

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.

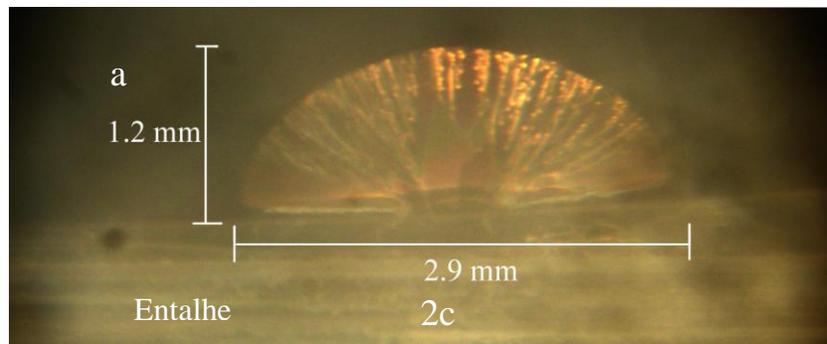


Figura 5.1- Nascimento de uma trinca semi - elíptica bidimensional localizada no meio do entalhe do corpo de prova CP-PC-010, $(w,h,t) = (40\text{mm}, 40\text{mm}, 10\text{mm})$, policarbonato, $P = 400$ N, $N = 8902$ ciclos (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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.

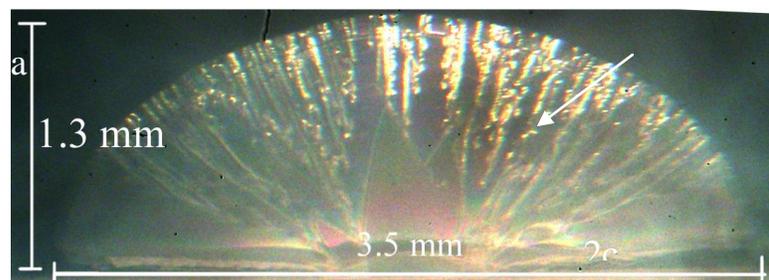


Figura 5.2 – Propagação da trinca em forma bidimensional localizada no meio do entalhe do corpo de prova CP-PC-010, $(w,h,t) = (40\text{mm}, 40\text{mm}, 10\text{mm})$, policarbonato, $P = 400$ N, $N = 11529$ ciclos (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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.

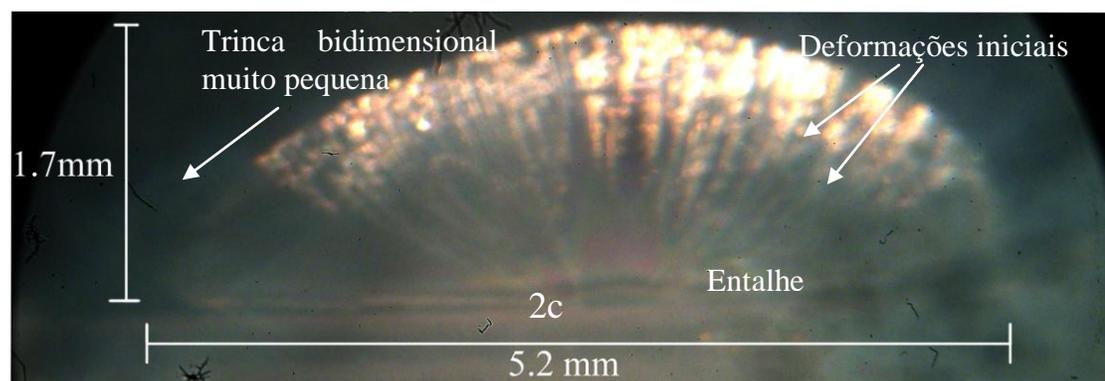


Figura 5.3- Propagação semi - elíptica de uma trinca bidimensional localizada no meio do entalhe do corpo de prova CP-PC-010, $(w,h,t) = (40\text{mm}, 40\text{mm}, 10\text{mm})$, policarbonato, $P = 400$ N, $N = 18084$ ciclos (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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.

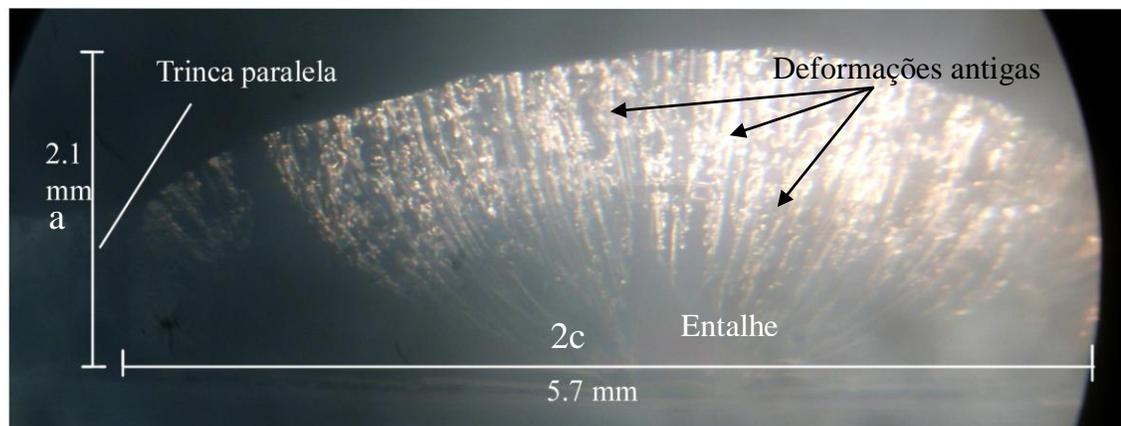


Figura 5.4- Propagação semi - elíptica de duas trincas bidimensionais uma maior e outra menor localizadas no entalhe do corpo de prova CP-PC-010, (w,h,t) = (40mm, 40mm, 10mm), policarbonato, $P = 400 \text{ N}$, $N = 23772$ ciclos, $f = 4 \text{ Hz}$, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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

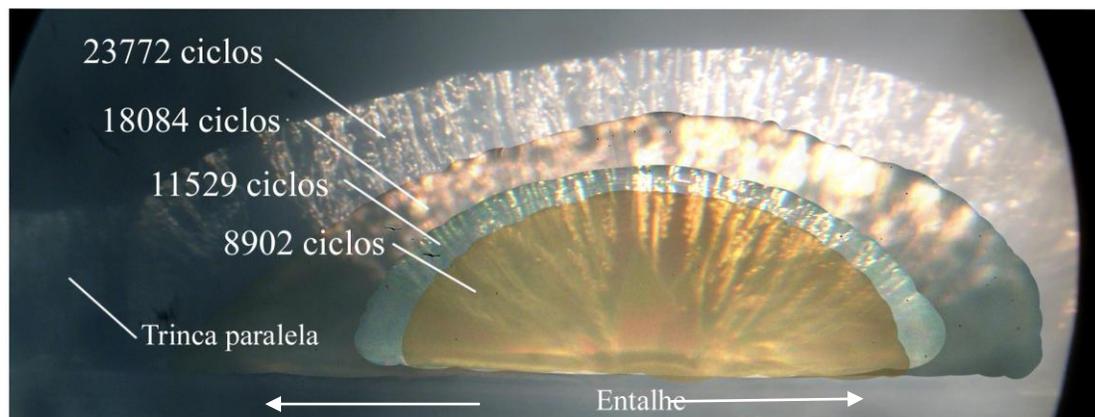


Figura 5.5- Sobreposição fotográfica da propagação da trinca bidimensional antes de atingir as paredes do corpo de prova. (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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

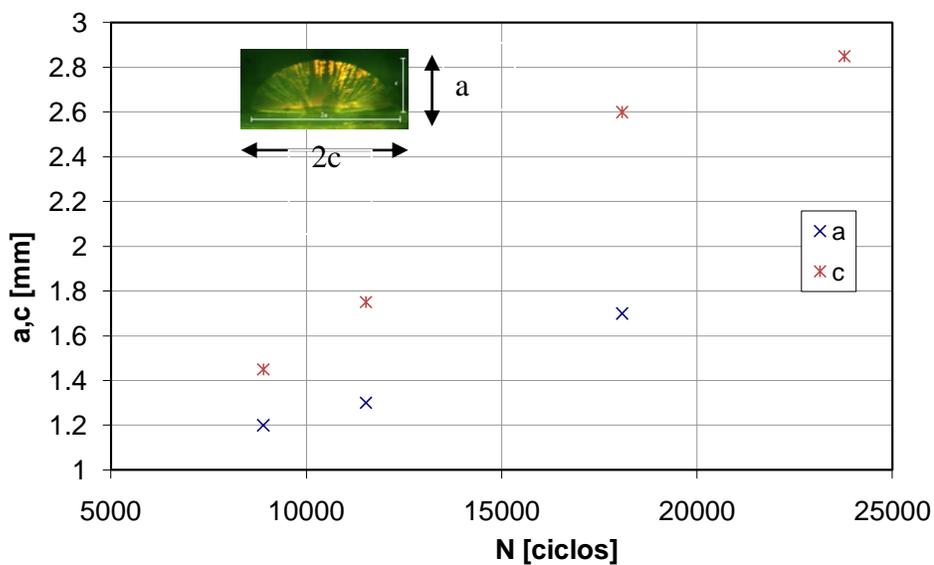


Figura 5.6 - Comparação dimensional da propagação da trinca bidimensional para carregamento constante $P=400N$, CP-PC-010 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

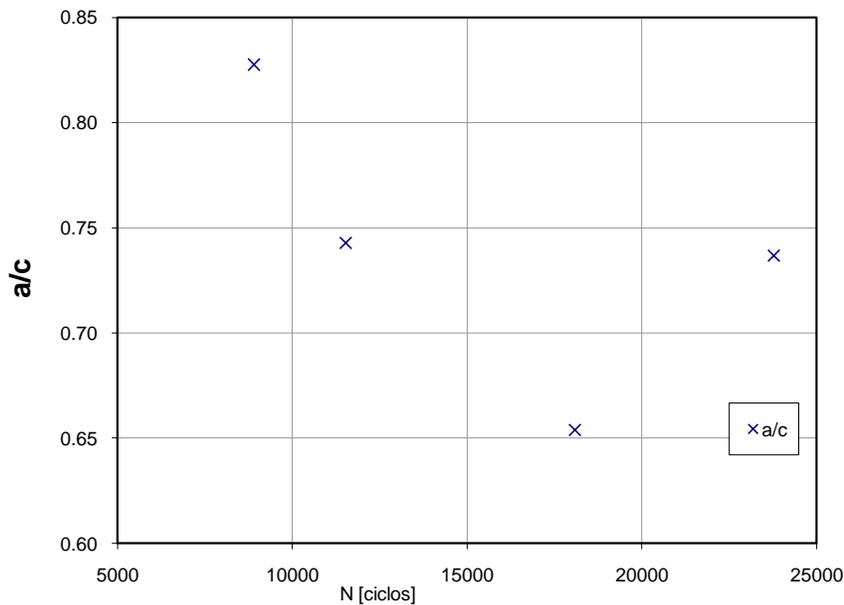


Figura 5.7 - Comparação dimensional da propagação da trinca bidimensional para carregamento constante $P=400N$, CP-PC-010

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.

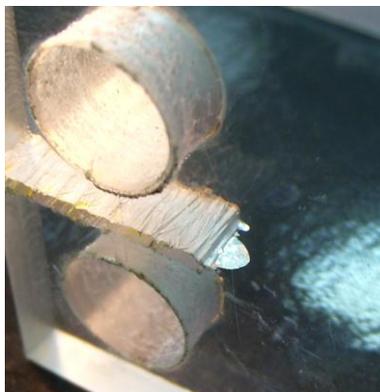
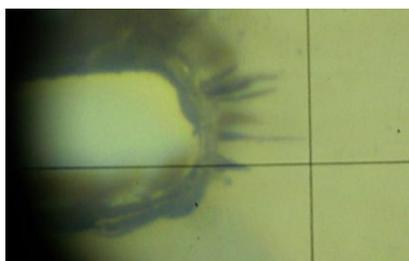


Figura 5.8 – Iniciação de múltiplas trincas bidimensionais por fadiga em polycarbonato (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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.

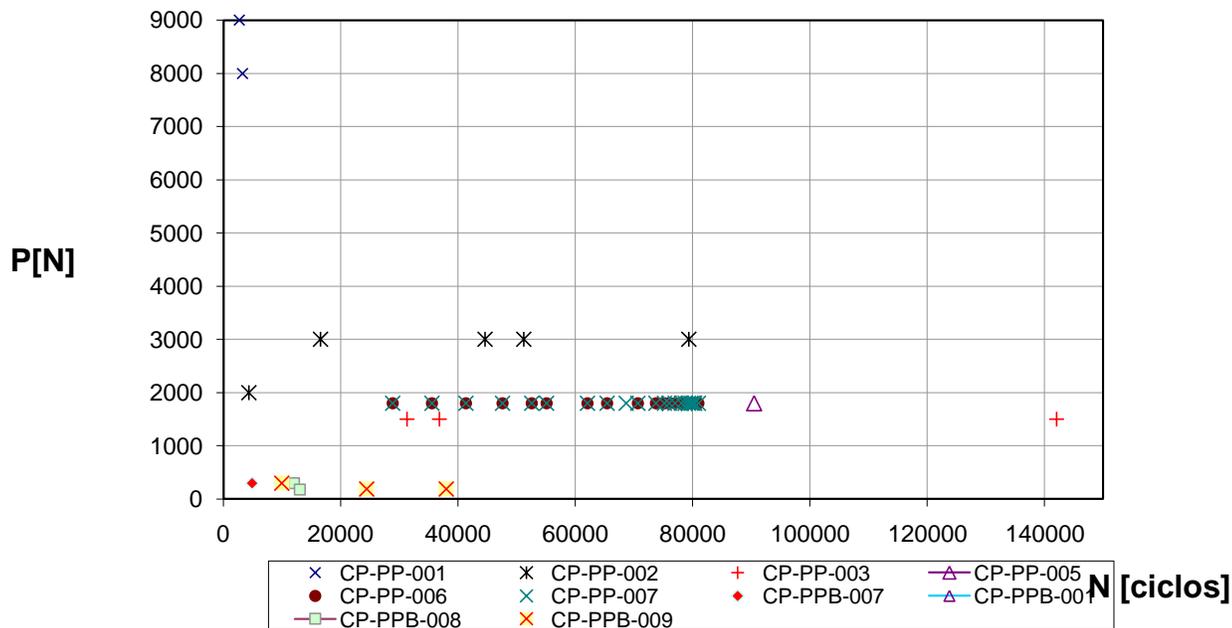


Figura 5.9 – Ensaios de fadiga em corpos de prova tipo CT-PP, PMMA (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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.

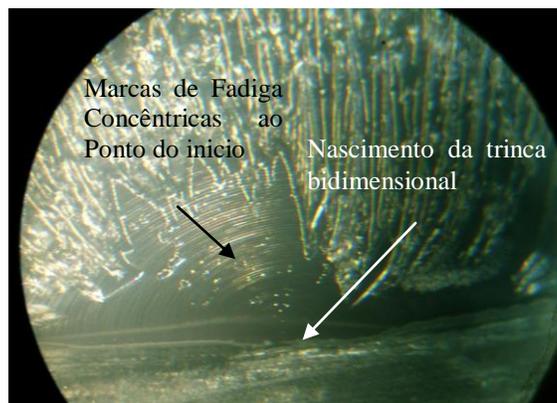


Figura 5.10 – Nascimento de trinca bidimensional, CP-PC-023. (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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.

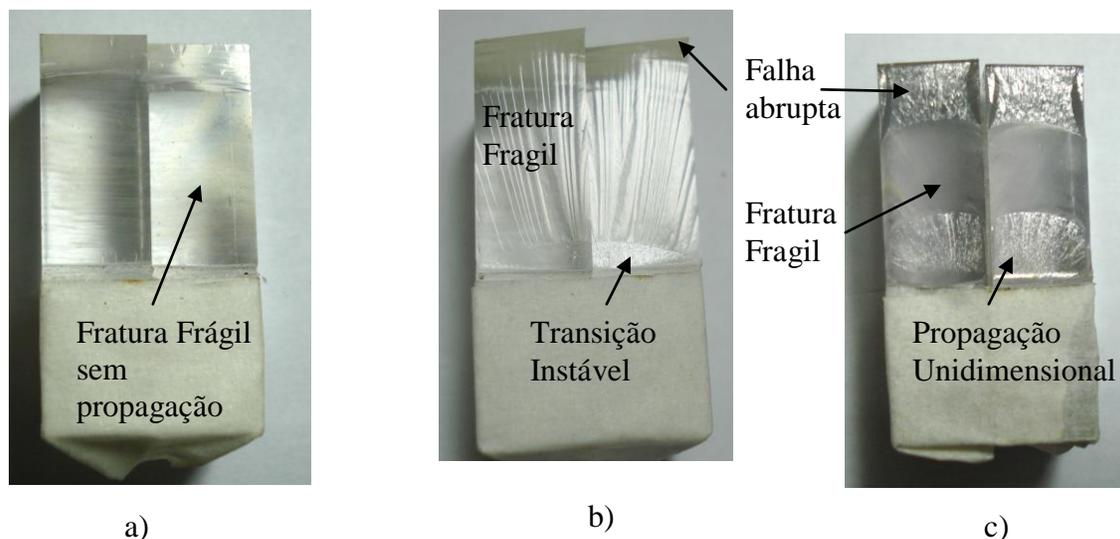


Figura 5.11- Propagação de trincas, C(T) (w,h,t) = (40mm, 40mm, 10mm a) CP-PP-003 b) CP-PPB-007 c) CP-PC-014 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010) .

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.

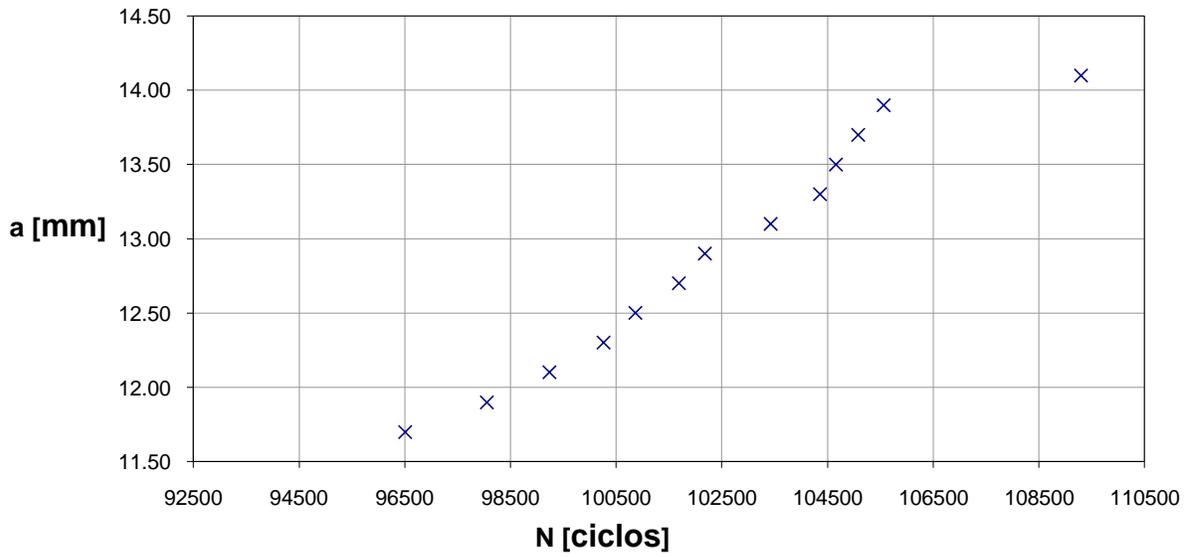


Figura 5.12- Propagação de trinca de fadiga no policarbonato, pré-ensaio CP-PC-023, comparação a vs N . (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

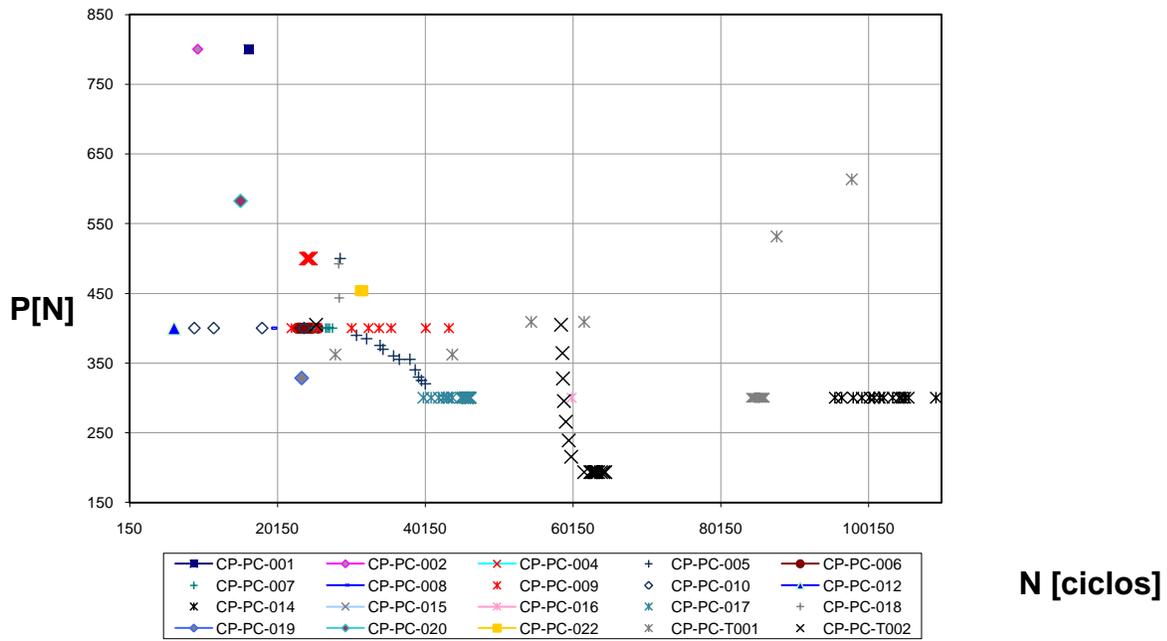


Figura 5.13– Ensaio de fadiga em corpos de prova tipo CT-PC, Policarbonato

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.

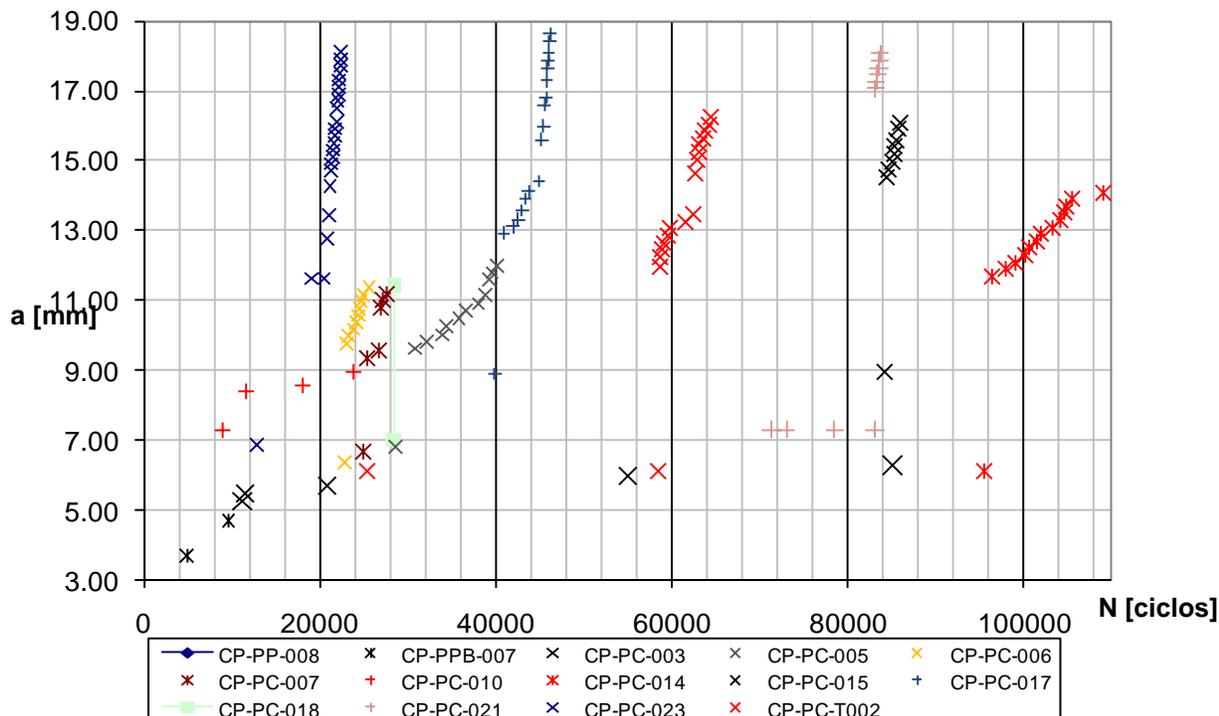


Figura 5.14 – Comportamento a vs N , Pré-Ensaio com Policarbonato

(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.

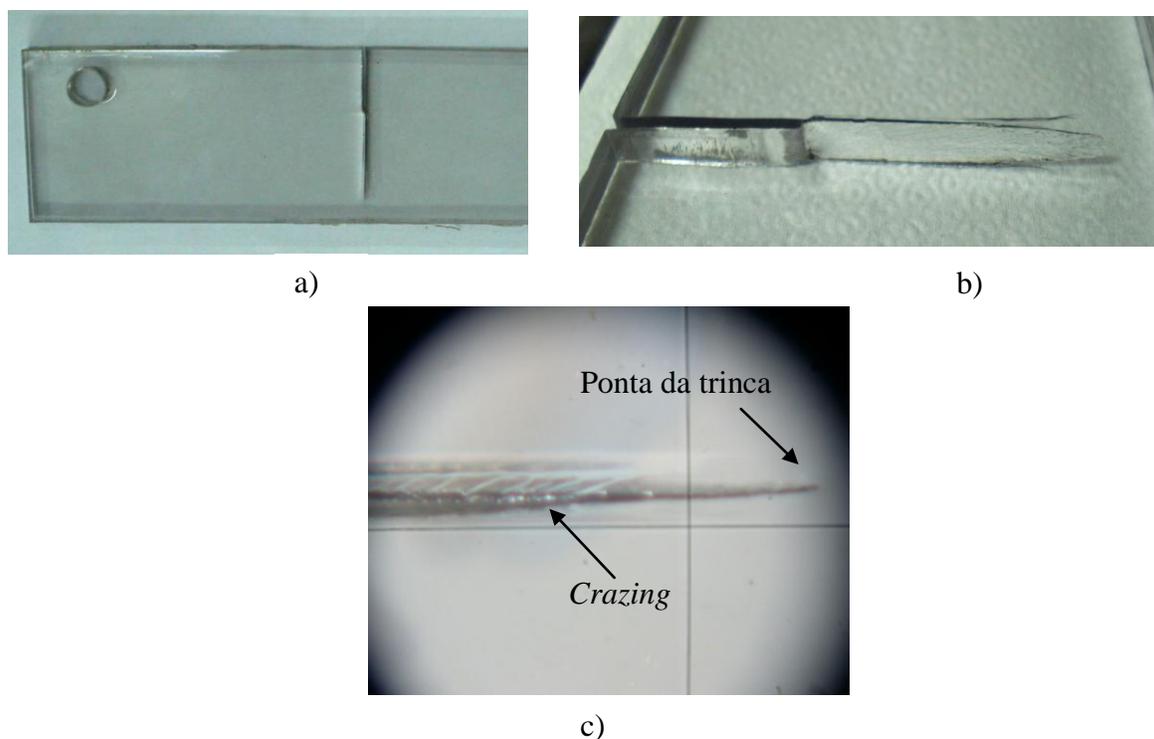


Figura 5.15 – Propriedade a fadiga do policarbonato. a)Corpo ensaiado
b) Propagação c) *Crazing* ou Microfibrilamento. (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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.

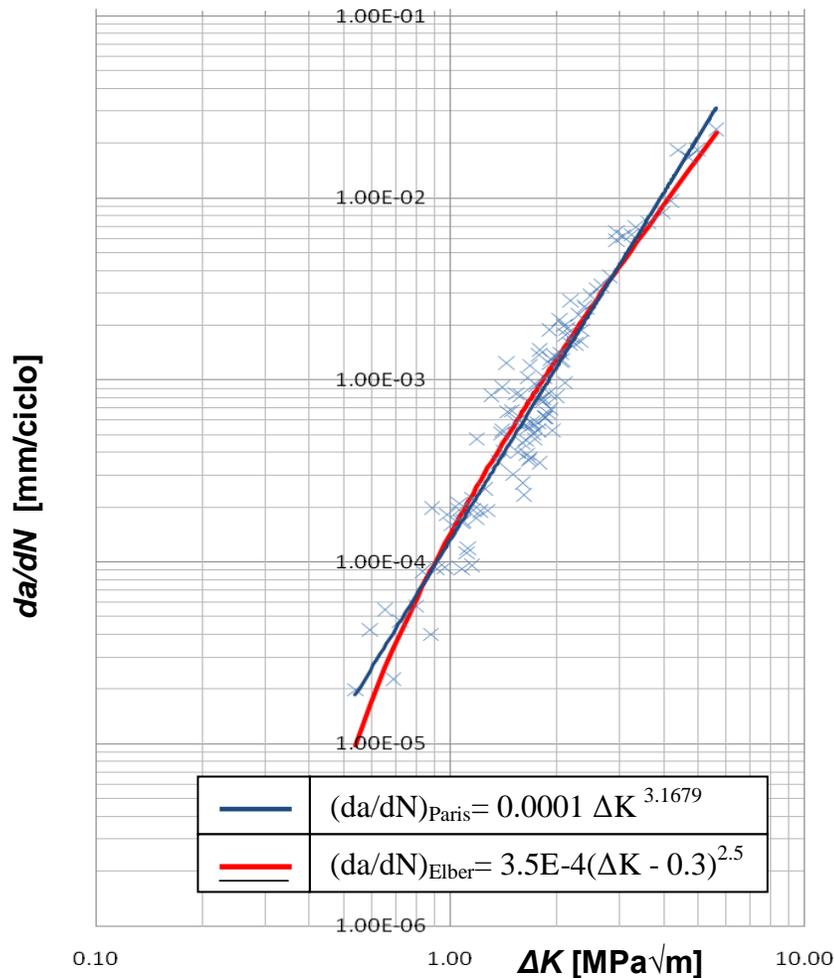


Figura 5.16 – Propriedade $da/dN \times \Delta K$ do policarbonato, ajustado a Paris e Elber. (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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.

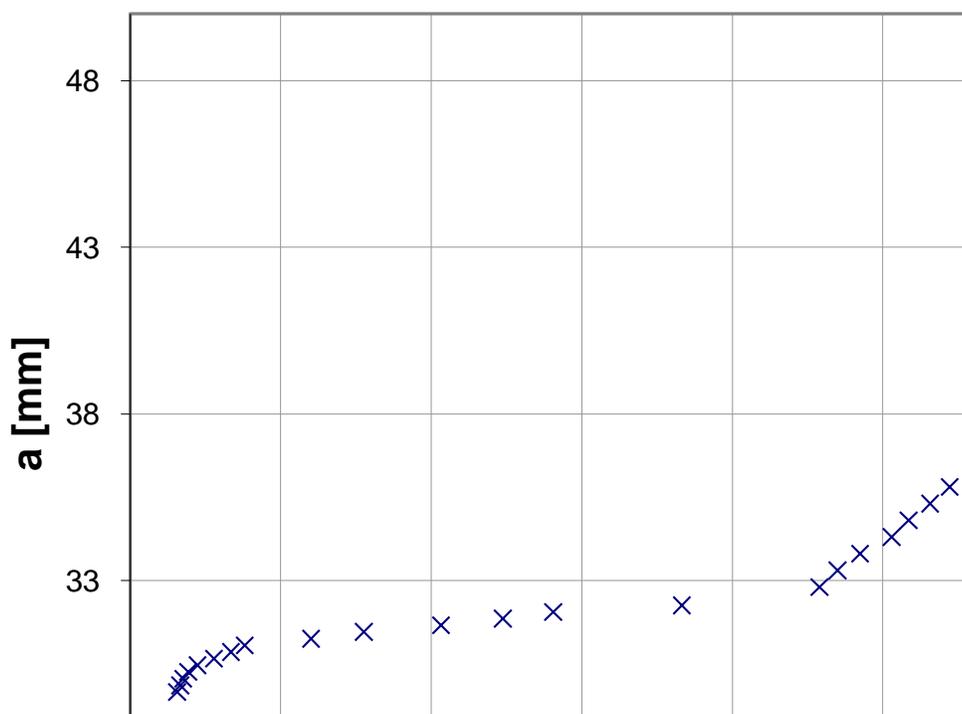


Figura 5.17– Comparação a vs N corpo de prova ESE(T)-02

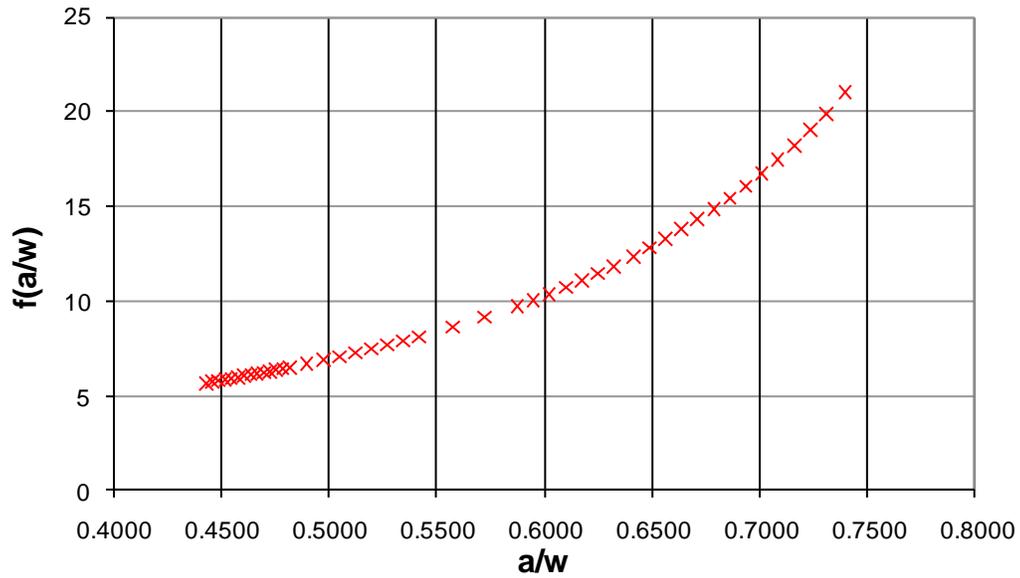


Figura 5.18– Comparação $f(a/w)$ vs a/w , corpo de prova ESE(T)-02

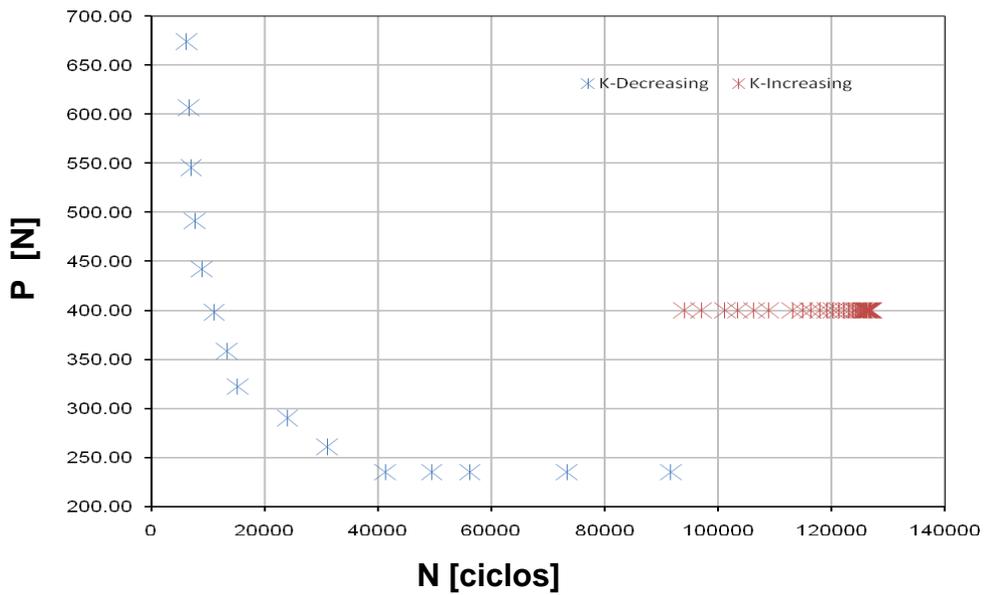


Figura 5.19– Comparação P vs N , corpo de prova ESE(T)-02

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).

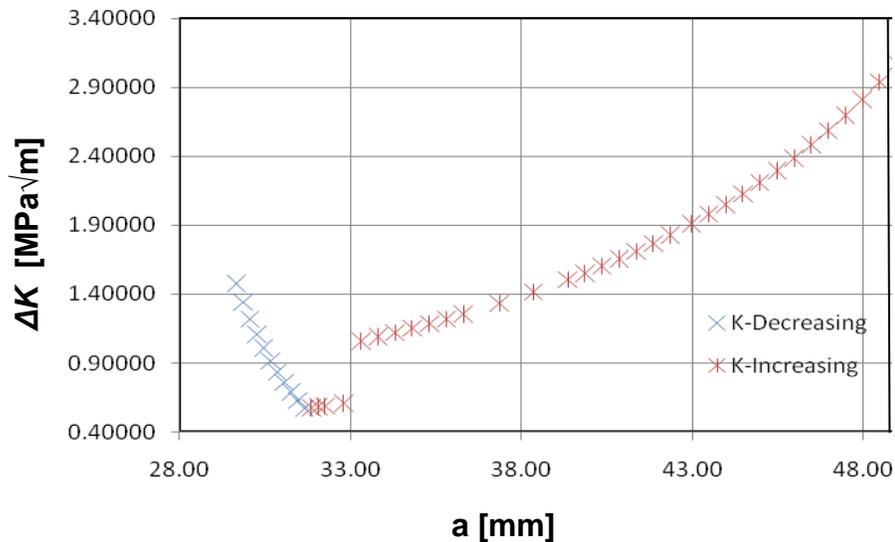


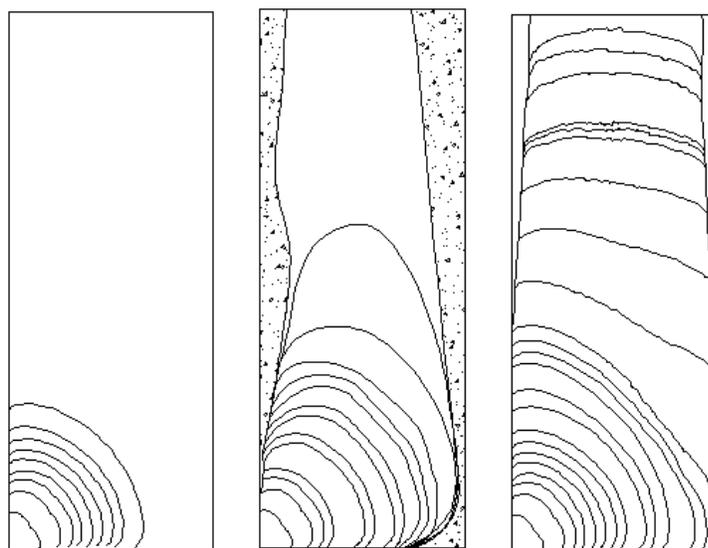
Figura 5.20– Comparação ΔK vs a corpo de prova ESE(T)-02

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.

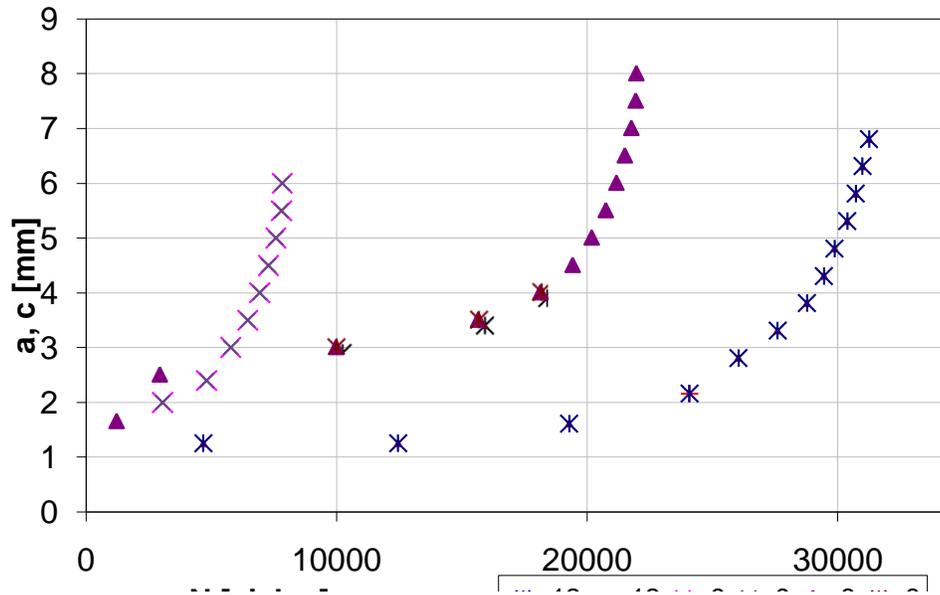
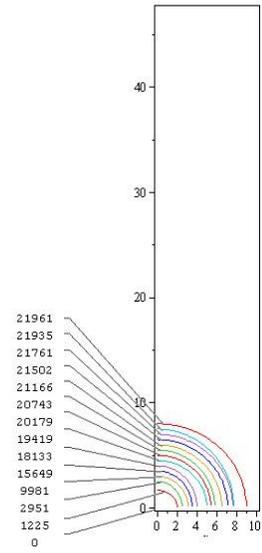


Figura 5.22 –Trinca bidimensional $a/t \leq 1$, C2D-08, C2D-09, C2D-12

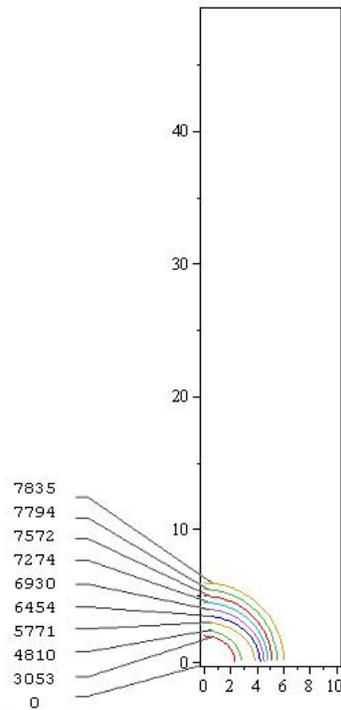
A Figura 5.23 e 5.24 detalham o número de ciclos através de semi-elipses como resultado dos ensaios de diferentes corpos de prova, foram usados os dados obtidos de comprimento a , c , c' para desenhar os diferentes estágios da propagação para diferentes ciclos de carga experimentais. O formato das quarto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

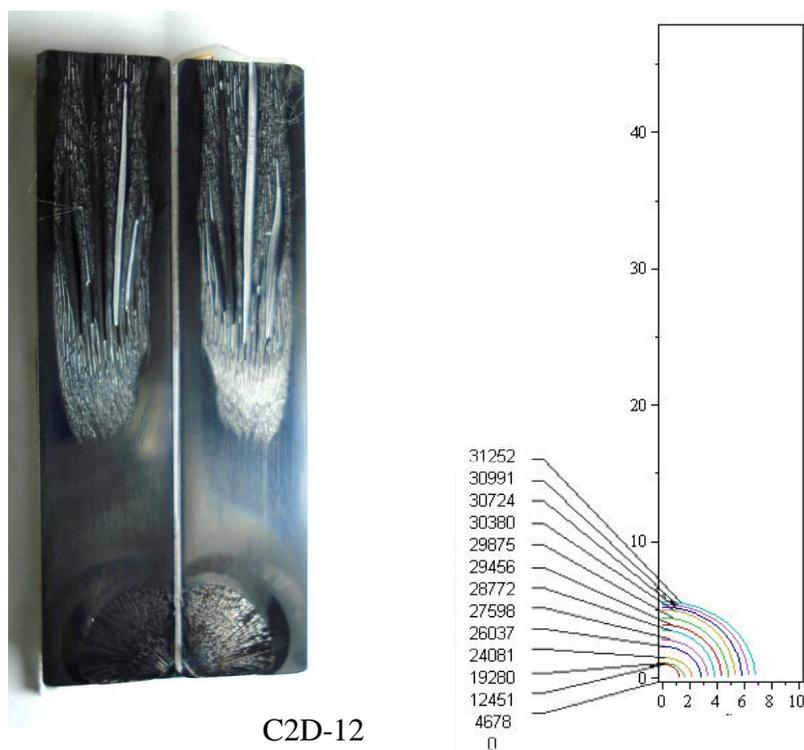


Figura 5.24 – Fratura frágil em trinca bidimensional $a/t < 1$, C2D-12 com numero de ciclos e geometria feita com dados experimentais da propagação, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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.

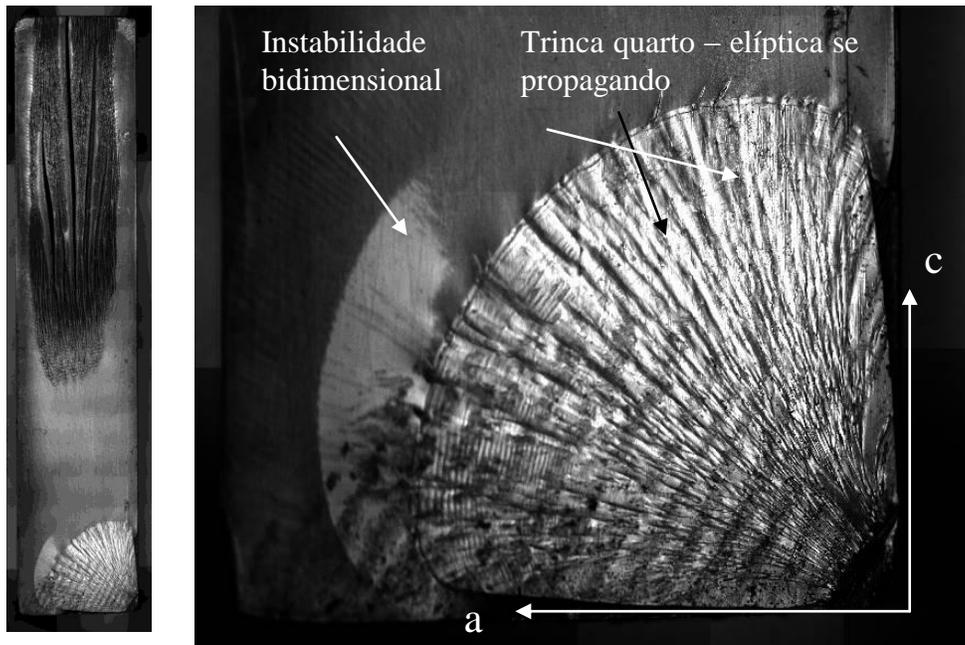


Figura 5.25– Propagação Bidimensional e fratura frágil C2D-12

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.

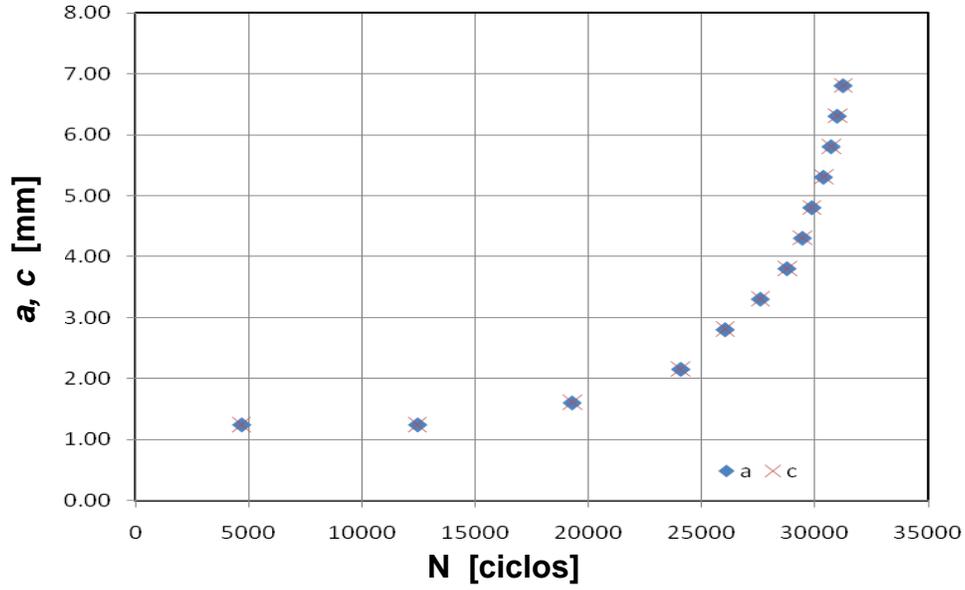


Figura 5.26– Propagação Bidimensional a,c vs. N C2D-12

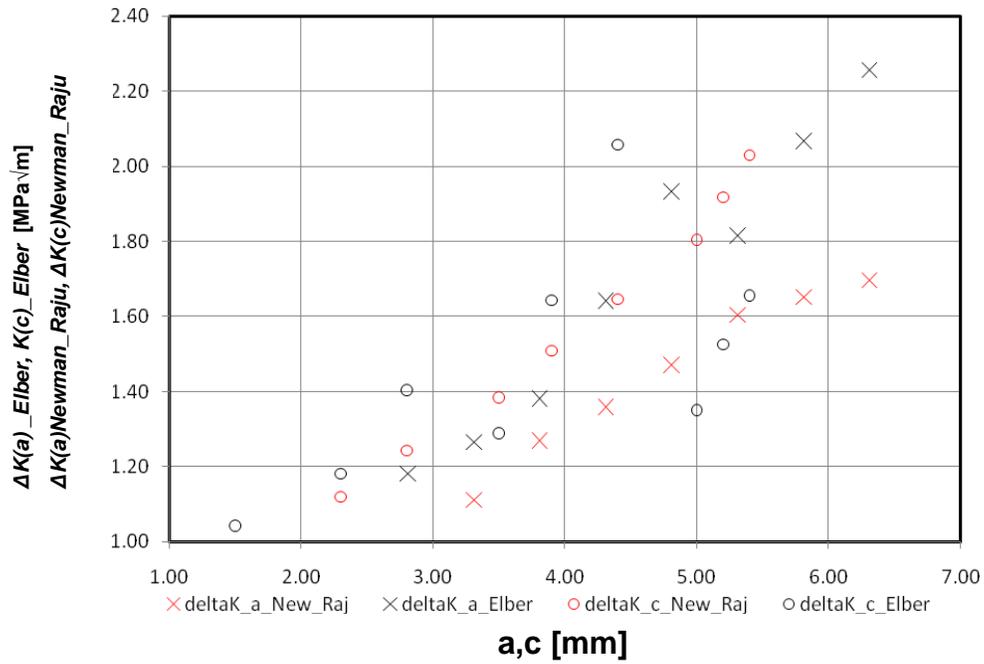


Figura 5.27– Propagação Bidimensional a,c vs ΔK_{New_Raj} , ΔK_{Elber} , C2D-12

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. $f(c/w)$, $f(a/t)$.

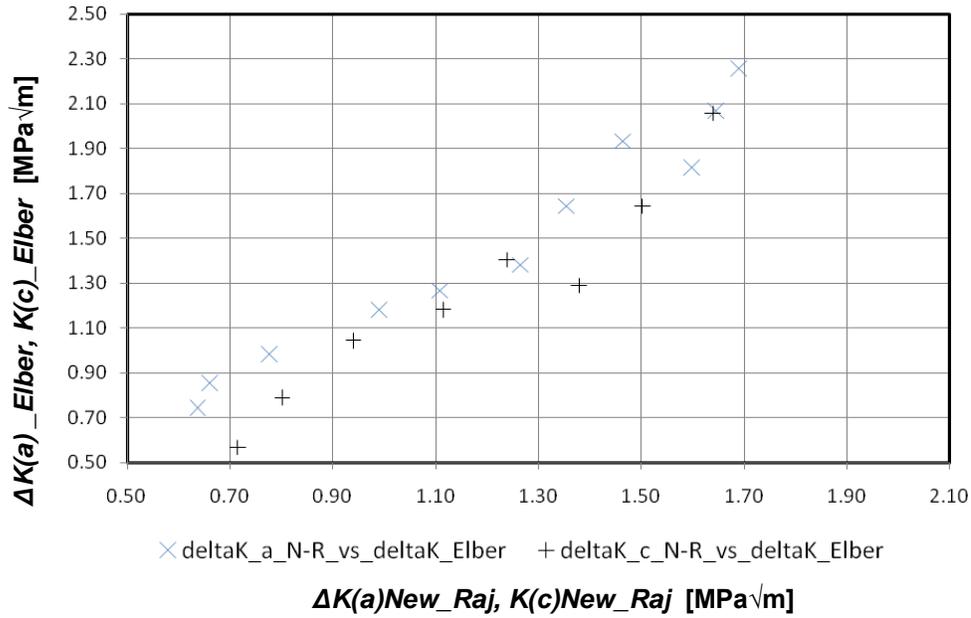


Figura 5.28– Propagação Bidimensional ΔK_{New_Raj} vs ΔK_{Elber} , C2D-12

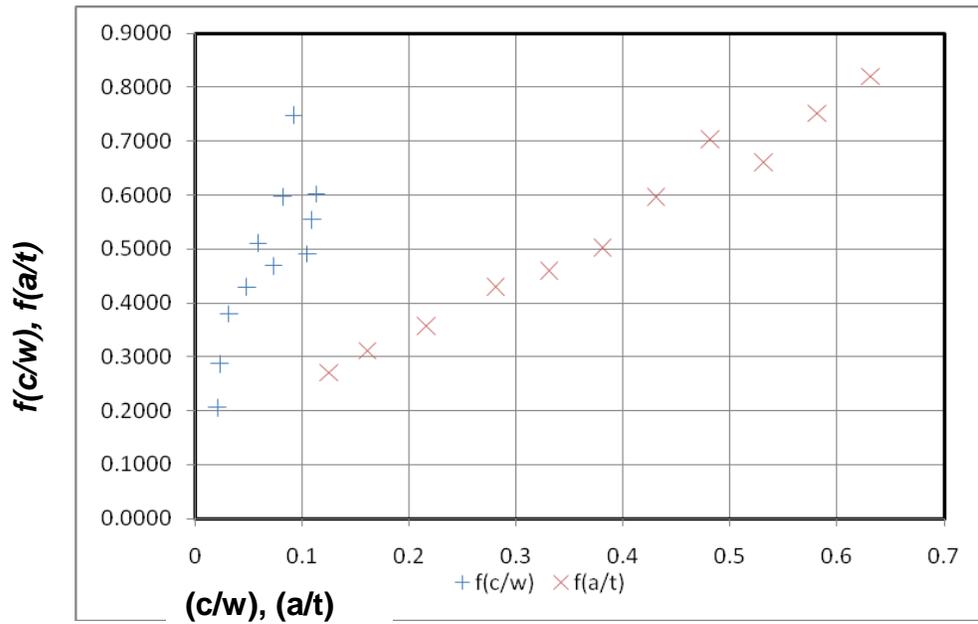


Figura 5.29– Propagação Bidimensional $(c/w), (a/t)$ vs. $f(c/w), f(a/t)$, C2D-12

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 $a/t \leq 1$.

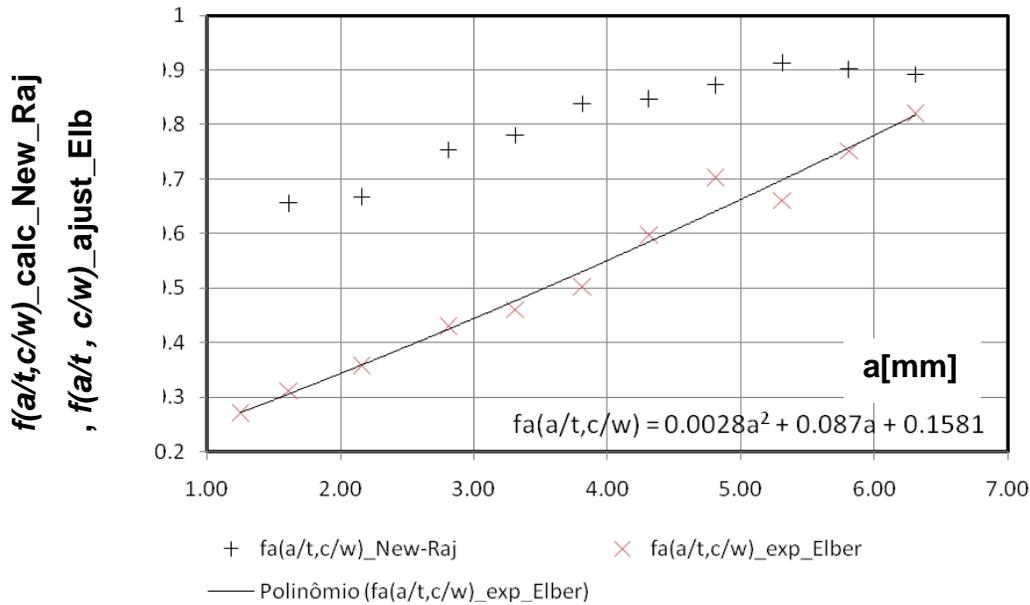


Figura 5.30– Propagação Bidimensional

a vs. $f(a/t, c/w)_{\text{calc_New_Raj}}$ vs. $f(a/t, c/w)_{\text{ajust_Elber}}$, C2D-12

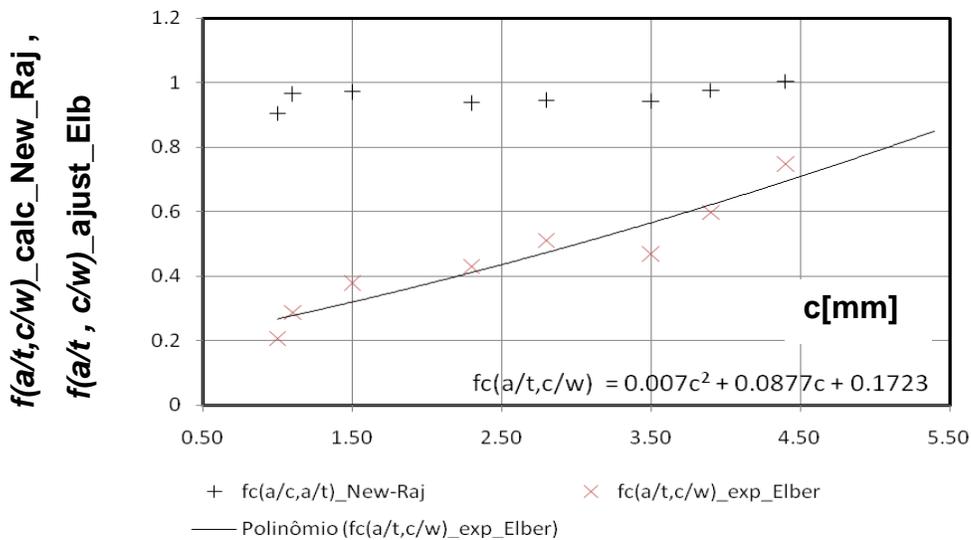


Figura 5.31– Propagação Bidimensional

c vs. $f(a/t, c/w)_{\text{calc_New_Raj}}$ vs. $f(a/t, c/w)_{\text{ajust_Elber}}$, 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).

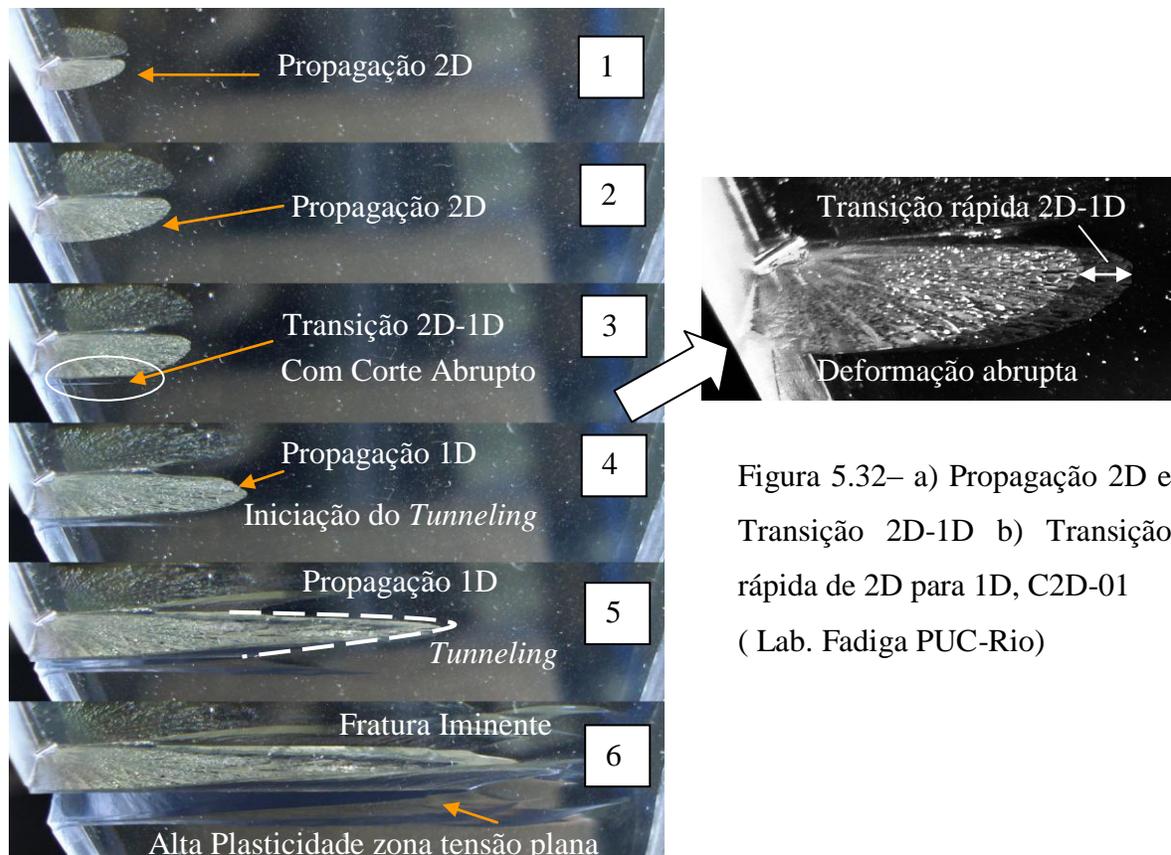
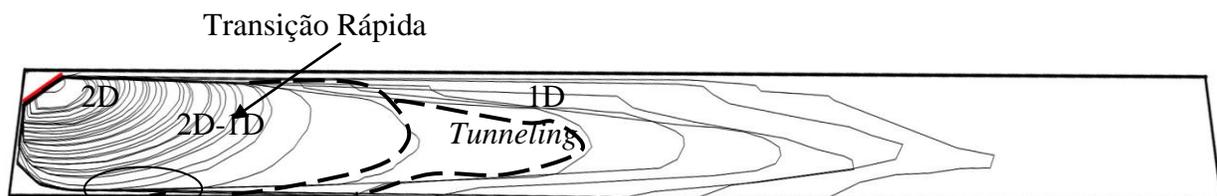


Figura 5.32– a) Propagação 2D e Transição 2D-1D b) Transição rápida de 2D para 1D, C2D-01 (Lab. Fadiga PUC-Rio)

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*.

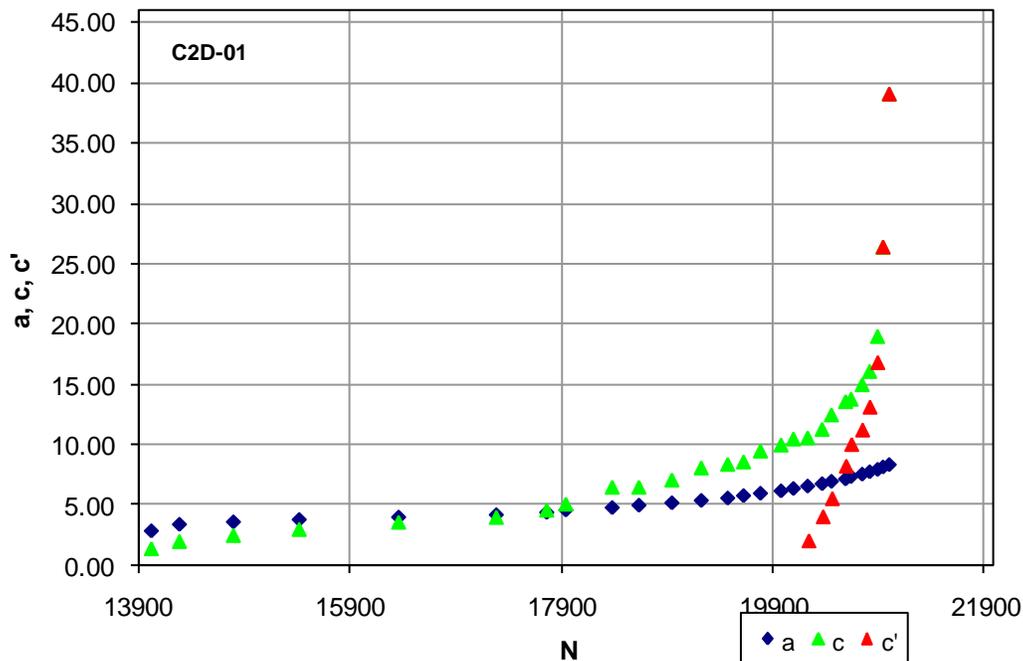


Figura 5.34 – Transição trinca bidimensional para unidimensional, C2D-01 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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.

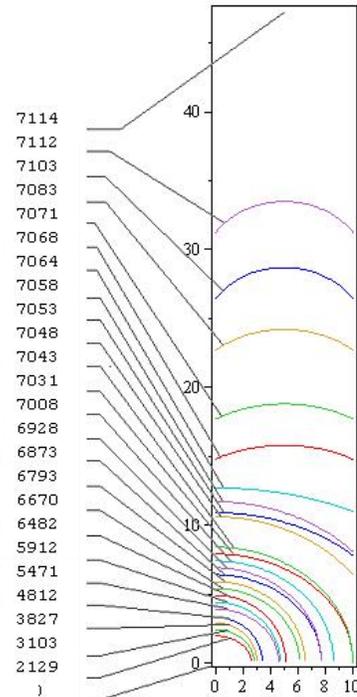
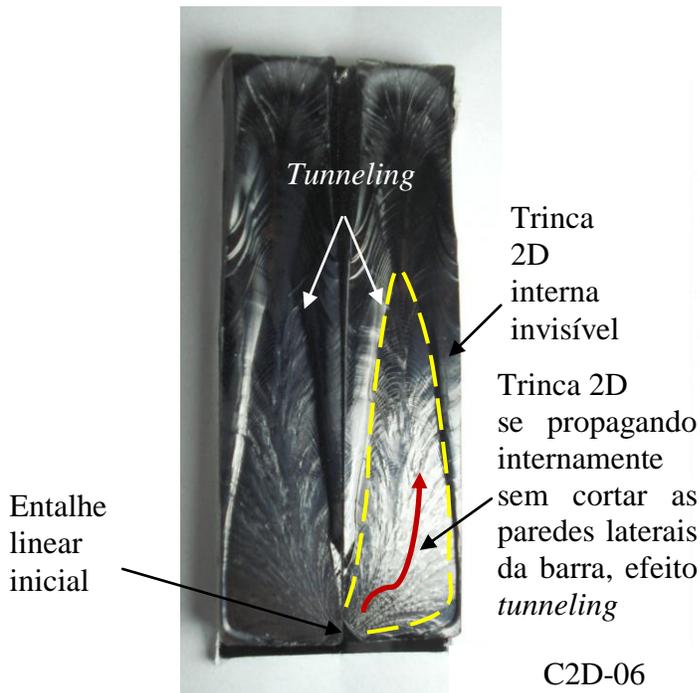
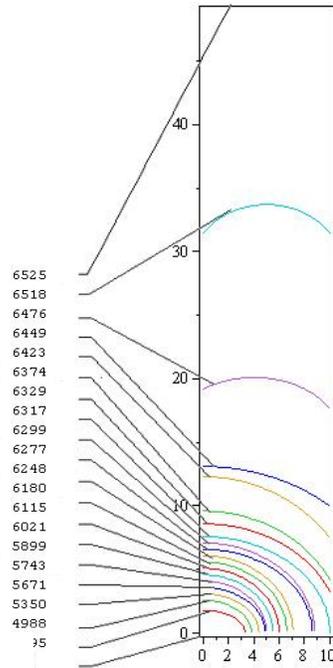


Figura 5.35 – Transição de propagação de trinca bidimensional $a/t > 1$ para unidimensional, C2D-05,06 com numero de ciclos e geometria feita com dados experimentais da propagação, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

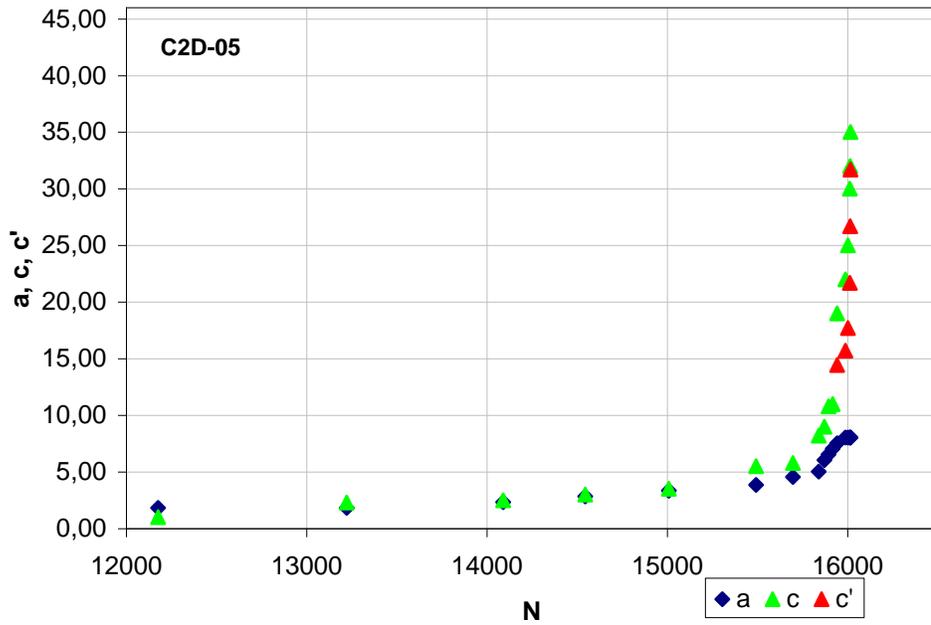


Figura 5.36 – Transição trinca bidimensional para unidimensional , C2D-05

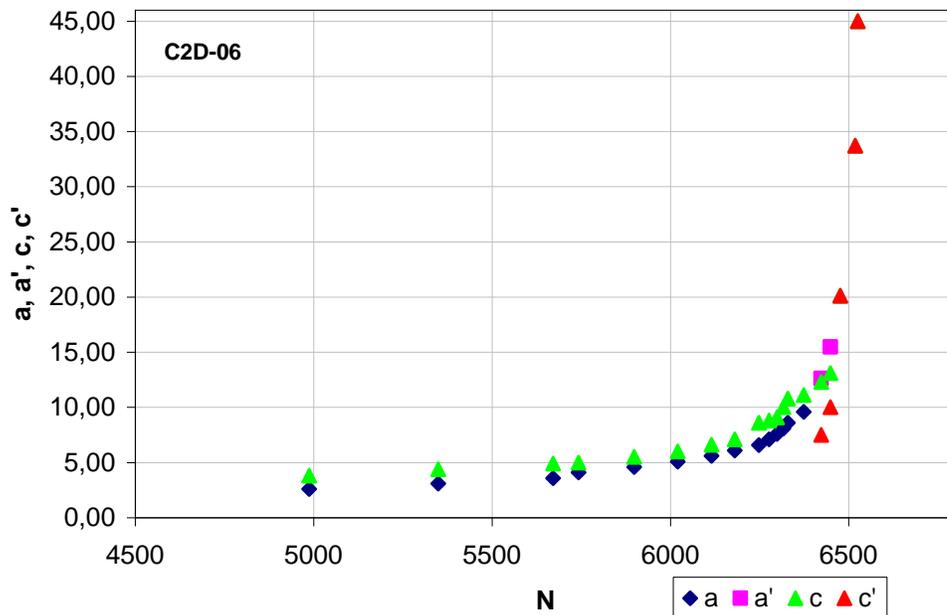


Figura 5.37 – Transição trinca bidimensional para unidimensional , C2D-06

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.

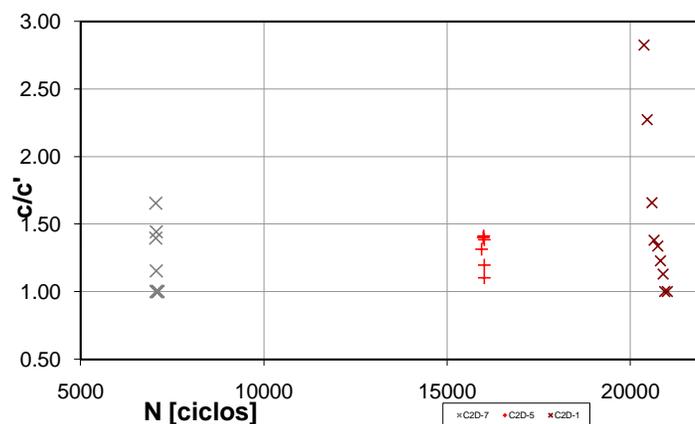


Figura 5.38 – Razões c/c' para diferentes corpos de prova C2D-01, C2D-05, C2D-07, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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.

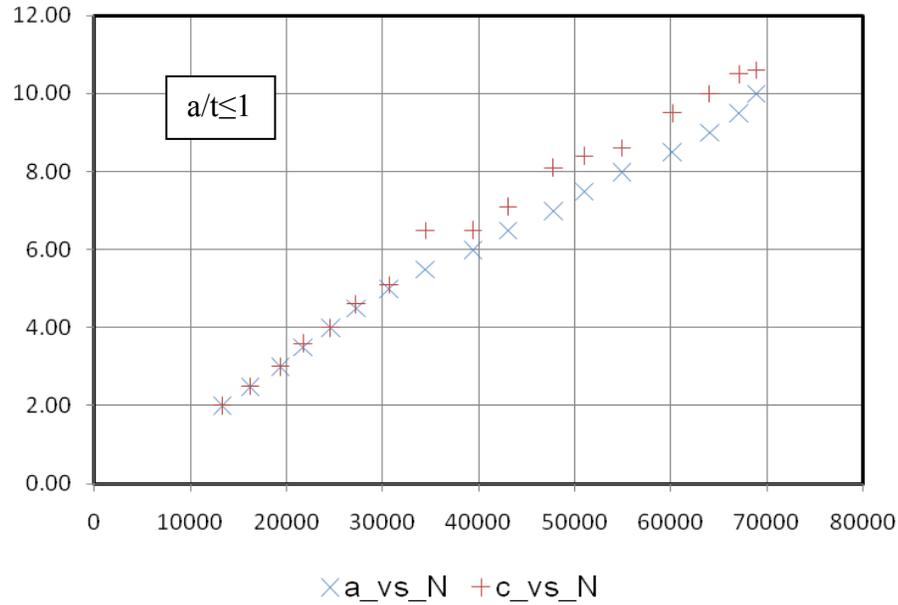


Figura 5.39 – Comparação a, c vs. N , trinca bidimensional, $a/t \leq 1$, C2D-13

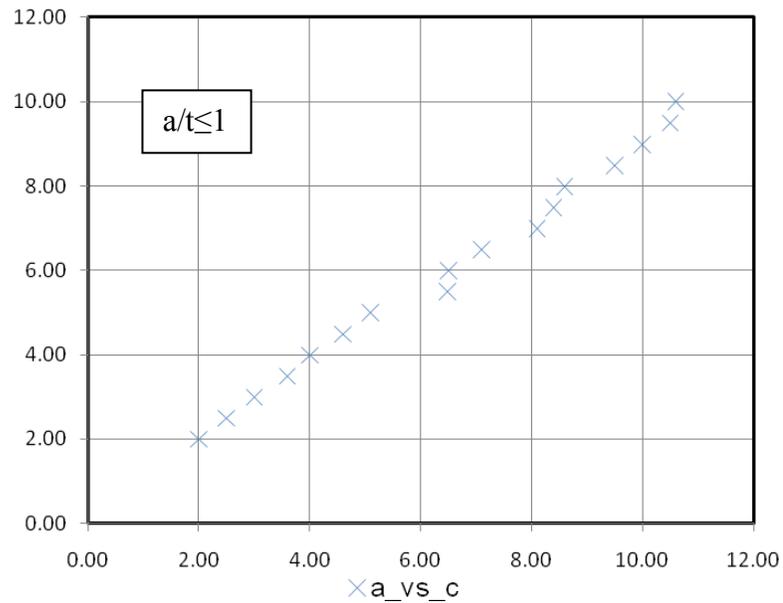
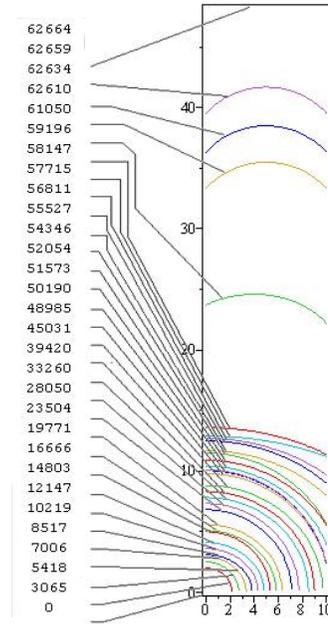
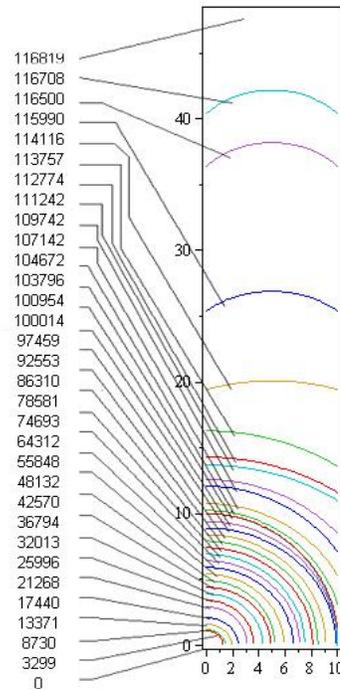


Figura 5.40 – Comparação a vs. c , trinca bidimensional, $a/t \leq 1$, C2D-13

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.

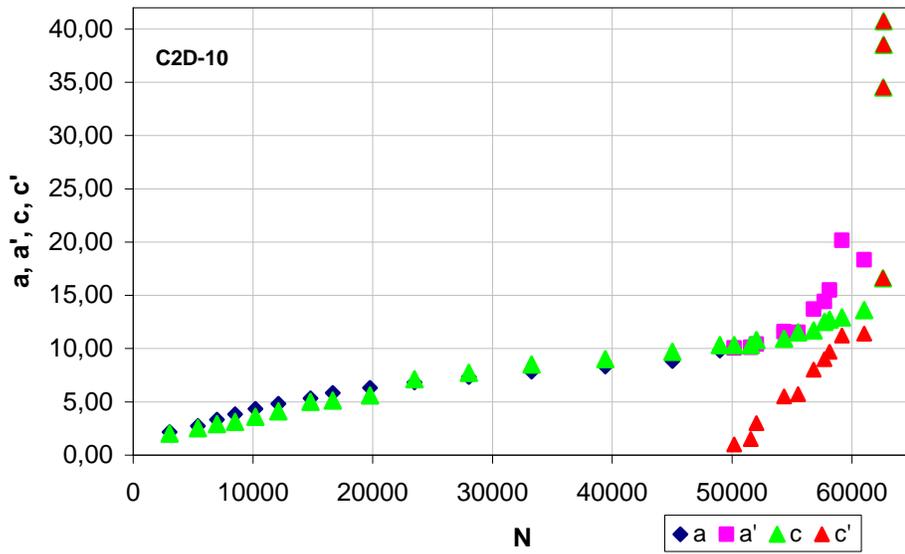


Figura 5.42 – Transição trinca bidimensional para unidimensional , C2D-10
(Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

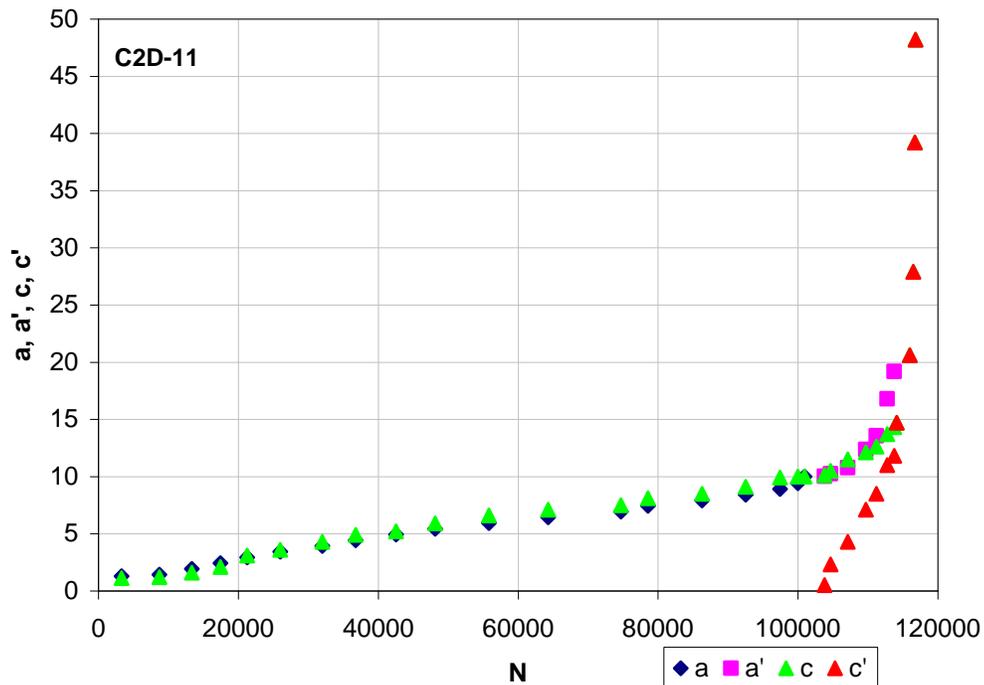


Figura 5.43– Transição trinca bidimensional para unidimensional , C2D-11

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.

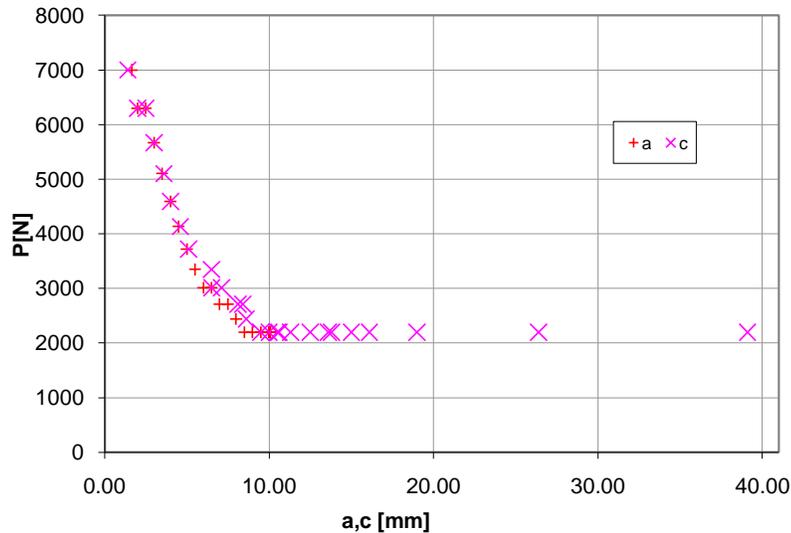
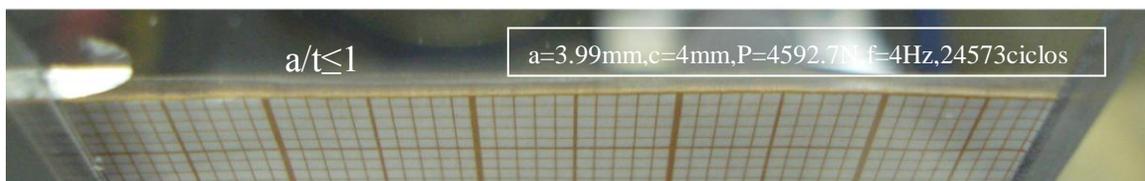
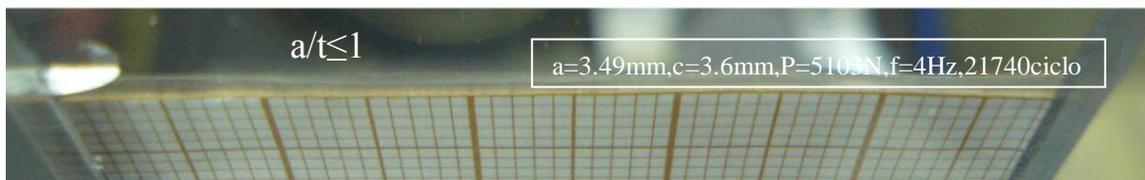
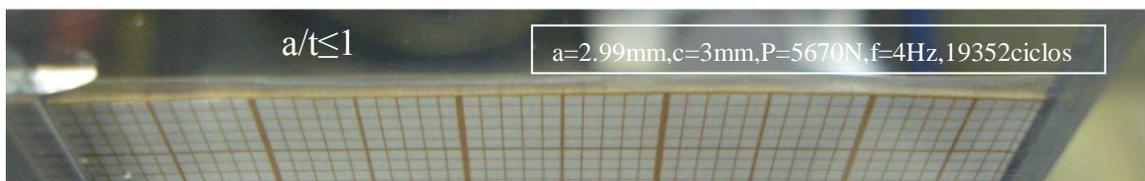
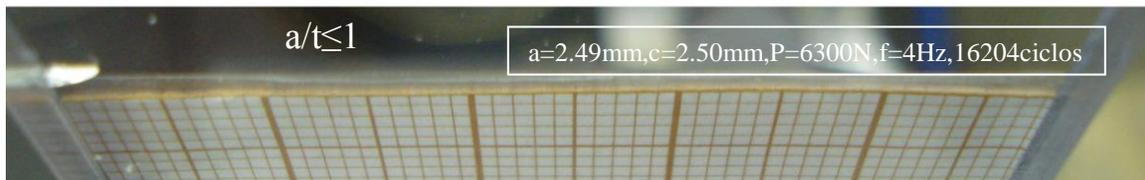
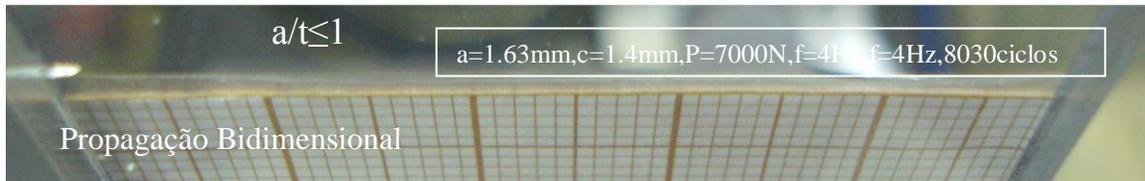
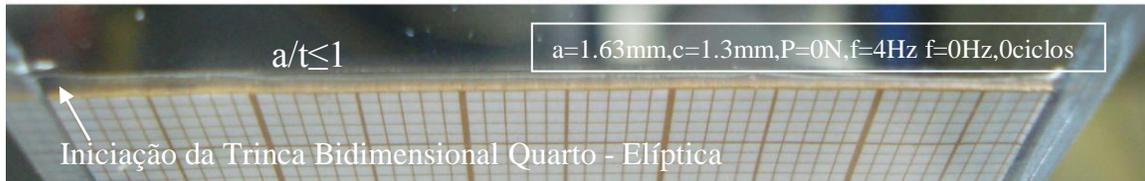
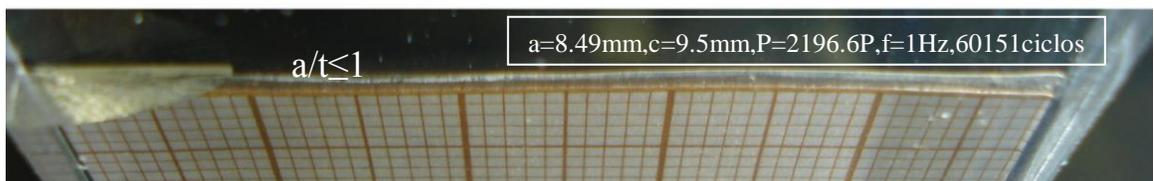
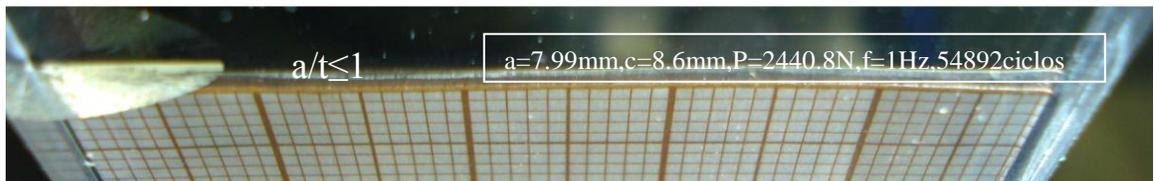
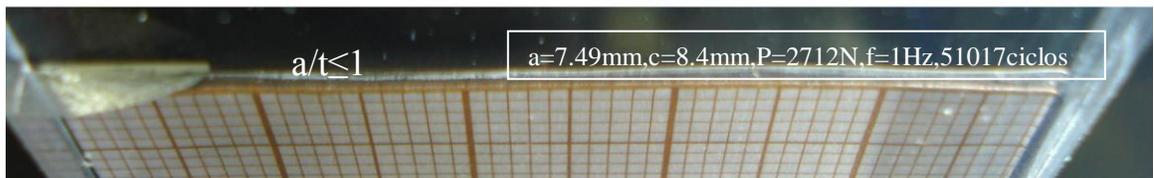
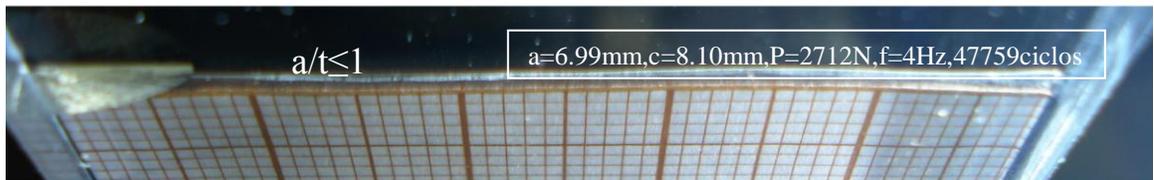
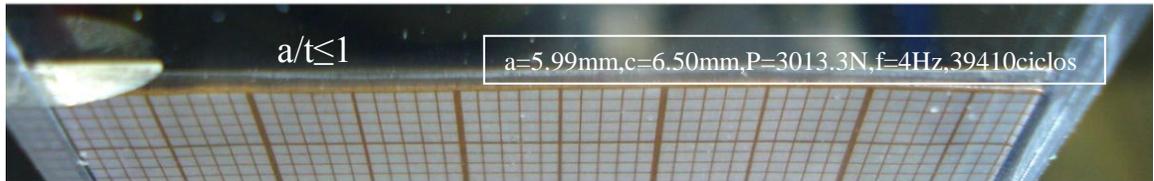
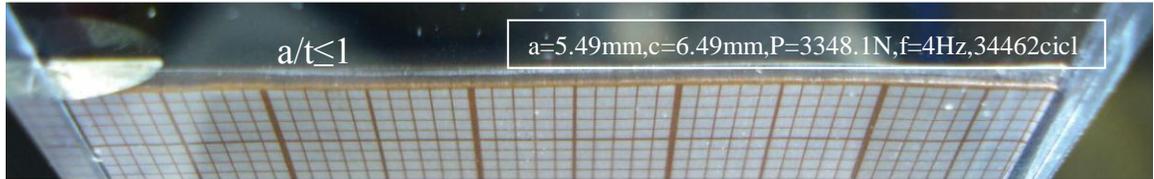
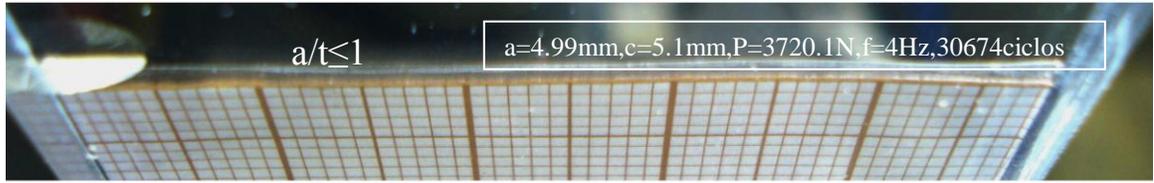


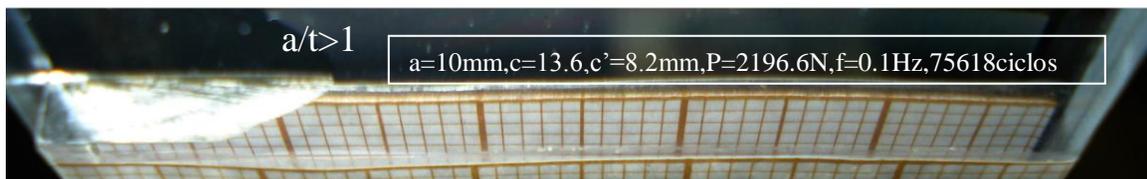
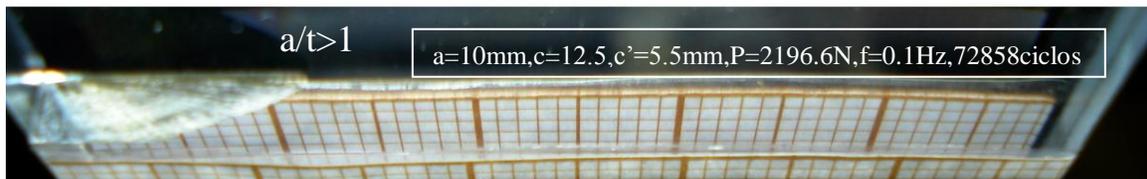
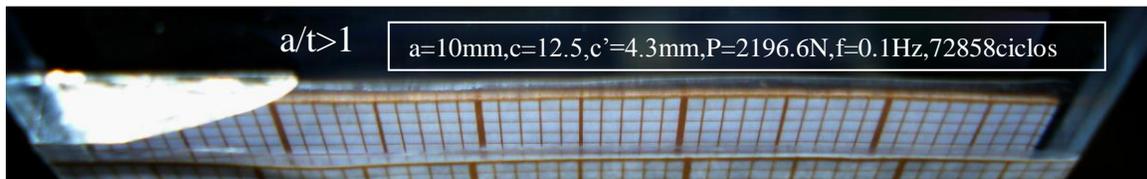
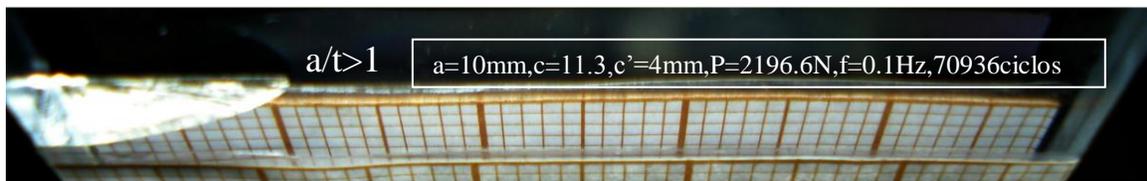
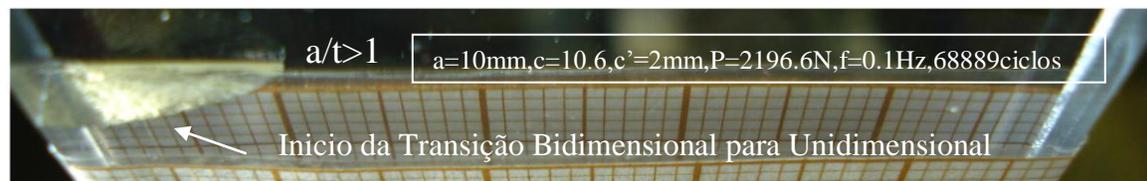
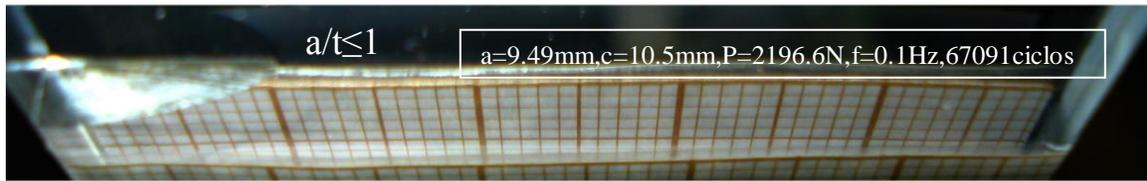
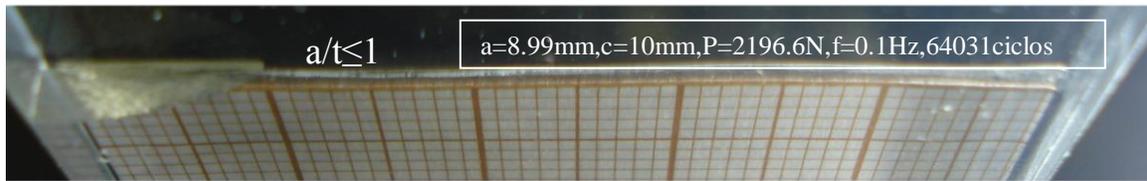
Figura 5.44 – Diminuição do carregamento aplicado para conseguir registrar a transição, C2D-13 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

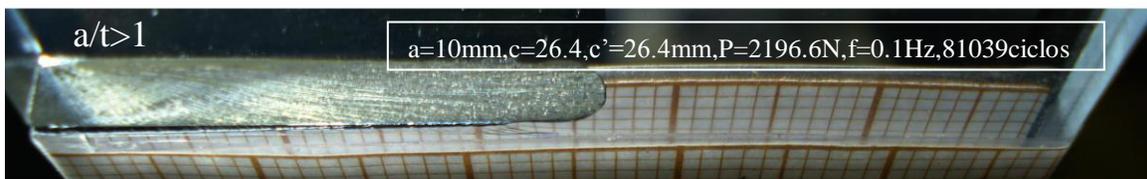
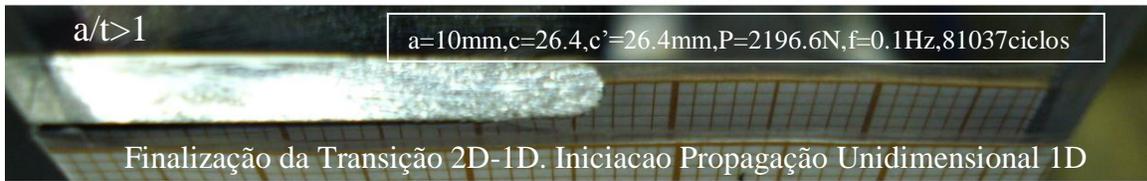
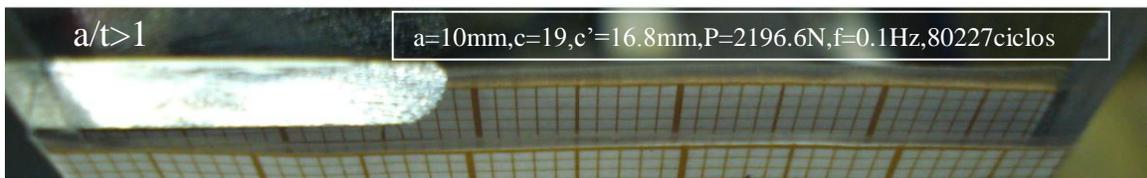
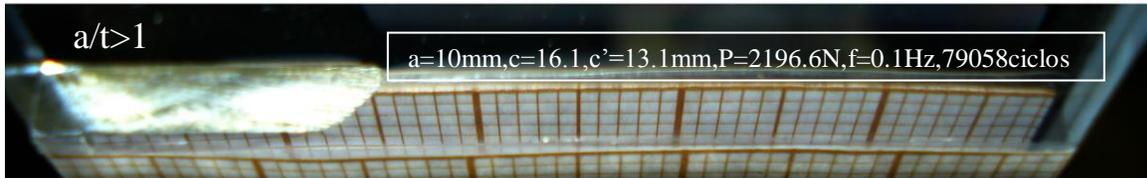
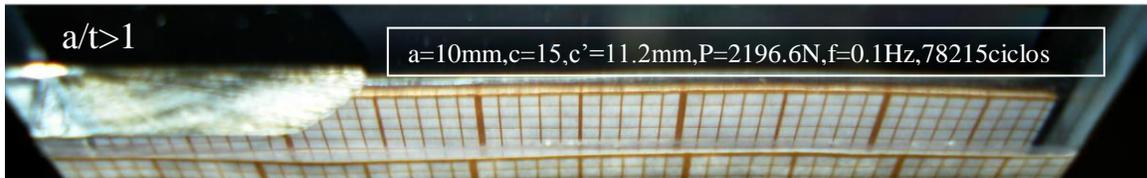
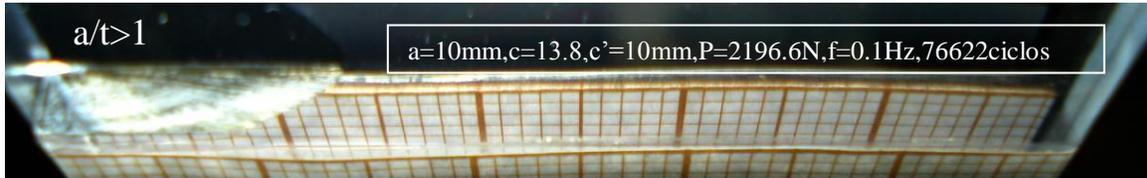
A Figura 5.45 mostra a evolução da trinca bidimensional desde o nascimento dela no corpo de prova C2D-13. Pode-se conferir que independentemente de qual seja a geometria do defeito, (neste caso nos colocamos um defeito linear num dos vértices $a=1.63\text{mm}$ e $c=1.3\text{mm}$), a trinca se inicia 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.









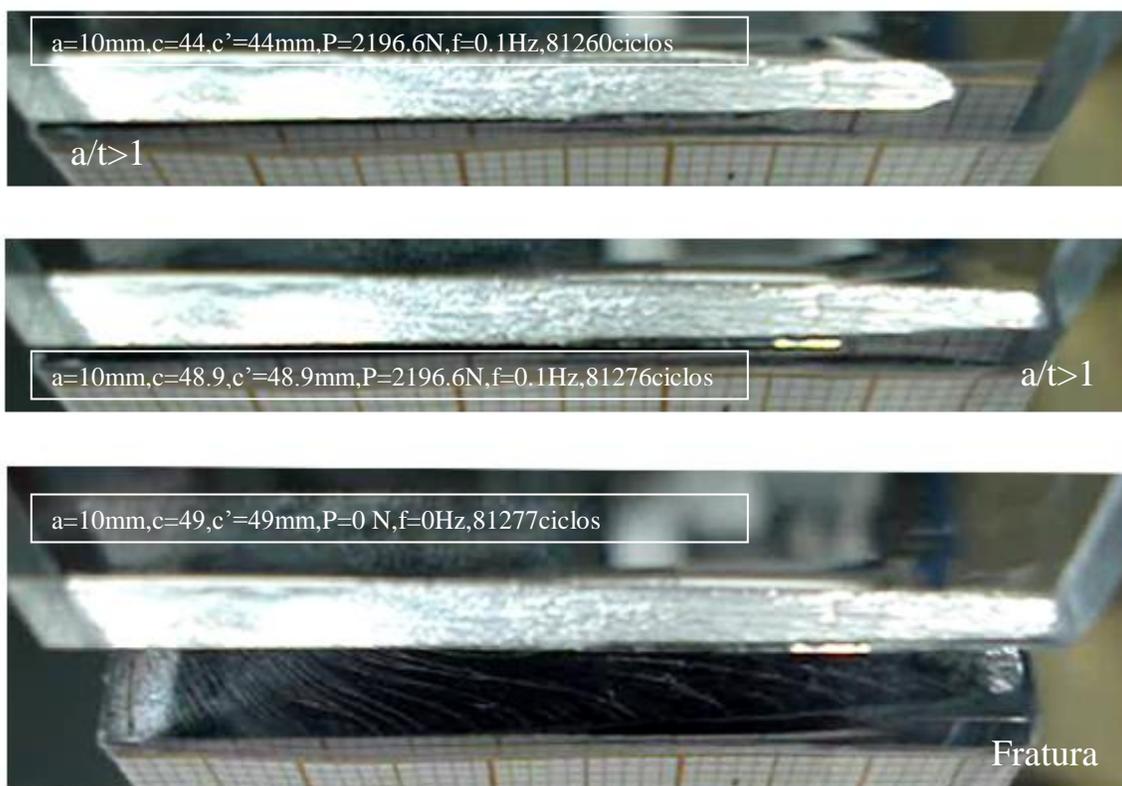


Figura 5.45 – Transição de trinca Bidimensional para Unidimensional por fadiga, C2D-13, Policarbonato, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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' .

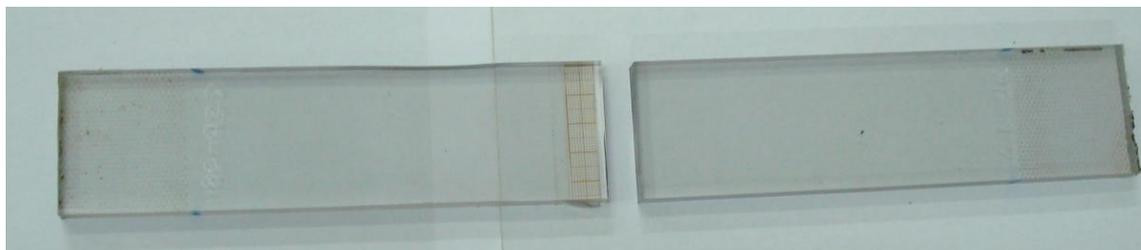


Figura 5.46 – Fratura final de um corpo de prova sob carregamento cíclico trativo, propagação de trinca bidimensional, 81277 ciclos (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

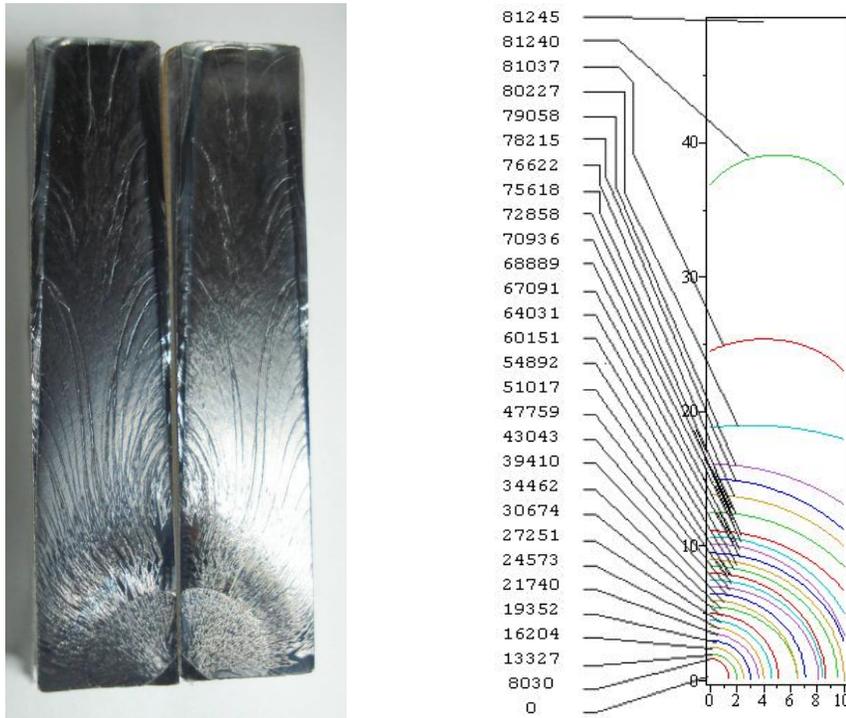


Figura 5.47 – Transição de propagação de trinca bidimensional $a/t > 1$ para unidimensional, C2D-13 com numero de ciclos e geometria feita com dados experimentais da propagação, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

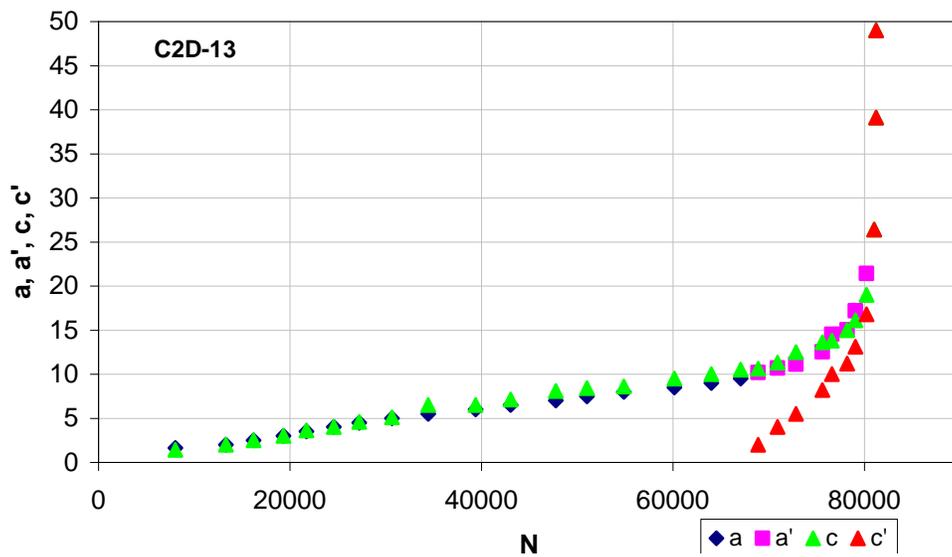


Figura 5.48 – Transição trinca bidimensional para unidimensional, C2D-13

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 .

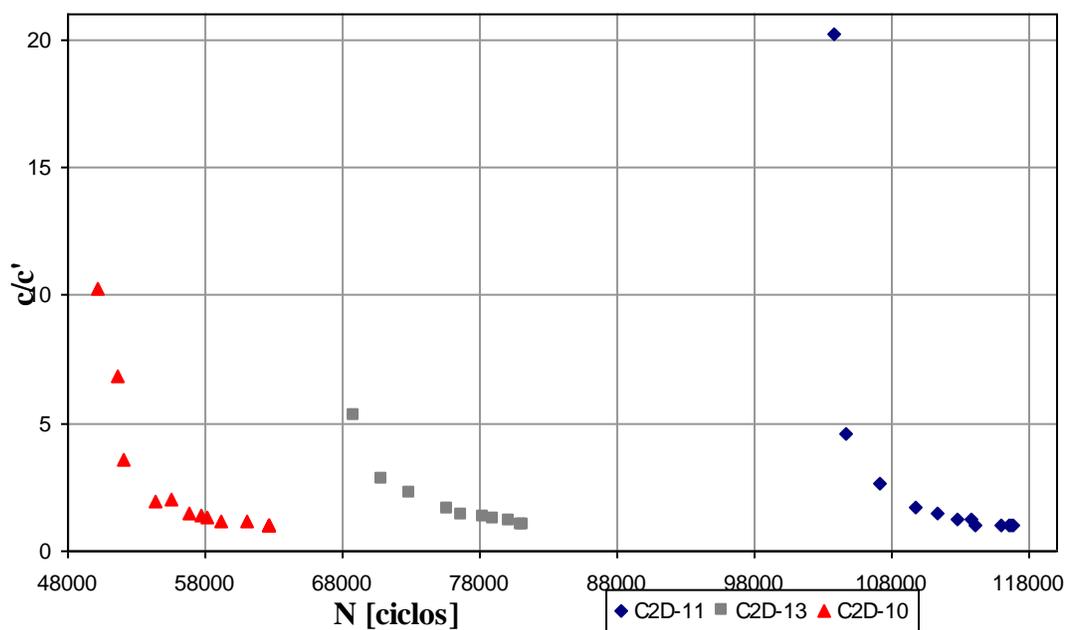


Figura 5.49 – Razões c/c' para diferentes corpos de prova C2D-10, C2D-11, C2D-13, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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.

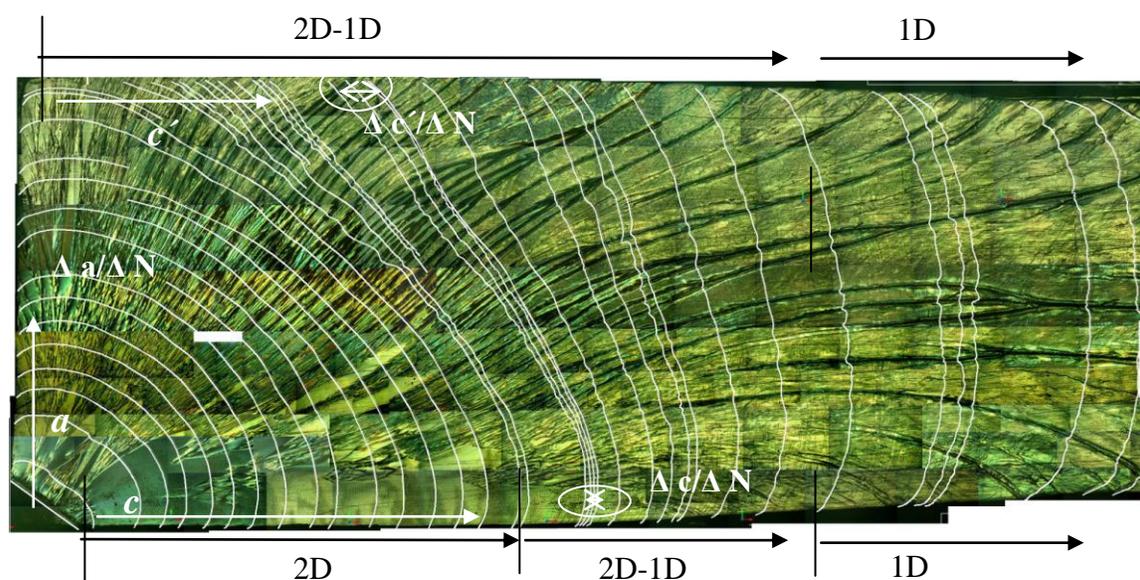


Figura 5.50 – Mosaico de 140 microfotografias mostrando Propagação 2D, Transição da trinca 2D para 1D e propagação 1D, C2D-13 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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 μ m) na transição 2D para 1D, onde $\Delta KI(c')$ (região 2) $>$ $\Delta KI(c)$ (região 2) $>$ $\Delta KI(c)$ (região 1).

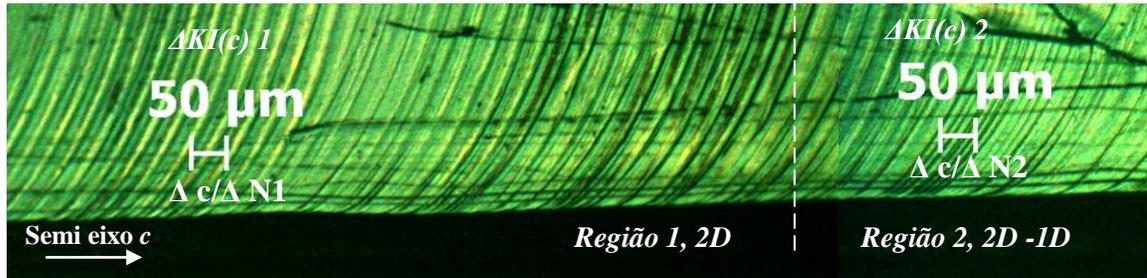


Figura 5.51 – $\Delta K_I(c)$ predominante controla a taxa de propagação dc/dN ao longo do semi-eixo c , C2D-13 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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, $a/t \leq 1$.

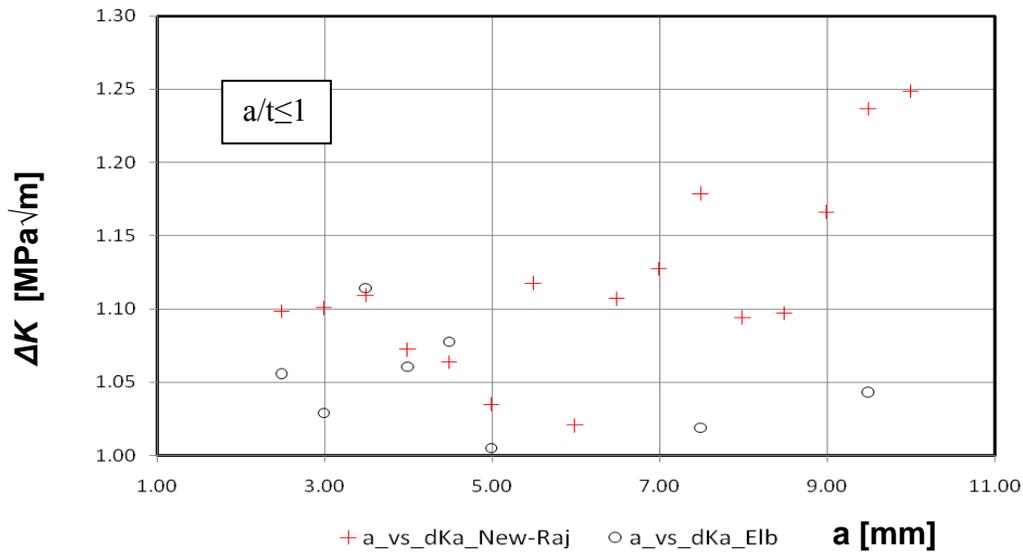


Figura 5.52– a vs, $\Delta K_I(a)$, por Newman-Raju e Experimental ajustados a Elber, C2D-13, $a/t \leq 1$

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, $a/t \leq 1$.

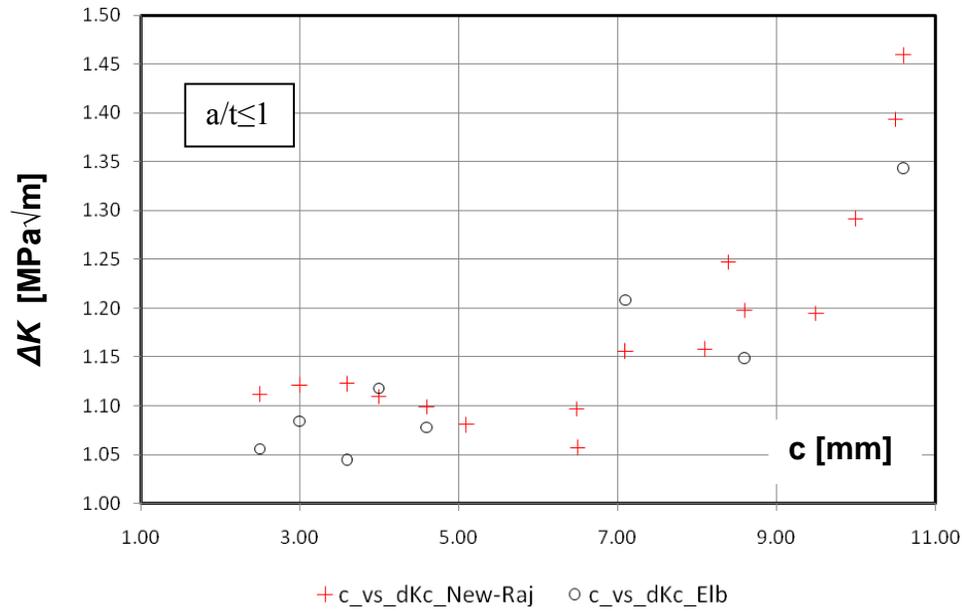


Figura 5.53 – c vs $\Delta K_I(c)$, por Newman-Raju e Experimental ajustados a Elber, C2D-13, $a/t \leq 1$

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.

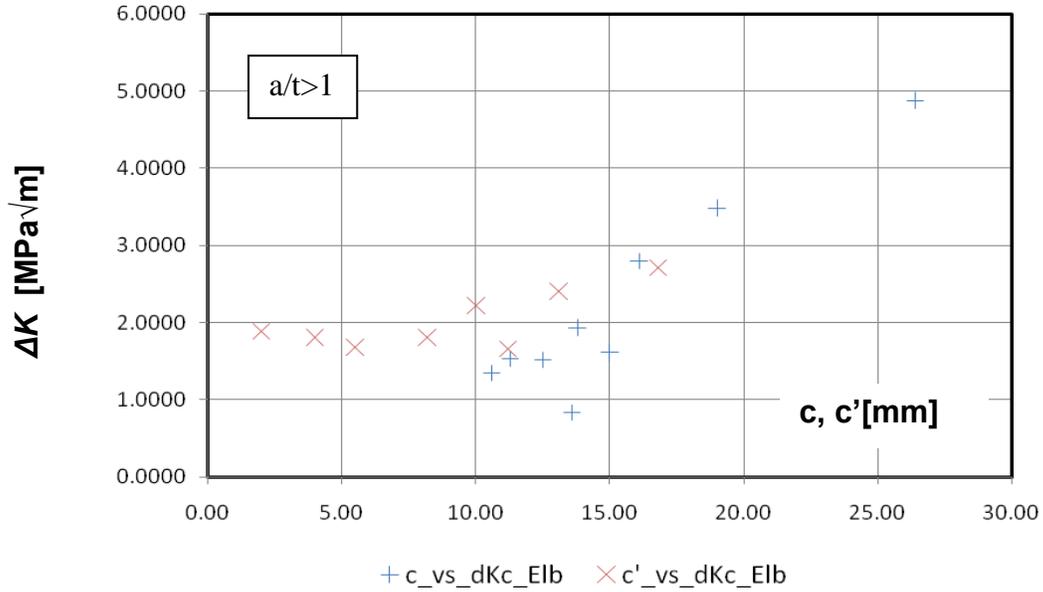


Figura 5.54 – c vs. $\Delta K_I(c)$, c' vs. $\Delta K_I(c')$, Experimental ajustados a Elber, C2D-13, $a/t > 1$

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.

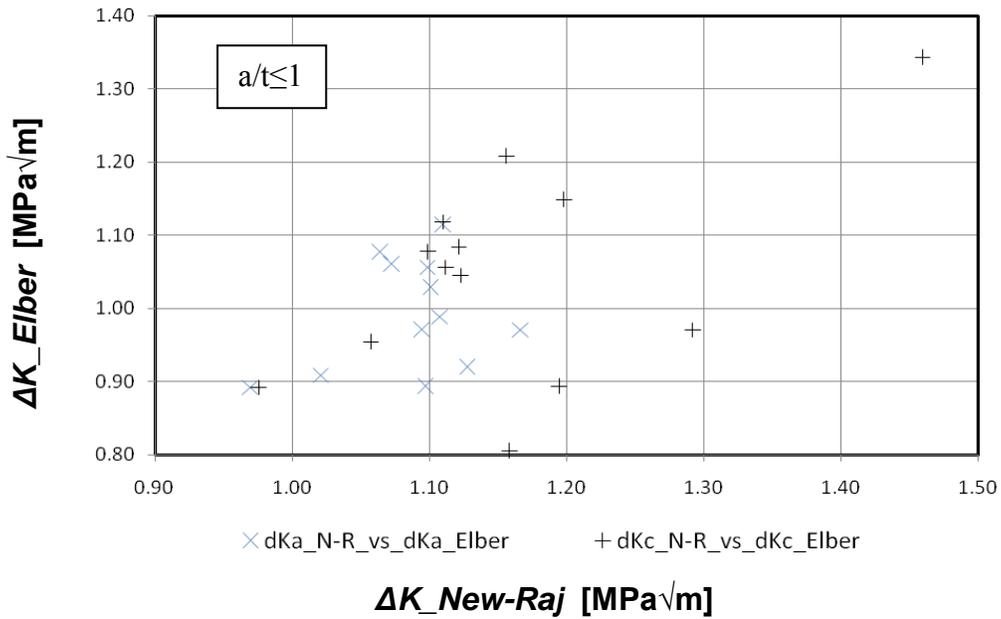


Figura 5.55– $K_I(a)$ e $K_I(c)$ dados experimentais vs calculados, C2D-13, $a/t \leq 1$

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

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

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

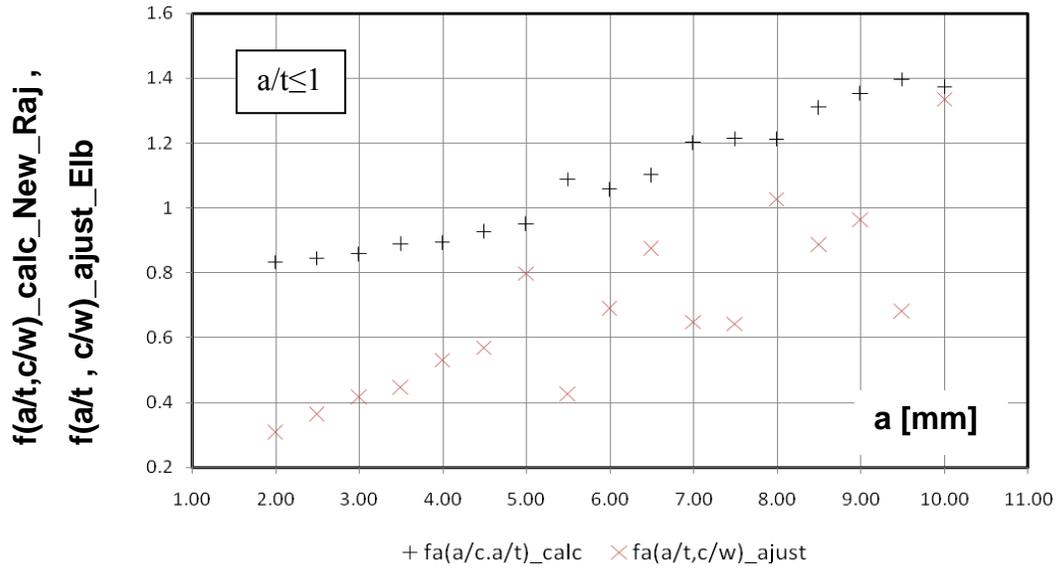


Figura 5.56– $f(a/t, c/w)$ dados experimentais vs calculados, C2D-13, $a/t \leq 1$
 a vs $f(a/t, c/w)_{\text{calc_New_Raj}}$ vs. $f(a/t, c/w)_{\text{ajust_Elber}}$

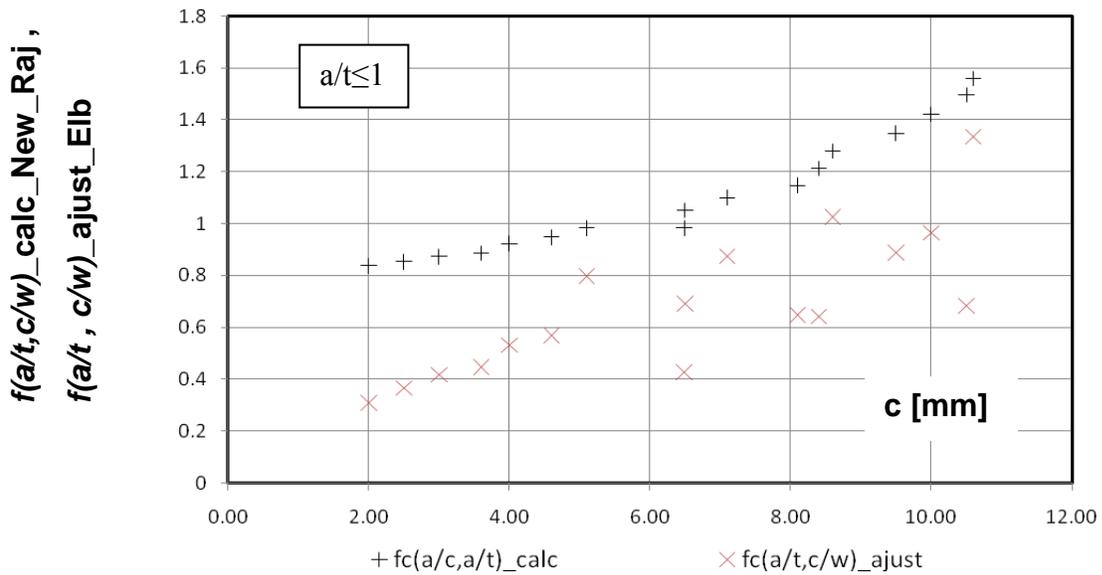


Figura 5.57– $f(a/t, c/w)$ dados experimentais vs calculados, C2D-13, $a/t \leq 1$
 c vs $f(a/t, c/w)_{\text{calc_New_Raj}}$ vs. $f(a/t, c/w)_{\text{ajust_Elber}}$

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.

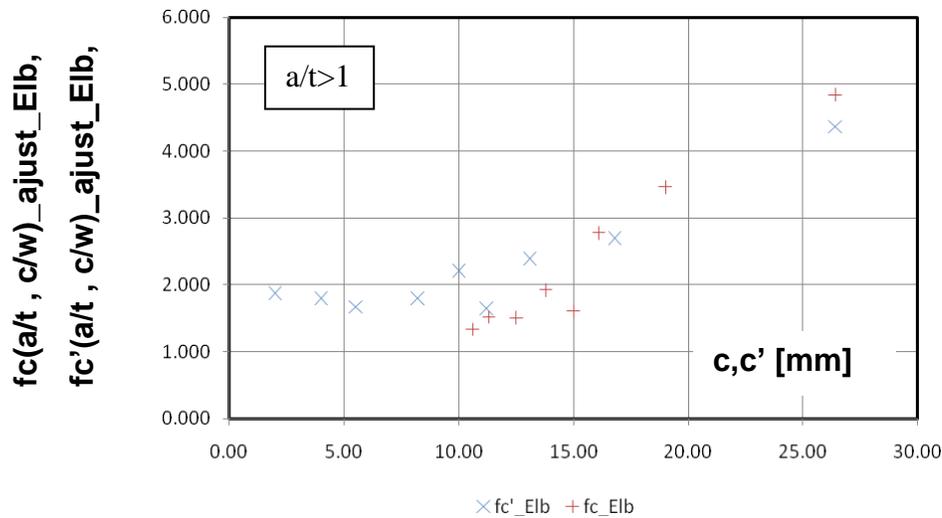


Figura 5.58– $f(a/t, c/w)$ dados experimentais vs calculados, C2D-13, $a/t > 1$
 c e c' vs. $f(a/t, c/w)$ _ajust_Elber

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.

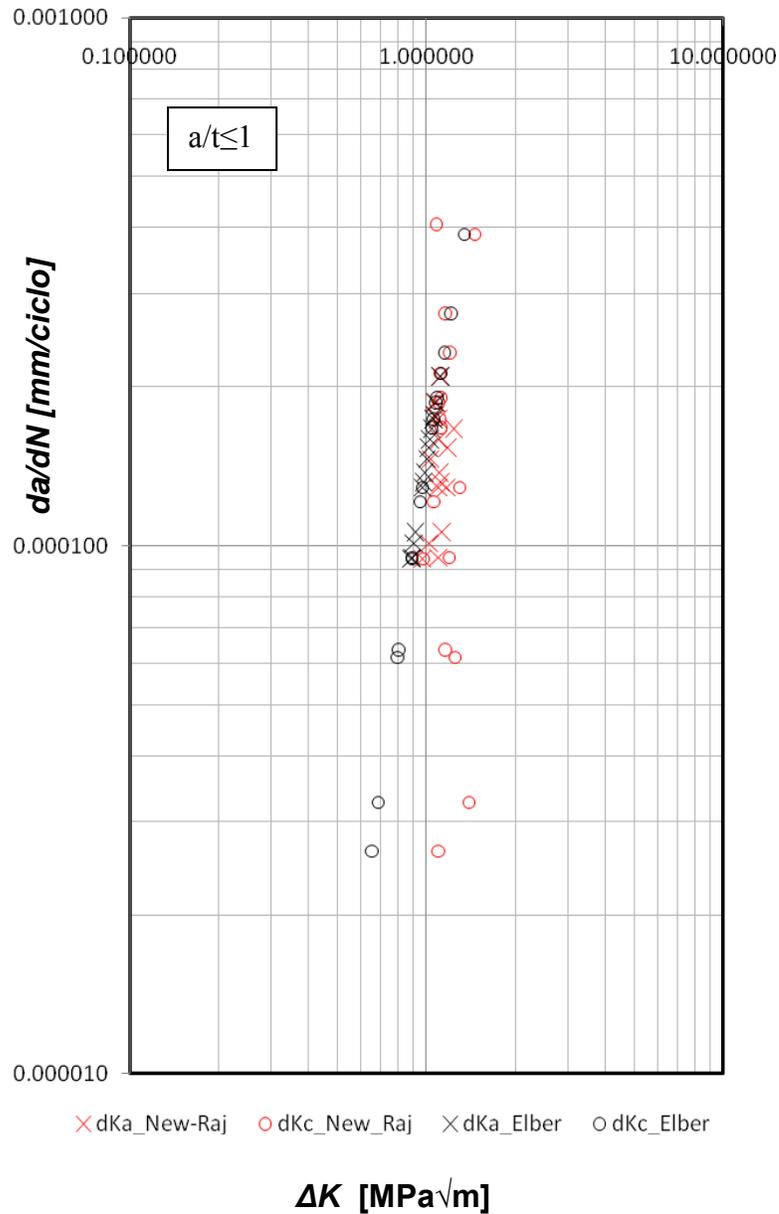


Figura 5.59– Comparação dos ΔK_{exp} e ΔK_{cal} com dados da/dN_{exp} e da/dN_{Elber} usando propriedade a fadiga do policarbonato

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.

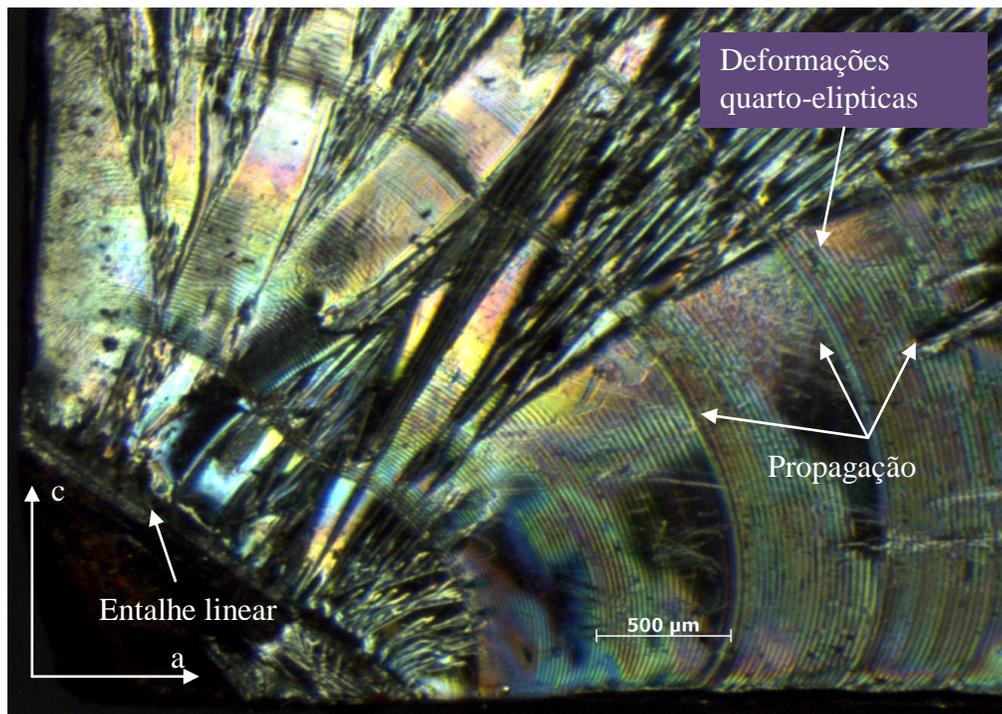


Figura 5.60 – Início da propagação bidimensional para um entalhe linear, fractografia, C2D-13 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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.

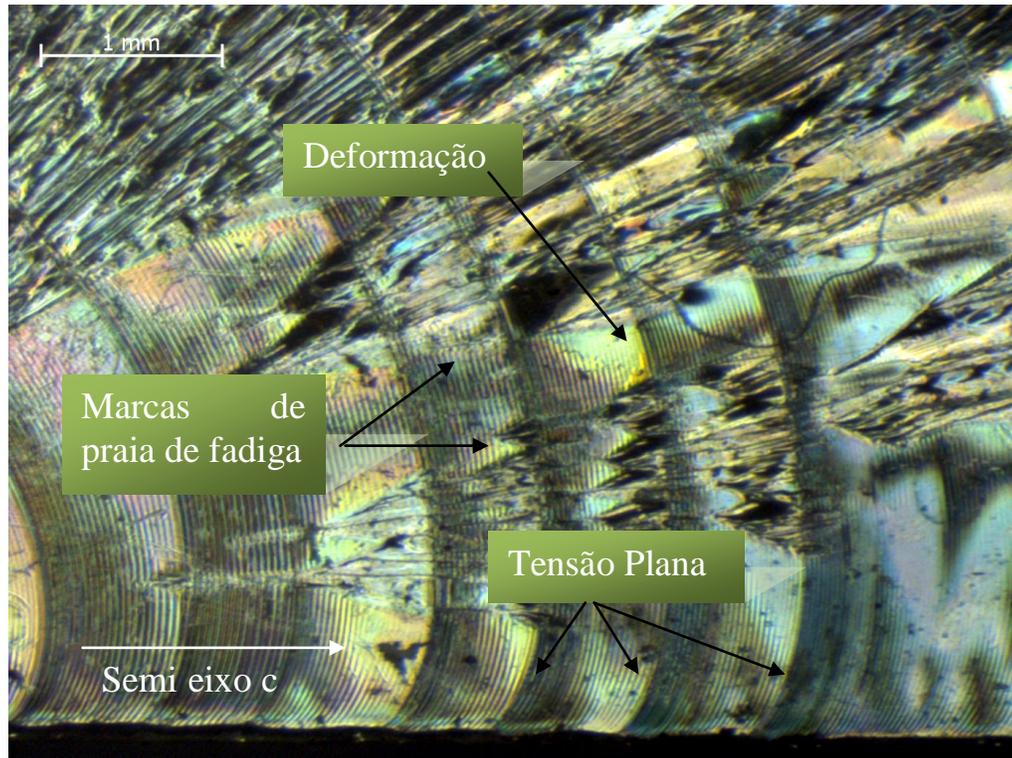


Figura 5.61 – Fechamento sob tensão plana nas faces laterais e deformação plana na profundidade, C2D-13 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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.

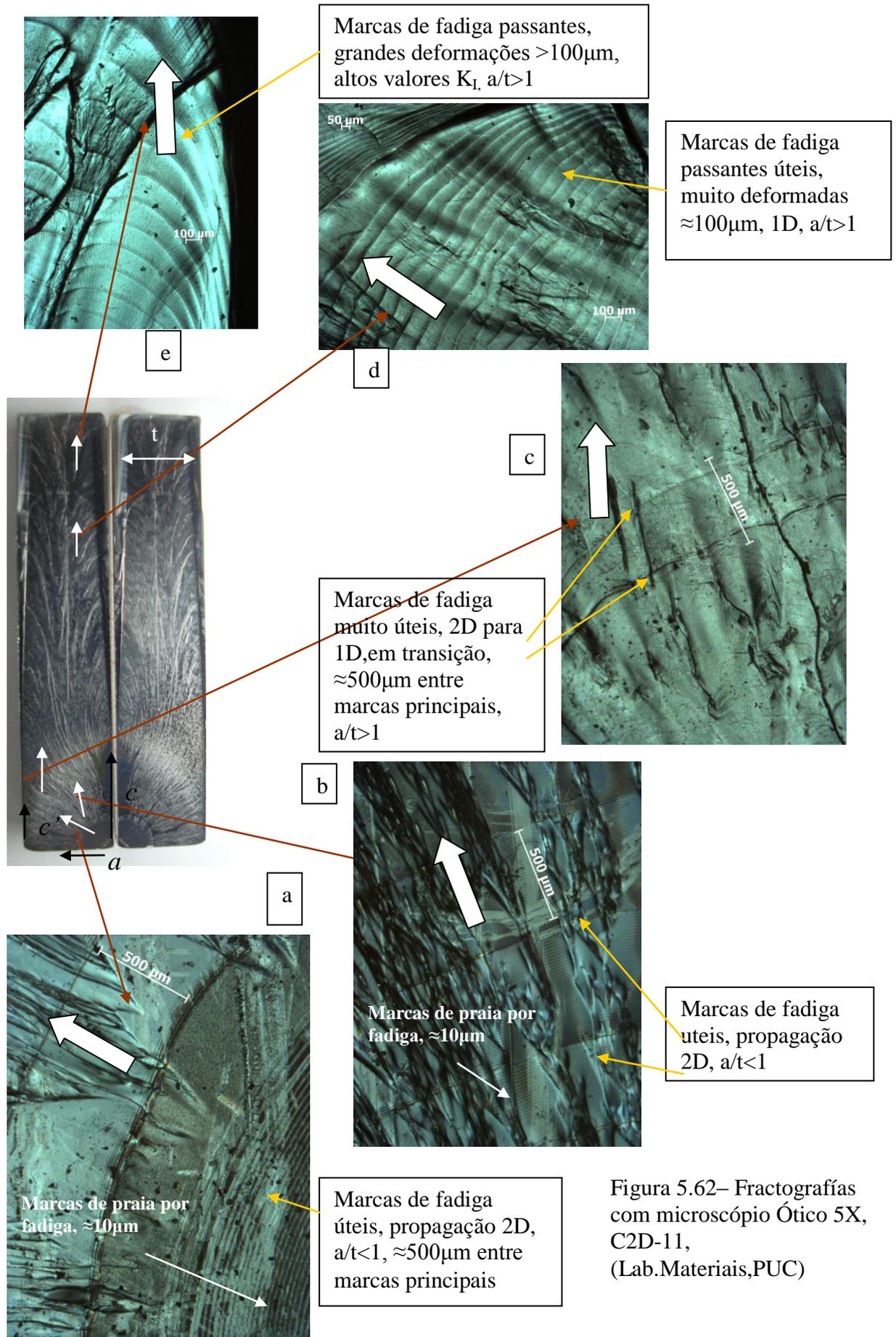


Figura 5.62– Fractografias com microscópio Ótico 5X, C2D-11, (Lab.Materiais,PUC)

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.

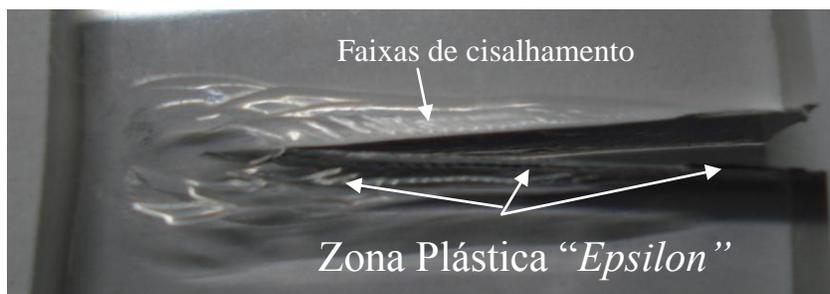


Figura 5.63 – Zona plástica *épsilon* no CP2-01 (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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.

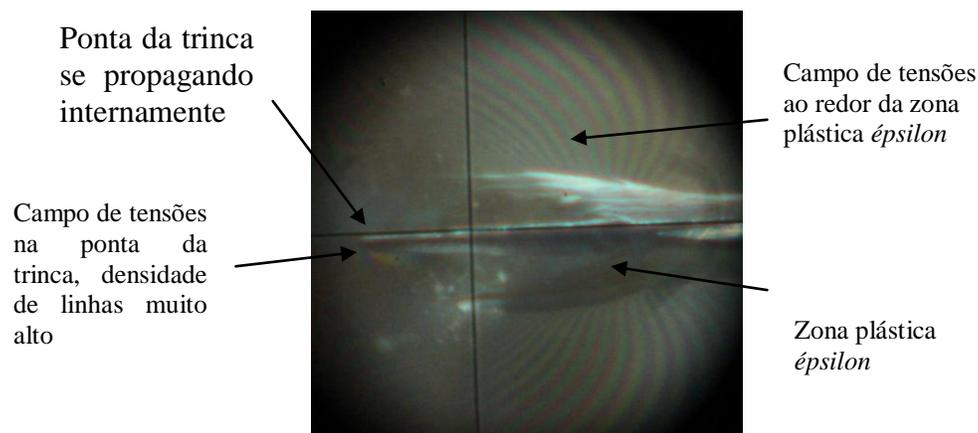


Figura 5.64 – Campo de tensões atuantes na zona plástica *épsilon* no CP2-01 usando técnicas de fotoelasticidade. (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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 ate fraturar o corpo de prova fragilmente.

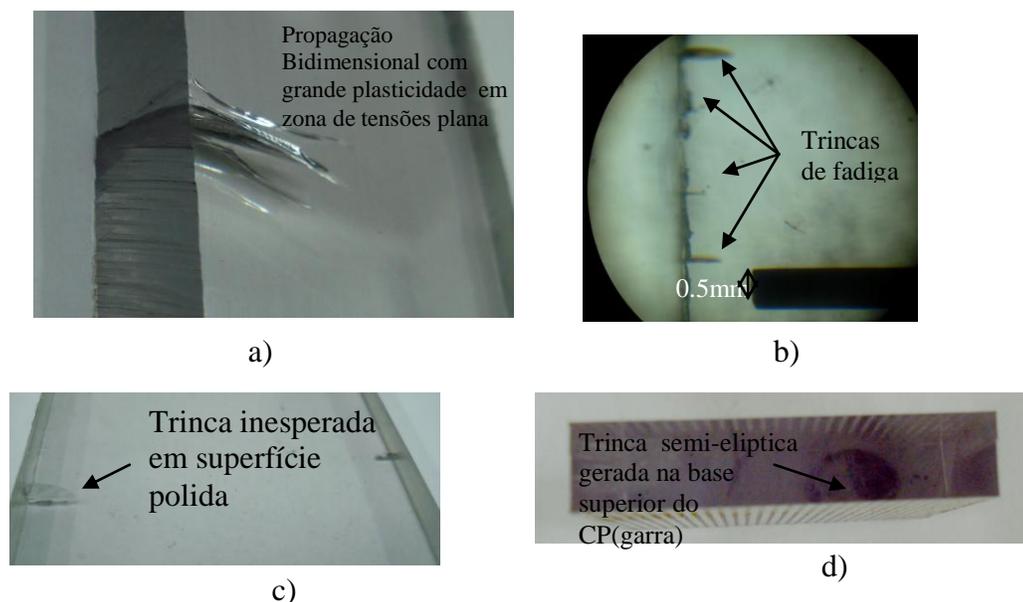


Figura 5.65 – Problemas inesperados na experimentação. a,b,c – Trincas geradas por defeitos que causam concentração de tensões d) Trinca bidimensional na área de sujeição à garra, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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.

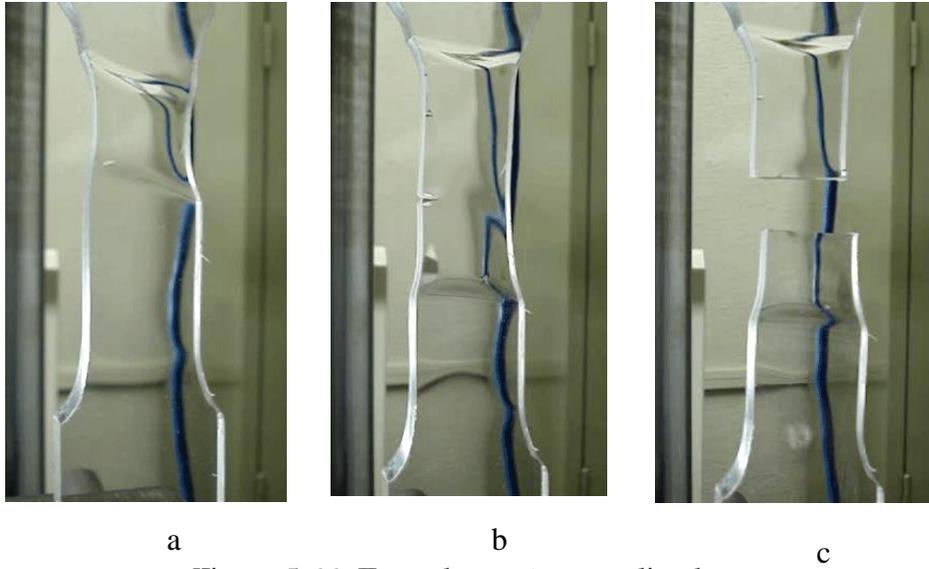


Figura 5.66- Teste de tração em policarbonato

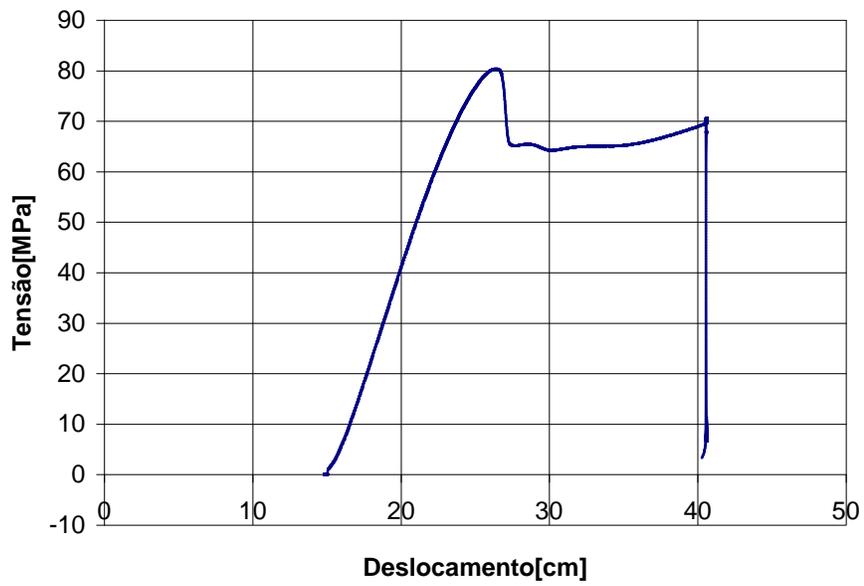


Figura 5.67- Teste de tração em policarbonato