

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.

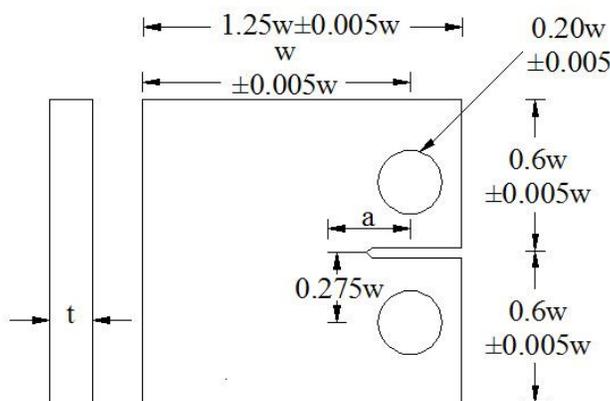


Figura 4.2- Corpo de Prova tipo *Compact Tension* utilizado nos Pre - ensaios de comportamento de material PMMA e PC

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.

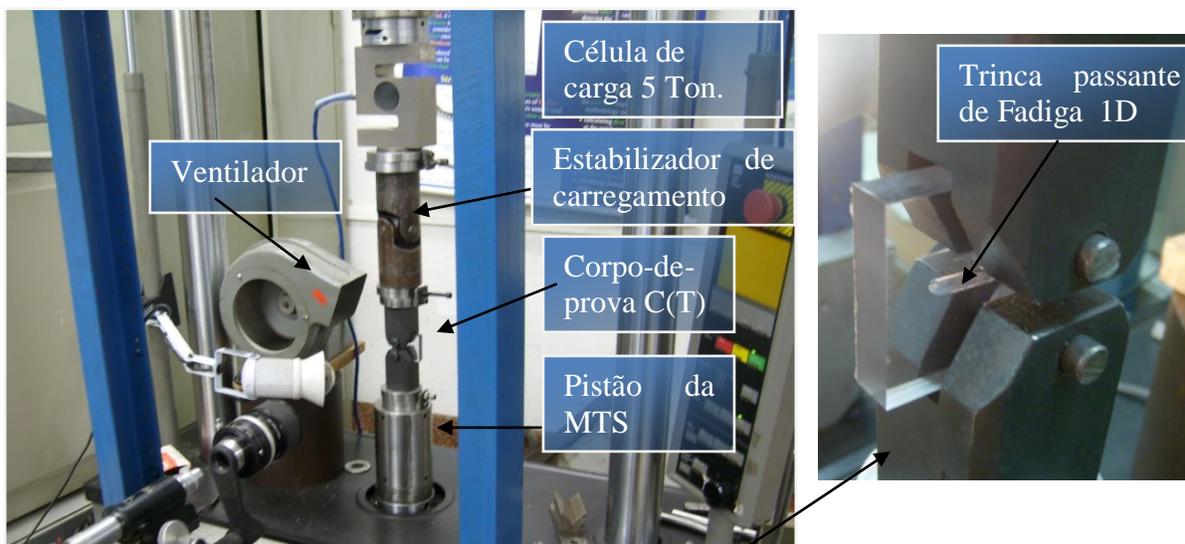


Figura 4.3 – a) Pré-ensaios de fadiga com CPs tipo *Compact Tension* em PMMA e policarbonato montados na MTS b) Corpo de prova CT-PC, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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 .

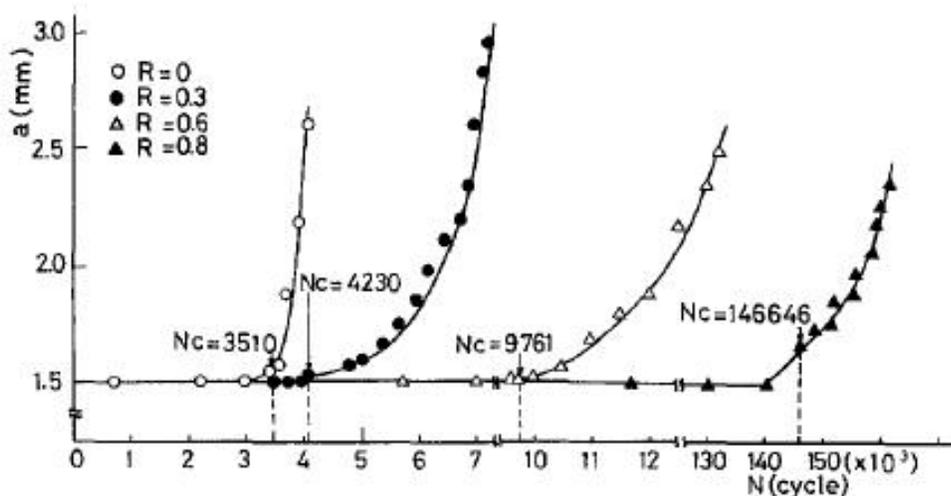


Figura 4.5 – Relação entre o comprimento a e numero de ciclos N para policarbonato tipo Lexan- 9030.

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.

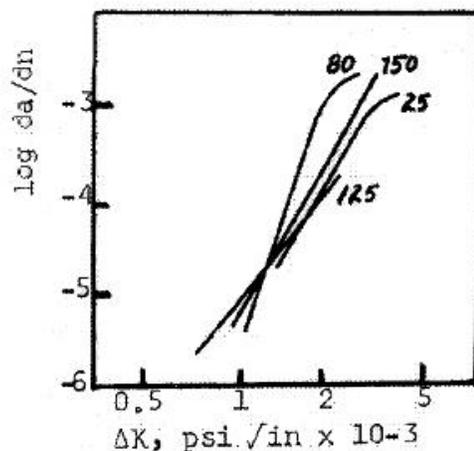


Figura 4.6 – Crescimento de trinca por fadiga para diferentes temperaturas de recozimento (Manson & Hertzberg,1973)

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.

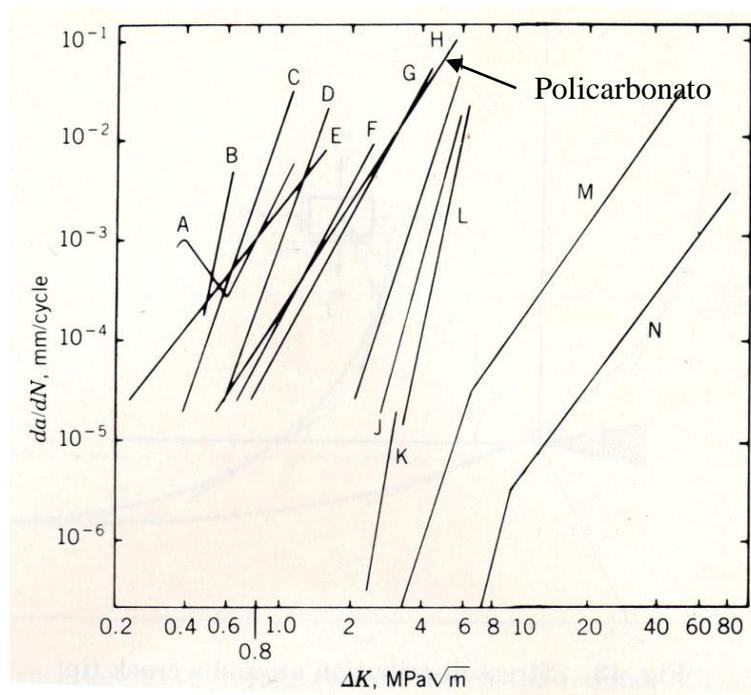


Figura 4.7- Taxas de propagação de trincas por fadiga vs ΔK para vários plásticos e metais. A, LDPE; B, epóxi; C, *poly(methyl methacrylate)*(PMMA); D, *polysulfone*; E, *polystyrene*; F, PVC; G, *poly(phenylene oxide)*(PPO); H, *polycarbonate*; I, *nylon-6,6*; J, *HI-nylon-6,6*; K, *poly(vinylidene 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)

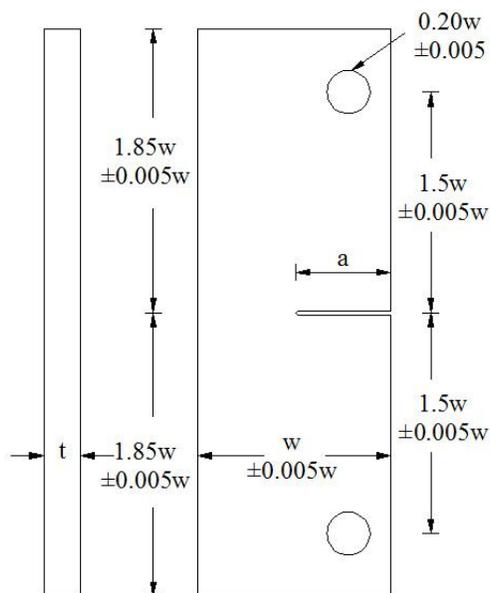


Figura 4.9- ESE(T) - *Eccentrically-Loaded Single Edge Crack Specimen* utilizado no ensaio da/dN para encontrar as propriedades do material a fadiga.

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.

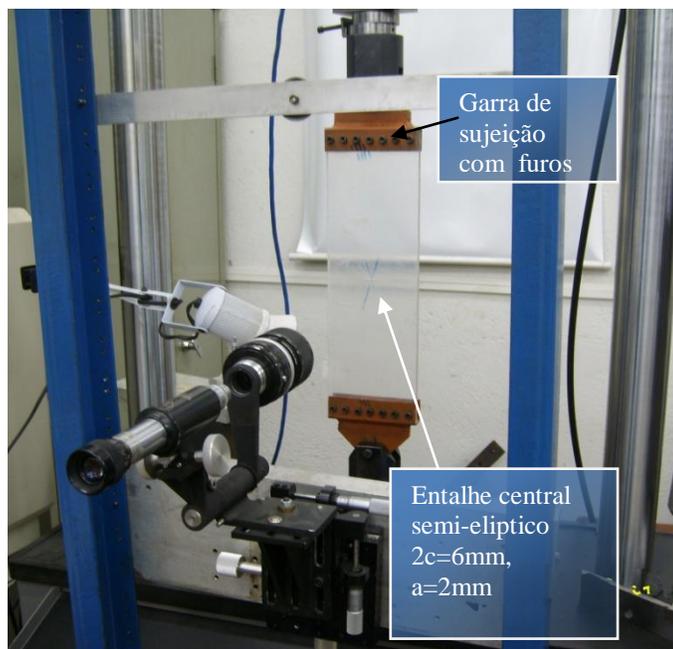


Figura 4.11- Montagem de um corpo de prova com dimensões 10x200x380mm e entalhe semi - elíptico no meio na placa. (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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.

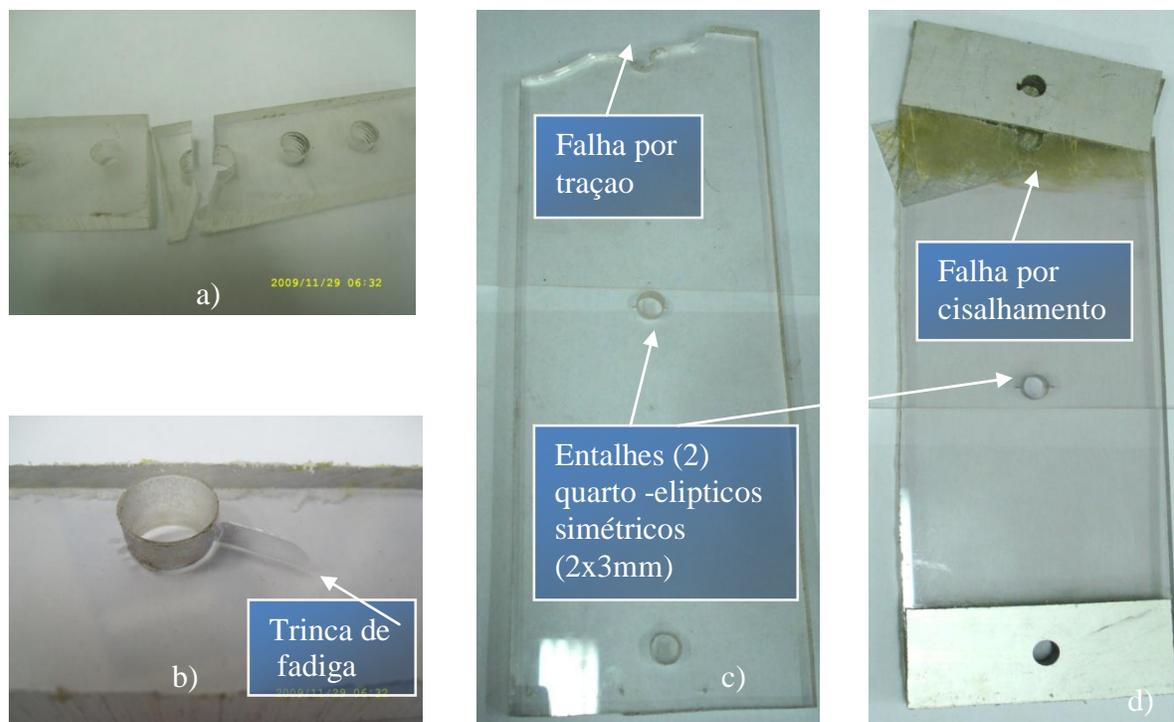


Figura 4.12 – Diferentes problemas encontrados na seleção da geometria do C2D-PC definitivo. a) Extremo de um CPE-02 submetido a carregamento cíclico b) Trinca de fadiga gerada no furo CPE-04 c) CPE-05 com trinca de canto simétrica central d) CPE-07 com reforço de placas de alumínio colado com adesivo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

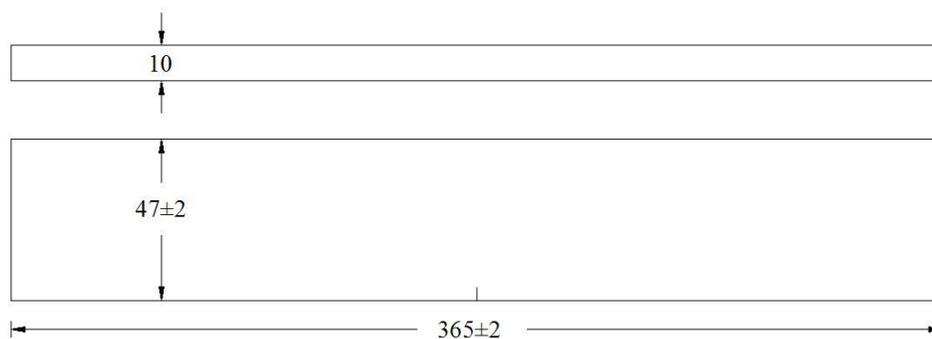


Figura 4.13 – Dimensões do C2D-PC 10x47x365 mm

(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.

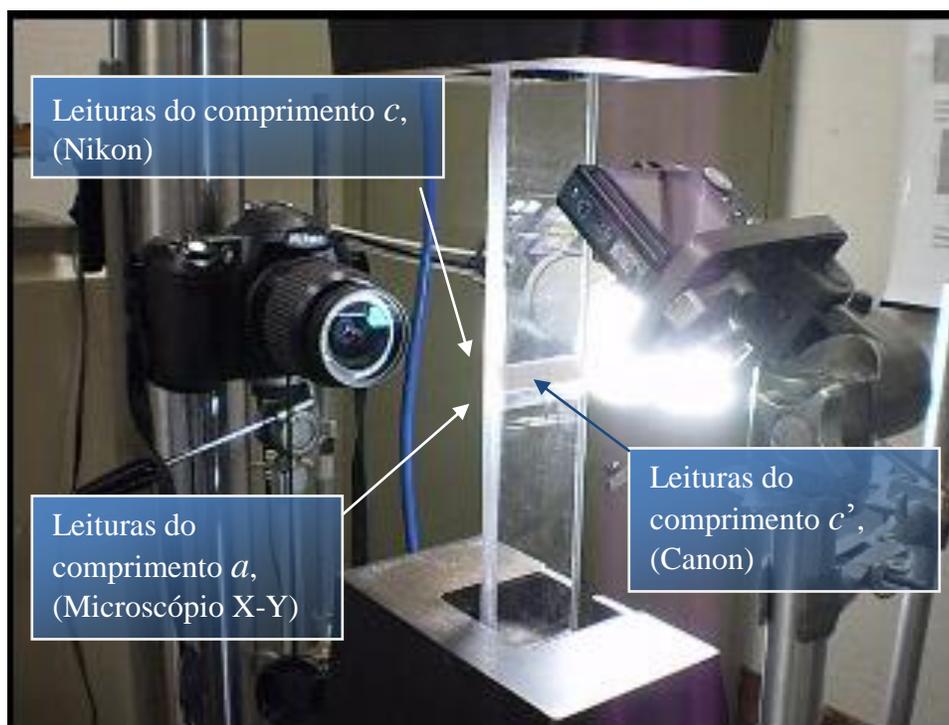


Figura 4.15 – Arranjo de aquisição de dados para os ensaios de propagação bidimensional em trincas quarto – elípticas, (Lab. Fadiga PUC-Rio, 2010)

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.

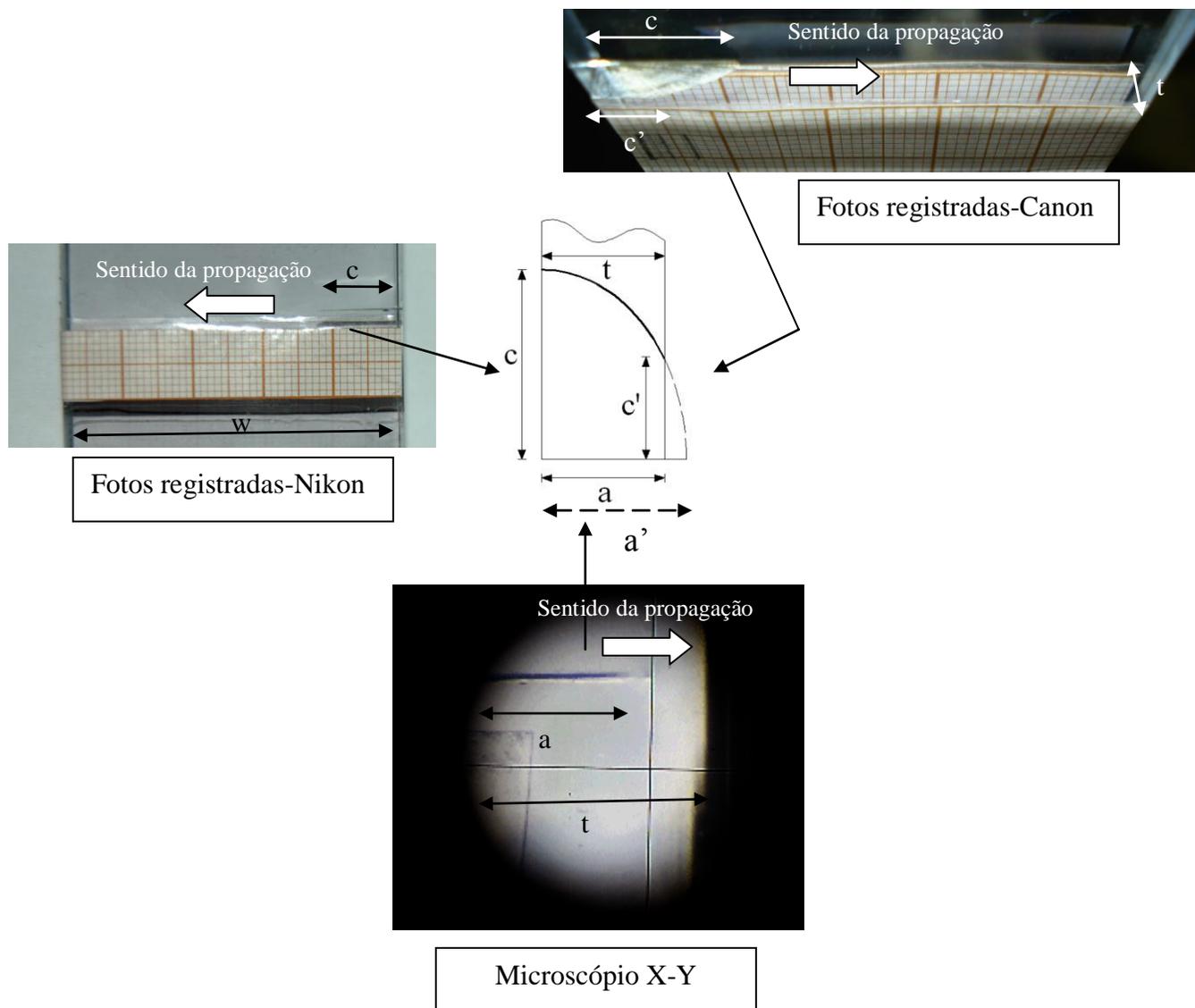


Figura 4.16 - Arranjo dos dados obtidos para cada 0.5 mm de comprimento a .

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)