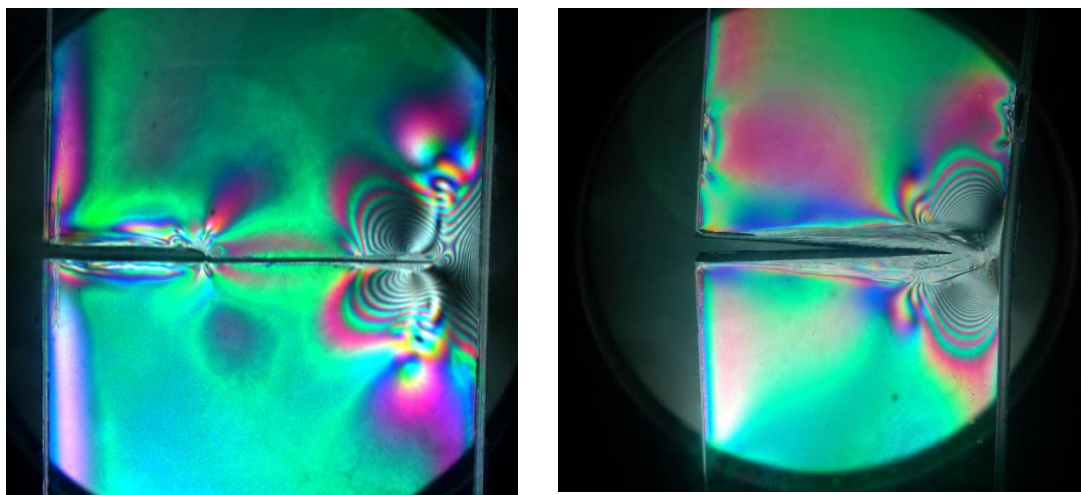


Figura 7.1 – Fotoelasticidade do policarbonato a)ESE(T) b)C2D(T)

(Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

Já que o policarbonato permite a visualização da trinca se efetuou um ensaio num corpo de prova tipo ESE(T) no qual foram aplicados três furos posicionados simetricamente. Miranda (2009) usou esta técnica num corpo de prova com um furo para observar como a trajetória linear da propagação muda de direção pelo efeito dos campos

de tensões residuais deixados no furo. Note-se na Figura 7.2 como inicialmente a trinca é atraída pelo primeiro furo mudando a trajetória e depois ela é atraída ao segundo furo, mudando nova a direção da trajetória da curva de propagação. Este tipo de ensaio pode ser aproveitado para simular junções de placas aparafusadas com placas de espessura menor, como, por exemplo, é usado na fuselagem dos aviões.

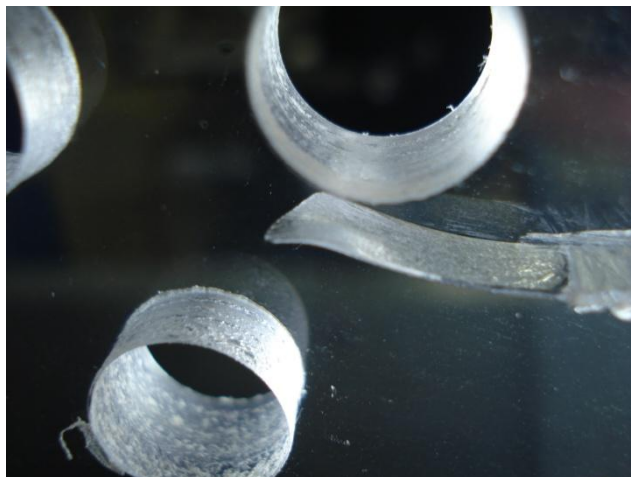


Figura 7.2 – Corpo de Prova com 3 furos tipo ESE(T),
Trajetória da propagação muda duas vezes de sentido
(Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

Referências Bibliográficas

ABAQUS–Theory Manual, version 6.9-3

Andersson, M., Persson., Melin,S . **Experimental and Numerical Investigation of Crack Closure Measurements with Electrical Potential Drop Technique**. International Journal of Fatigue 28, pp. 1059–1068. 2006.

Amorim, J. A. **Aplicação de Modelos Coesivos Intrínsecos na Simulação da Propagação Dinâmica de Fratura**”. Universidade Federal de Alagoas, 2007.

Bayley, J. **Parametric Investigation on the Coalescence of Coplanar Fatigue Crack**”, Master Thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Ottawa, Ontario, 1997.

Castro, J.T.P., Meggiolaro, M.A. **Fadiga sob Cargas Reais de Serviço**”. Vol II, 2009.

Chakrabarty, J. **Theory of Plasticity**”. Editorial Elsevier, 895 pp.

Fett, T., Forschungszentrum Karlsruhe. **Estimated Stress Intensity Factors for Semi-Elliptical Cracks in Front of Narrow Circular Notches**, Institut für Material forschung II, Postfach 3640, D-76021 Karlsruhe, Germany. 1999.

Figueiredo, L. **Análise de Tensões e Deformações em um Corpo de Prova ‘Compact Tension’** Experimentalmente por Extensometria e Teoricamente por MFLE.

FRANC3D–Tutorial and Verification Manual, version 5, 2009.

Hermida, É.B., Brandaleze, E. **Estudio de Tensiones Residuales en Policarbonato Sometido a Tracción Mediante Fotoelasticidad**. Buenos Aires, Argentina. pp 858-861. 2003.

Heyder, M, Kuhn, G. **3D Fatigue Crack Propagation: Experimental Studies**. International Journal of Fatigue 28. pp. 627–634. 2006.

Ihara, C., Tanaka,T. **Mode I Fatigue Crack-Propagation Mechanism Based on the Renewal Stochastic Damage-Accumulation Model**. Engineering Fracture Mechanics 74. pp. 1488–1498. 2007.

Ingraffea, A. R. , Wawrzynek, P. A., Riddell, W. T. **Experimental Observations and Numerical Predictions of Three-Dimensional Fatigue Crack Propagation**. Elsevier, Energy Fracture Mechanics Vol. 58, No. 4. pp. 293-310. 1997.

Jain, N., Rousseau, C.E., Shukla, A. **Crack-tip Stress Fields in Functionally Graded Materials with Linearly Varying Properties**. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 42, 2004. pp. 155-170.

Joo-Sung, K., Kang, J.Y., Song, J. **Elucidation of Fatigue Crack Closure Behavior in Surface Crack by 3-D Finite Element Analysis**. International Journal of Fatigue 29, pp 168–180. 2007.

Kobayashi, A. S., Enetanya, A. N. **Stress Intensity Factor of a Corner Crack**. American Society for testing and Materials, pp. 477-495, 1976.

Kroshwitz, J. I. **Polymers: An Encyclopedic Sourcebook of Engineering Properties**. John Wiley & Sons, Inc., Canada, pp.243-311. 1987.

Lawson, L., Chen, E.Y., Meshi, M. **Near-Threshold Fatigue: A Review**. International Journal of Fatigue 21, 1999. pp S15-S134.

Livieri, P., Tovo, R. **The Use of the JV Parameter in Welded Joints: Stress Analysis and Fatigue Assessment**. Elsevier, International Journal of Fatigue. pp. 153-163. 2009.

Manson, J. A. , Hertzberg, R. W. , Kim, S. L., Wu, C. **Fatigue Crack Propagation in Polycarbonate**. Lehigh University, Bethlehem, Pa. 6 pp.

Martins, M., Silva. **Projeto de Órgãos de Máquinas**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa. 2005.

Miranda, A.C.O. **Propagação de Trincas por Fadiga em Geometrias 2D Complexas sob Cargas Cíclicas Variáveis**. Tese de Doutorado. PUC - Rio, Rio de Janeiro, Brasil. 106 pp. 2003.

Moussa, W. A., Bell, R., Tan, C.L. **The Interaction of Two Parallel Non-Coplanar Identical Surface Cracks Under Tension and Bending**. Department of Mechanical and Aerospace Engineering. Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada, 1998.

Newman, J. C. Jr., Raju, I. S. **Stress-Intensity Factors Equations for Cracks in Three - Dimensional Finite Bodies Subjected to Tension and Bending Loads**. NASA Technical Memorandum 85793, Langley Research Center, Hampton, Virginia , 1984.

Newman, J. C. Jr., Raju, I. S. **Stress-Intensity Factors for Corner Cracks in Rectangular Bars**. American Society for Testing and Materials, Philadelphia. pp. 43-55. 1998.

Newman, J.C., Raju, I.S. **The Evolution and Application of Three-Dimensional Stress-Intensity Factors**, Workshop on Life Prediction Methodology and Validation for Surface Cracks, Norfolk, VA, 2007.

Newman, J. A., Scott, C., Forth, R. A. Everett, Jr., James, C., Newman, J, William M. K. **Evaluation of Fatigue Crack Growth and Fracture Properties of Cryogenic Model Materials.** NASA/TM-2002-211673 ARL-TR-2725.

Park, C.Y., Grandt, A.F., Suh, J.J. **Stress Intensity Factors for Surface Cracks at Countersunk Holes.** Engineering Fracture Mechanics, 73, 13, pp 1878-1898. 2006.

Pinheiro, B., Pasqualino, I.P. **Fatigue Analysis of Damaged Steel Pipelines Under Cyclic Internal Pressure.** International Journal of Fatigue 31. pp 962–973. 2009.

Liu, Q., Wirdelius, H. **A 2D Model of Ultrasonic Wave Propagation in an Anisotropic Weld.** NDT&E International 40, pp 229-238. 2007.

Rifani, A.I., Grandt, A.F. **A Fracture Mechanics Analysis of Fatigue Crack Growth in a Complex Cross Section,** Pergamon, Engineering Failure Analysis, Vol.3, No.4, pp. 249-265, 1996.

Shimamoto, A., Umezaki, E. **Fatigue Crack-tip Deformation, Crack Growth and Life Prediction in Polycarbonate.** Spring Conference on Experimental Mechanics. Las Vegas, NV. 6 pp. 1994.

Smith, J., Bassim, M. N., Liu, C. D. **Effects of Fatigue Pre-cracking on Stretch Zone Formation.** Engineering Fracture Mechanics. Vol. 52, No. 3, pp. 401-408. 1995.

Soboyejo, W.O., Kishimoto, K., Smith, R.A. **A Study of the Interaction and Coalescence of Two Coplanar Fatigue Cracks in Bending,** Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol.12, 3, pp167-174, 1989.

Soheil, M. **Extended Finite Element Method,** Blackwell Publishing, Oxford, 2008.

Spitas, V., Spitas, C., Michelis, P. **Real-time Measurement of Shear Fatigue Crack Propagation at High-Temperature Using The Potential Drop Technique.** Elsevier, Measurement 41, pp. 424-432. 2008.

Stoyan, S., Daniel, K. **Analysis of Crack Propagation using ΔK and K_{max} .** International Journal of Fatigue 27. pp. 1425-1431. 2007.

Suwendoo, K.R. **Three Dimensional Crack Closure Measurements in Polycarbonate.** Master Dissertation, Purdue University. 136 pp. 1984.

Takemori, M.T. **Polymer Fatigue.** Ann. Rev. Mater. Sci. New York. pp. 171-204. 1984.

Takemori, M.T., Matsumoto, D.S. **An Unusual Fatigue Crack-Tip Plastic Zone: The Epsilon Plastic Zone of Polycarbonate.** General Electric Company, New York. 8 pp.

Takemori, M.T., **Fatigue Fracture of Polycarbonate,** Polymer Engineering and Science, Vol. 22, No15, 1982.

Tesch, A., Pippan, R. , H. Döker. **New Testing Procedure to Determine $da/dN-\Delta K$ Curves at Different, Constant R-Values Using One Single Specimen.** International Journal of Fatigue 29pp. 1220–1228. . 2007.

U.S. Department of Transportation. **Stress-Intensity Factors Along Three-Dimensional Elliptical Crack Fronts.** Springfield, USA. 16 pp. 1998.

U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration: **Stress-Intensity Factors Along Three-Dimensional Elliptical Crack Fronts**, Office of Aviation Research Washington, D.C. 20591, Final Report, 1998.

Vainshtok, V.A. , Varfolomeyev, I. V. **Stress Intensity Factor Analysis for Part-Elliptical Cracks in Structures.** Kluwer Academic Publishers, International Journal of Fracture 46. pp. 1-24. 1990.

Vasic, S., Smith, I., Landis, E. **Finite Element Techniques and Models for Wood Fracture Mechanics.** Springer –Verlag, Wood Sci Technol 39, pp. 3-17. 2005.

Wang, C.H. **Introduction to Fracture Mechanics.** DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory. 82 pp. 1996.

Zambrano, H.R. **Efeito da Tensão Nominal no Tamanho e Forma da Zona Plástica.** Rio de Janeiro, Brasil. 84 pp. 2007.

Zheng, X. J. , Kiciak, A. , Glinka, G. **Weight Functions and Stress Intensity Factors for Internal Surface Semi-Elliptical Crack in Thick-Walled Cylinder.** Engineering Fracture Mechanics Vol. 58, No. 3. pp. 207-221. 1997.