# 4 Procedimentos e resultados experimentais

Como mencionado no primeiro capítulo desta tese, não foram encontrados na literatura experimentos de propagação de trinca sob condições de fechamento induzido por flexão pura cíclica. As placas trincadas sob essas condições de carregamento envolvem geometrias de frentes de trincas desconhecidas, soluções desconhecidas de fator de intensidade de tensão (FIT) e taxas de crescimentos da trinca também desconhecidas. Neste capítulo são apresentados os experimentos para conhecer a geometria da frente da trinca e coletar dados de taxas crescimento da trinca com fechamento parcial induzido pelo carregamento cíclico de flexão pura.

Neste capítulo, são apresentados o projeto do experimento, a execução, comentários dos resultados experimentais e sugestões para simplificar a geometria da trinca no plano de crescimento.

## 4.1. Corpos-de-prova (CPs)

Uma informação essencial para se projetar um CP à fadiga é estimativa dos FITs. Com essa estimativa é possível determinar o carregamento aplicado e a geometria do CP (dimensões da placa e tamanho do entalhe). No caso dos experimentos desta tese, não se tem qualquer solução conhecida para FIT ou alguma padronização em norma para o problema estudado neste trabalho.

Adicionalmente, os CPs projetados devem ser dimensionados para duas condições de carregamento. A primeira condição de carregamento é a condição de tração. Esse carregamento é usado no pré-trincamento desse CP, garantindo uma trinca reta e passante ao longo da espessura da placa. A segunda condição de carregamento é a condição de flexão pura.

No Laboratório de Fadiga da PUC-Rio, existem garras para o ensaio de tração. Essas garras fixam cada extremidade do CP com um pino.

Consequentemente, deve-se prever furos nos CPs para passar esses pinos. Entretanto, no ensaio de flexão pura, esses furos devem ser externos aos apoios do suporte de flexão. Atendendo essas duas condições, é possível estabelecer o comprimento do CP.

A largura do CP foi definida por limitações impostas pelas dimensões do suporte de flexão (ver Seção 4.2). Essa largura deve ser aproximadamente 100 mm. A espessura do CP foi adotada de acordo com as espessuras comerciais disponíveis no mercado, neste caso, 9 mm. Uma barra chata de aço ASTM A36 com 6000 mm de comprimento x 101.5 mm de largura x 9 mm de espessura atendeu todas essas dimensões. A partir dessa barra chata, foram usinados todos os CPs para ensaios de flexão e ensaios de propriedade do material.

Uma dimensão ainda precisa ser definida: o comprimento do entalhe. Esse comprimento foi estimado na simulação numérica do CP sob carregamento de tração. Essa condição exigia um tamanho de entalhe mínimo para garantir que a trinca ocorresse na ponta do entalhe ao invés de nascer no furo. Essa possibilidade da trinca nascer no furo é decorrência de um diâmetro inferior ao diâmetro sugerido pela norma ASTM E647-00 (2000).

Complementarmente, as análises de carregamento de flexão pura não impõem qualquer restrição ao comprimento do entalhe. Todavia, é conveniente ter o menor entalhe possível, para que a trinca atinja comprimentos longos sob carregamento de flexão pura.

Como a geometria do CP não é padronizada, foram realizadas análises numéricas em programas computacionais de mecânica da fratura. Esses programas determinam deslocamentos e tensões no CP usando o método dos elementos finitos. A partir dos resultados de elementos finitos, obtém-se o FIT.

A condição de carregamento sob tração pode ser simulada em um programa bidimensional de mecânica da fratura. Desta forma, o programa Quebra2D foi usado (Miranda, 2003). Por outro lado, para determinar o FIT no CP sob flexão pura, deve-se utilizar um programa tridimensional, neste caso, o programa usado é o FRANC3D.

Entretanto, quando se projetou os CPs, não era possível propagar a trinca para essa geometria complexa no programa FRANC3D. A geometria da frente da trinca tende a um crescimento mais rápido na região de tensões de tração máximas ocasionadas pelo carregamento. Para gerar essa geometria de frente de trinca no FRANC3D, foram necessárias adaptações no gerador de malha. Essas adaptações ainda não estavam disponíveis no momento em que se projetaram os CPs. Por esta razão, a geometria da trinca foi simplificada. Embora pudesse prever o contato nas faces da trinca, a frente de trinca foi adotada reta e passante ao longo da espessura da placa durante o crescimento da trinca. A função de geometria obtida com esta simplificação está disponível no Apêndice 7. Complementarmente, neste apêndice é feita uma comparação desta função de geometria com as funções de geometria em C obtidas no Capítulo 6 e Capítulo 7 deste trabalho.

Estabelecidas todas as dimensões do CP, foram projetados nove CPs com três geometrias distintas. Essas geometrias são CPs com um entalhe de borda, CPs com dois entalhes de borda e CPs com um entalhe central. Cada geometria apresenta suas vantagens e desvantagens. A vantagem dos CPs com um entalhe de borda é que a trinca sob flexão pura pode atingir comprimentos longos, pois o ligamento residual é maior. Outra vantagem desses CPs é que existe apenas uma frente de trinca para medir nos experimentos. A desvantagem dessa geometria é que se perde a condição de simetria desses CPs em relação a largura da placa w.

Para manter a simetria, foram usinadas outras geometrias de CPs: entalhe central e dois entalhes de borda. Entretanto, houve um erro durante o projeto dos CPs com dois entalhes de borda. Durante o ensaio de pré-trincamento, as trincas nasceram antes nos furos do que na ponta da trinca, por isso eles foram descartados.

Finalmente, foram ensaiados com sucesso cinco CPs. A apresentação desses CPs e dimensões são encontradas na Figura 4.1. O entalhe inicial em cada CP é feito por eletro-erosão. Em resumo, as dimensões dos CPs com entalhe central são aproximadamente 660 mm de comprimento x 101.5 mm de largura x 8.8 mm de espessura, com um entalhe (2a) de comprimento de aproximadamente 34 mm. Para os CPs com um entalhe de borda, as dimensões são aproximadamente de 620 mm de comprimento x 101.5 mm de largura x 8.8 mm de espessura, com um entalhe de borda, as dimensões são aproximadamente de 620 mm de comprimento x 101.5 mm de largura x 8.8 mm de espessura, com um entalhe de borda, as dimensões são aproximadamente de 620 mm de comprimento x 101.5 mm de largura x 8.8 mm de espessura, com um entalhe (a) de aproximadamente 10 mm.

Um esquema da posição do CP em relação ao aparato de flexão é apresentado na Figura 4.2. A posição dos quatro apoios é a mesma em todos os experimentos de flexão pura.



Figura 4.1 – Geometria dos CPs com dimensões em milímetros: (a) um entalhe central e (b) um entalhe de borda.



Figura 4.2 – Esquema das configurações das placas com dimensões em milímetros: (a) um entalhe central e (b) um entalhe de borda.

Dos cincos CPs ensaiados, três deles tinham um entalhe de borda e dois tinham um entalhe central. A largura exata, espessura e comprimento do entalhe são relacionados na Tabela 4.1. Os corpos-de-prova CP03 e CP02 correspondem à imagem na Figura 4.2 (a), enquanto os corpos-de-prova CP01, CP06 e CP07 correspondem à imagem na Figura 4.2 (b).

Tabela 4.1 – As dimensões exatas dos CPs, condições iniciais: (a) entalhe central; e (b) entalhe de borda.

	Corpo-de-prova	largura		entalhe		t	a* / w
		(mm)		(mm)		(mm)	
	CP03	,	101.6		35.0	8.8	0.34
(a	CP02	2w	101.5	2a	34.2	8.8	0.34
	CP01		101.4		9.95	8.8	0.10
(q)	CP06	И	101.5	а	10.65	8.7	0.10
	CP07		101.4		12.64	8.8	0.12

Note que  $a^*$  é o comprimento do entalhe antes do ensaio de pré-trinca. O entalhe era passante e reto ao longo de toda a espessura dos CPs.

## 4.2. Suportes para o ensaio de flexão

Inicialmente, foram usados suportes de flexão disponíveis no laboratório do Instituto Tecnológico da PUC-Rio (ITUC). Contudo, existiam incertezas oriundas de uma posição insatisfatória dos apoios desse suporte em relação ao CP. Os experimentos preliminares executados nesses suportes serviram como motivação para se elaborar um suporte de flexão a quatro pontos.

## 4.2.1. Motivação

Dois diferentes suportes de flexão foram usados nos ensaios preliminares desta tese, ver Figura 4.3. Para o caso de flexão pura não se tem qualquer garantia do paralelismo entre entalhe do CP e roletes (pontos de apoios e carregamentos).

Além disso, o CP podia se movimentar durante o experimento, por causa do giro do pistão.



(a)



(b)

Figura 4.3 – Acessórios (a) ensaio em três pontos e (b) ensaio em quatro pontos.

Devido a essa posição insatisfatória do CP, a propagação da trinca pode ser submetida a carregamentos desconhecidos, ocasionando outros modos de abertura da trinca. Por exemplo, na Figura 4.4 é ilustrada a superfície da trinca de fadiga obtida no experimento ilustrado na Figura 4.3 (b).

A trinca de fadiga deve ser plana quando submetida apenas a carregamentos de flexão pura. Entretanto, a geometria observada não exibe um plano. Para se obter melhores resultados experimentais, foram projetados e usinados aparatos especialmente para o ensaio do crescimento de trinca sob carregamento de flexão pura.



Figura 4.4 - Superfície da trinca de fadiga, usando o aparato ilustrado na Figura 4.3 (b).

## 4.2.2. Novos acessórios

O aparato de flexão foi usinado em aço ASTM A36. O perfil W fabricado pela companhia Aço Minas foi usado, reduzindo o peso do suporte (17.5 kg a parte inferior e 14 kg a parte superior). Essa redução de peso facilitou a montagem e desmontagem do experimento.

O aparato inferior tem vão entre os apoios de 515 mm, limitado pelo quadro da máquina Instron. Já no aparato superior, o vão entre os apoios é 385 mm. A configuração esquemática do aparato e posição do CP é ilustrada na Figura 4.5.



Figura 4.5 - Configuração esquemática do aparato de flexão com dimensões em milímetros.

O perfil W apresenta outra vantagem, as mesas desse perfil servem como guias para os apoios (ver Figura 4.6). Elas propiciam o paralelismo entre todos os quatro apoios desse suporte ao longo do comprimento do perfil metálico. Sobre esses apoios estão os roletes, que são os apoios ou pontos de carregamento do CP. O paralelismo dos roletes é assegurado com esses apoios paralelos. Além desse paralelismo, deve-se proporcionar uma posição paralela entre o entalhe do CP e roletes. Por esta razão, foram usinadas guias em L. Essas guias fixas nos roletes e apoios se encaixam perfeitamente a largura (w) do CP. Desta forma, pode-se confiar que o carregamento aplicado ocasiona apenas flexão pura.

As guias em L também evitam que o pistão da máquina Instron gire (ver Figura 4.7). Entretanto, limitam a largura do CP a aproximadamente 102 mm. Foram tomados alguns cuidados com a flexibilidade desta guia L, como cobrir as guias L com fitas de neoprene e colocar arruelas nos parafusos.



Figura 4.6 – Guia de ligação da base do apoio com perfil metálico e guia em L para acomodar o CP.



Figura 4.7 – Guias em L evitaram giro da parte inferior do aparato de flexão.

Durante a execução do experimento foram necessários alguns ajustes. Primeiramente, folhas de aço foram usadas para assegurar o contato entre rolete e CP (ver Figura 4.7). Por causa disso, uma ou duas guias em L foram removidas e substituídas por elásticos. Também foram usados esbarros nas extremidades do CP para remover movimentos de corpo-rígido. Esse esbarro é ilustrado na Figura 4.8. Note que foi mantida uma folga entre esbarros e roletes.



Figura 4.8 – Esbarros nas extremidades do CP.

## 4.3. Propriedades do material

O material usado nestes experimentos foi o aço ASTM A36. Esse aço é um material tipicamente usado na construção civil, por exemplo, pontes e edificações. As propriedades mecânicas e propriedades de fadiga desse aço foram levantadas em ensaios. Por sua vez, os ensaios foram conduzidos de acordo com a ASTM E8M – 04 (2004) e ASTM E647-00 (2000).

O material ensaiado provém da mesma barra chata que deu origem aos CPs de flexão pura. A seguir, na Tabela 4.2 são apresentadas as propriedades mecânicas do aço.

As propriedades de fadiga foram medidas em CPs compactos (C(T)) sob carregamento de tração. A curva da/dN da primeira amostra de material, ajustada com a equação de Elber modificado (Apêndice 2), é

$$\frac{da}{dN} = 1.53 \cdot 10^{-10} \left[ \Delta K - 7 \left( 1 - 0.1 \right) \right]^{2.23}, \tag{4.1}$$

onde a taxa de crescimento da trinca da/dN é obtida em m/ciclos e  $\Delta K$  em MPa $\sqrt{m}$ .

Propriedades do material	Valores
Tensão de escoamento, $\sigma_{_{yld}}(\mathrm{MPa})$	304
Tensão máxima de tração, $\sigma_{\scriptscriptstyle ult} \left( { m MPa}  ight)$	450
Módulo de elasticidade, <i>E</i> (GPa)	211
Tensão de ruptura, $\sigma_{ m f} \left( { m MPa}  ight)$	315
Coeficiente de Poisson, v	0.3

Tabela 4.2 – Propriedades de engenharia do material aço ASTM A36.

Na segunda amostra de dados para curva da/dN, o melhor ajuste dos dados foi com a equação de Hall com 4 parâmetros. Assim, o ajuste da média dos dados tem curva da/dN é igual a

$$\frac{da}{dN} = 9.702 \times 10^{-13} \Delta K^{2.975} \left( \frac{\Delta K - \Delta K_{th} \left( 1 + 0.42R \right)}{\left( 1 - R \right)} \right)^{0.683}.$$
 (4. 2)

usando o método de minimização de Levenberg-Marquardt. Note que  $\Delta K_{th}$  é 8 MPa $\sqrt{m}$  e R = 0.1. Complementarmente, estes dados foram ajustados com a lei de Paris por

$$\frac{da}{dN} = 3.029 \times 10^{-3} \Delta K^{3.955} \,. \tag{4.3}$$

Assumindo uma distribuição Gaussiana e uma confiabilidade de 97.72%, tem que

$$\frac{da}{dN} = 2.687 \times 10^{-13} \Delta K^{3.576} \left( \frac{\Delta K - (1 - 76.915R)}{(1 - R)} \right)^{0.292}, \quad (4.4)$$

onde R = 0.1.

## 4.4. Descrição do experimento

Uma máquina de teste servo-hidráulica universal modelo 8501 Instron foi usada na execução dos ensaios de fadiga. A máquina tem um painel de controle digital Instron (modelo 8500+) e uma célula de carga com uma capacidade de 100 kN (10 tf) sob condições dinâmicas de carregamento.

Nessa máquina foram conectadas as garras para o ensaio de tração cíclico para o pré-trincamento da placa. Os detalhes desse ensaio são descritos no Apêndice 3 desta tese. Ao final do experimento de pré-trincamento, obteve-se uma frente de trinca passante reta ou quase reta. Esse ensaio é ilustrado na Figura 4.9.

Depois do ensaio de pré-trincamento, os CPs foram colocados no aparato de flexão, ver Figura 4.10 (a). O carregamento aplicado foi senoidal com uma razão de tensão R = 0.1 e frequência 12 Hz. Durante todo o experimento, esse carregamento foi acompanhado em um osciloscópio. Adicionalmente, para se conferir os carregamentos que atuavam na placa, foram feitas aquisições das deformações durante o experimento.

Os comprimentos de trincas também foram continuamente coletados durante o experimento. A superfície superior e inferior do CP foi polida para se visualizar claramente a ponta da trinca, já que a aquisição desses comprimentos de trinca foi feita com um método visual. Essa configuração completa do experimento de flexão é ilustrada na Figura 4.10 (b).

Para todos os comprimentos de trinca, foi verificado se poderia ocorrer falha por colapso plástico na região de ligamento da placa. Antes que essas falhas ocorressem, o experimento foi interrompido. Então, os CPs foram quebrados em nitrogênio líquido e, nesse momento, conheceu-se a geometria da frente da trinca ao longo da espessura da placa.

Ao final do primeiro experimento (efetuado com taxas de crescimento constantes ou crescentes), não foram visualizadas estrias na superfície da trinca de fadiga para o aço ASTM A36.

Como o propósito deste experimento é investigar a geometria da trinca durante o crescimento sob carregamento de flexão pura, foram aplicados blocos de sobrecargas e blocos de subcargas para marcar as frentes de trincas em intervalos discretos de ciclos. Esse método é explicado brevemente a seguir. Mais detalhes desse método são encontrados em Schijve (2009), por exemplo.



Figura 4.9 – Experimento de pré-trincamento: (a) um entalhe de borda, (b) um entalhe central.



(a)



(b)

Figura 4.10 - Experimento: (a) Aparatos de flexão e CP; (b) Vista do experimento.

## 4.5. Aquisição de dados

A maioria dos métodos de aquisição de comprimento de trinca encontrados na literatura usa potencial elétrico, medição de flexibilidade do CP, marcas de estrias, marcas de praia ou método visual. No método de potencial elétrico e no método de medição de flexibilidade do CP é adotada a hipótese que o comprimento da trinca é igual à média da distribuição de comprimentos na frente da trinca ao longo da espessura. Uma hipótese satisfatória para uma frente de trinca essencialmente passante e reta ao longo da espessura da placa. Contudo, as frentes investigadas nesta tese são variáveis ao longo da espessura.

As marcas de estrias no material ASTM A36 foram testadas no primeiro CP ensaiado, mas não trouxeram resultados satisfatórios para se extrair marcas de frentes de trincas. Assim, foram aplicados blocos de sobrecarga e subcargas para se marcar a superfície da trinca. Essas marcas são chamadas por marcas de praia. Por causa do carregamento, esses comprimentos de trinca são diferentes ao longo de toda a espessura, inclusive nas superfícies da placa. Essas marcas de praia podem ser associadas às medidas de comprimento feitas na superfície superior e inferior da placa pelo método visual.

Assim, nesta tese, foram utilizados esses dois métodos de aquisição de dados: medidas visuais do comprimento da trinca na superfície e marcas de blocos de carregamento cíclico. Adicionalmente, foram coletadas as deformações nas superfícies da placa. Nesta seção são apresentadas com detalhes as três aquisições de dados realizadas durante ou após o experimento.

Com esses dados é possível conhecer a geometria da trinca sob um carregamento de fadiga a flexão pura, coletar dados de vida e confiar no carregamento que induz o crescimento da trinca.

### 4.5.1. Medidas do comprimento da trinca

Como a placa é de aço, durante o experimento, só se coleta medidas nas superfícies da placa. Assim, apenas as extremidades da frente da trinca são continuamente medidas. Essas duas extremidades podem ser chamadas de ponto *A*  e ponto *B*, respectivamente, localizados na superfície superior e inferior da placa (ver Figura 4.11 (a)). Complementarmente, um esboço da mudança do comprimento da trinca quando submetida à flexão pura é ilustrado na Figura 4.11 (b).



Figura 4.11 – Aquisições do comprimento da trinca no ponto  $A \in B$ : (a) configuração inicial; (b) durante ensaio.

A região de crescimento da trinca foi iluminada por uma luz de fibra ótica. Os registros de comprimento da trinca nas superfícies foram medidos por incrementos do tamanho da trinca. Para tanto, dois micrômetros e dois microscópios foram utilizados. Com esses microscópios também foram feitas documentações com fotos do comprimento da trinca. Um pedaço de papel milimetrado foi colado em ambos os lados do CP, servindo como escala nessas fotos. Cada foto foi associada ao número de ciclo acumulado e serve como comparação para as medições efetuadas pelo micrômetro.

A altura dos apoios limitou a altura máxima desses microscópios. Eles tinham que ser posicionados sobre a mesa do perfil metálico e algum aparato de medição deveria ser acoplado a esse microscópio. Uma maneira de visualizar a trinca era captar as imagens das extremidades da trinca em uma tela de computador. Para tanto, esses microscópios deveriam ter cabo USB.

O microscópio que atendeu a todas essas necessidades foi um microscópio plano (*flat design*) digital USB da *Cover Ground Electronics Co*. (http://www.cgco.com.tw/), modelo MAN1011 com ampliação de imagem de 65x a 250x. As dimensões do microscópio são de 104.5mm x 30.5mm x 30g (comprimento x altura x peso). Seu formato também facilitou a sua fixação em uma mesa deslizante, tendo movimento na direção y, como indicado na Figura 4.12.



(a)



(b)

Figura 4.12 – Esquema do aparato de medição da frente da trinca (a) micrômetro analógico e (b) micrômetro digital.

Um micrômetro digital de 2" foi acoplado em cada mesa deslizante. Esse aparato de medição foi satisfatório para coletar os dados de comprimento da trinca, uma vez que seu crescimento nas superfícies da placa é em apenas uma direção.

A ponta da trinca em cada superfície é marcada na tela do computador (ver Figura 4.13), depois de um intervalo de ciclos  $\Delta N$  de aplicação do carregamento, observa-se um incremento  $\Delta a$  nessa ponta. Neste momento, é interrompido momentaneamente o experimento para se medir  $\Delta a$ , retornando o CP na posição indeformada (CP descarregado).

Inicia o processo de medição movendo o micrômetro. O montante de rotação no micrômetro move a mesa deslizante axialmente. Quando a extremidade

da trinca alcança a marca na tela, pode-se ter um registro de  $\Delta a$ . As fixações dos microscópios podem ser vistas na Figura 4.14. Essas fixações da mesa deslizante no perfil metálico são realizadas por bases magnéticas.

Depois de quebrar o CP, a geometria da trinca de fadiga foi visualizada e registrada em um microscópio óptico (Zeiss SteREO Discovery.v8).



Figura 4.13 – Marca usada para medir incrementos de trinca.



Figura 4.14 - Microscópios USB usados no experimento.

#### 4.5.2. Blocos de carregamentos

Devido ao carregamento remotamente aplicado, a trinca cresce com diferentes incrementos nas superfícies da placa. A geometria ao longo da espessura é desconhecida durante todo o experimento. Ela só é visualizada ao final do ensaio, quando se quebra o CP. Isto implica que as marcas de praia são essenciais para associar o crescimento nessas superfícies com a geometria interna (geometria da trinca ao longo da espessura).

Assim, foram usados blocos de carregamentos para marcar a frente da trinca. Esses blocos são basicamente alternância de diferentes magnitudes de  $\Delta\sigma$ . Com essa alternância, podem-se associar diferentes cores às variações do nível de tensão no carregamento cíclico (ver Figura 4.15).





(b)

Figura 4.15 – Crescimento da trinca por bandas (a) Carregamento de fadiga e; (b) superfície da trinca.

A marca próxima a superfície inferior da placa é mais forte do que a marca próxima a pré-trinca (interseção da trinca reta e trinca de canto). Isso mostra que existe uma maior variação do FIT na superfície inferior da placa ( $\Delta K_{I,c}$ ) à medida que se alterna  $\Delta \sigma$ . Esse resultado é coerente já que na superfície inferior da placa atuam as tensões máximas de tração, consequentemente, ocasionam maior variação de  $\Delta K_I$ . Por outro lado, na interseção da trinca reta e trinca de canto, as marcas são menos nítidas, mostrando pequena variação de  $\Delta K_I$  nessa região.

91

## 4.5.3. Medidas de deformações

Durante o experimento, as deformações foram monitoradas para verificar se o carregamento ocasionava apenas flexão pura. Em cada CP foram colados quatro *strain-gages*. Dois *strain-gages* capturavam as deformações na superfície superior da placa, enquanto outros dois *strain-gages* faziam a leitura das deformações na superfície inferior da placa.

Eles foram colados a mesma distância do entalhe e aos pares ocupam a mesma posição no comprimento e largura da placa. Cada par de *strain-gage* possui simetria em relação à superfície média da placa. Esses *strain-gages* são ilustrados na Figura 4.16. Para essas posições *strain-gages* sob carregamento de flexão pura, as medidas de deformações coletadas devem ser similares (com sinais opostos).

O monitoramento das deformações no CP foi feito com um *Strain Indicator* & *Recorder Vishay Model P3* (Figura 4.17 (a)). Este aparelho aceita quatro canais de leitura, exibindo os dados na tela LCD para cada *strain gage*, como ilustrado na Figura 4.17 (b).



Figura 4.16 - Strain-gages colados: (a) na superfície superior e (b) na superfície inferior.

92



Figura 4.17 - Aquisição de dados: (a) Strain Indicator e Recorder Vishay Model P3, (b) tela LCD.

### 4.6. Resultados experimentais

Como mencionado na Seção 4.1, foram ensaiados cincos CPs: três CPs com geometria de entalhe de borda e dois CPs com geometria com entalhe central. Os CPs com entalhe de borda são chamados de CP01, CP06 e CP07. Os CPs com entalhe central são chamados de CP03 e CP02.

O primeiro ensaio realizado com sucesso foi no CP01. Neste ensaio, optouse por um carregamento que ocasionasse taxas de propagação constantes ou crescentes na superfície inferior da placa. Ao final desse ensaio, percebeu-se a necessidade de aplicar blocos de carregamento para marcar a frente da trinca.

Com essa finalidade, no CP06 foram aplicados blocos de sobrecargas. Entretanto, como a trinca é ao longo de uma superfície, a sobrecarga pode gerar retardos em diferentes proporções na frente da trinca, resultando em uma geometria diferente. Por este motivo, no CP07 alteraram-se esses blocos de sobrecargas para blocos de subcargas. Estes blocos de subcargas marcaram satisfatoriamente as frentes. Assim, também foram usados nos CPs com entalhe central. O resumo com o histórico de carregamento aplicado em cada CP, número de ciclos total e razão final a/w são encontrados na Tabela 4.3.

Corpo-de-prova	Histórico	$N$ $(10^6 \text{ ciclos})$	a** / w
CP03	subcarga	1.78	0.66
CP02	subcarga	1.11	0.57
CP01	$\Delta K$ constante	1.48	0.37
CP06	sobrecarga	475	0.50
CP07	subcarga	3.63	0.57

Tabela 4.3 – Tipo de histórico de carregamento, número de ciclos total N e razão final a / w: (a) entalhe central; (b) entalhe de borda.

 $a^{**}$  é o máximo comprimento da trinca, localizado na superfície inferior da placa, considerando o comprimento do entalhe, pré-trinca e comprimento *c*.

### 4.6.1. CP com entalhe de borda

#### A. Carregamento de fadiga com $\Delta K$ constante

O carregamento de flexão pura gera um gradiente de tensões ao longo da espessura da placa. Desta forma, as tensões normais variam em toda a espessura da trinca. Além disso, existe a variação do carregamento cíclico aplicado, esse carregamento é aplicado com uma razão de tensão constante R = 0.1. Na Figura 4.18 encontra-se o histórico de carregamento senoidal na superfície inferior da placa,  $\sigma_{sup.inf.}$ .

Após quebrar o CP01, a trinca, que cresceu com fechamento parcial induzido pelo carregamento de flexão, foi pela primeira vez observada. A trinca cresce em um plano perpendicular ao carregamento. Esse plano da trinca é perpendicular as superfícies da placa (ver Figura 4.19).

A trinca cresceu mais rápido na superfície inferior da placa, onde atuavam as máximas tensões de tração cíclicas. Entretanto, a trinca não se torna passante e inclinada ao longo da espessura da placa. Em outras palavras, a geometria da trinca tende a formas curvas e bem distorcidas, atingindo comprimentos longos visíveis em apenas uma das superfícies da placa (superfície inferior). Do ponto de vista de segurança da estrutura, essas trincas são perigosas, pois apenas aparecem em uma das superfícies da placa.

95



Figura 4.18 – Histórico das tensões aplicadas na superfície inferior da placa.



Figura 4.19 – Trinca de superfície no CP01.

A geometria dessa trinca pode ser descrita pela combinação de duas trincas bem conhecidas, trinca passante-reta e trinca de canto. A transição entre essas duas trincas pode ser simplificada por uma quina. As implicações dessa geometria de trinca são estudadas no Capítulo 5 desta tese.

96

Nesse CP percebe-se uma pequena tendência da trinca crescer na superfície superior da placa (região com tensões de compressão remotamente aplicadas). Todavia, nitidamente, a trinca na superfície superior é independente da trinca na superfície inferior, conforme descrito a seguir.

Um aspecto importante, é que durante o experimento, enquanto a trinca atingia comprimentos longos na superfície inferior da placa, podia ser visto na superfície superior da placa uma linha de plastificação com comprimento menor que o comprimento da trinca inferior.

Fotos com microscópio e câmera digital da superfície da trinca no CP01 são ilustradas na Figura 4.20, assim como a legenda usada para indicar três marcas de frente de trinca obtidas desse experimento.

Na Figura 4.20 (c) é indicada a geometria da frente da pré-trinca por uma linha de cor branca, que é passante com pequena inclinação. Complementarmente, as cores magenta, verde e amarela correspondem, respectivamente, a marca 01, 02 e 03. Essas marcas se relacionam aos blocos de carregamento mostrados na Figura 4.15 (a).

Adicionalmente, a profundidade da trinca sob flexão pura atinge valores superiores a t/2 (superfície média da placa). Isso pode ser explicado pela mudança de distribuição de tensões na frente da trinca. Em outras palavras, na seção de ligamento, existe uma contribuição maior da largura da placa sob compressão do que sob tração, portanto, a linha neutra, antes localizada na superfície média da placa, sobe. Esta diferença de largura de contribuição é por causa da distribuição dos esforços na placa, que sob compressão são transmitidos no trecho trincado. Entretanto, sob tração, os esforços desviam da região trincada. Os esforços internos em uma placa trincada são ilustrados na Figura 4.21.



(c)

Figura 4.20 - Trinca de fadiga no CP01: (a) Microscópio óptico; (b) Câmera digital; (c) Legenda.



Figura 4.21 – Largura de colaboração na placa: (a) sob carregamento remoto de compressão e (b) sob carregamento remoto de tração.

#### B. Blocos de sobrecarga

No CP06 foi aplicado um histórico de carregamento senoidal com quatro blocos de sobrecargas. O histórico das tensões normais na superfície inferior da placa é encontrado na Figura 4.22.

Na Figura 4.23 é apresentada a trinca de fadiga do CP06. Cinco marcas de frente de trinca podem ser observadas nitidamente ao longo dessa superfície de trinca. Essas frentes de trincas marcadas com carregamento de sobrecarga acusam um retardo na profundidade da trinca. Este retardo é encontrado entre duas profundidades, pois as marcas coincidem (profundidade das Marcas 03 e 04).

Mais uma vez, pode-se dizer que a trinca tem duas distintas geometrias. Estas geometrias podem ser simplificadas por trinca reta-passante e trinca de canto, a transição entre essas duas trincas pode ser adotada como uma quina. Essa transição é indicada na Figura 4.24. Complementarmente, as linhas de plastificação na superfície superior da placa são ilustradas na Figura 4.25. Elas têm profundidade inferior a 1 mm.



Figura 4.22 - Histórico das tensões aplicadas na superfície inferior da placa.





(b)



(c)

Figura 4.23 - Superfície da trinca de fadiga do CP06: (a) e (b) Microscópio óptico; (c) Legenda.



Figura 4.24 – Quinas na frente da trinca.



Figura 4.25 – Regiões com deformação plástica na superfície superior da placa.

### C. Blocos de subcargas

Depois de se realizar o experimento no CP06, foi possível estimar melhor os intervalos necessários para aplicar os blocos de carregamento cíclico, resultando em um número maior de marcas de frente de trinca durante o experimento deste CP (CP07). Os blocos cíclicos marcam a frente da trinca por decréscimo de tensões aplicadas. Com esses blocos, pretende-se não causar retardos significantes nas geometrias das frentes de trinca, como ocorreu no CP06. Na Figura 4.26 é ilustrado o histórico de carregamento aplicado durante o experimento do CP07.



Figura 4.26 - Histórico das tensões normais aplicadas na superfície inferior da placa: CP07.

A frente de trinca de fadiga do CP07 é encontrada na Figura 4.27. Os blocos de subcargas marcaram satisfatoriamente a frente da trinca, mas as marcas das frentes não são tão nítidas quanto às marcas obtidas por blocos de sobrecarga. As marcas ficam ainda menos nítidas na quina (interseção da trinca reta e trinca de canto). Principalmente na foto do microscópio Zeiss, é difícil medir a profundidade da trinca de canto. Essa dificuldade pode ser atribuída à pequena variação do fator de intensidade de tensão na interseção com a trinca inicialmente passante que não se propaga durante ensaio de flexão. Adicionalmente, na Figura 4.28 é mostrada a legenda que será usada para análise de resultados e também no Capítulo 7.



(c)

Figura 4.27 – Trinca de superfície no CP07 (a) foto com microscópio Zeiss; (b) e (c) fotos com máquina digital.



Figura 4.28 – Legenda na trinca de superfície para diversas marcas de frente de trinca.

Conforme essa figura, próximo a superfície superior da placa, a geometria da trinca tem um trecho reto (remanescente da geometria da pré-trinca) que não altera a geometria conforme se aplica o carregamento remoto de flexão pura. Por outro lado, a trinca cresce na superfície inferior, mas não alcança a superfície superior da placa, permanecendo parcialmente passante com geometria de trinca de canto.

Além disso, a trinca cresce mais rápido na superfície inferior da placa do que na profundidade, isto é, os incrementos de trincas na profundidade são menores que os incrementos de trinca na superfície inferior da placa. Nesse terceiro experimento da tese, foi alcançada a maior razão entre d/w, percebendose que a geometria da trinca tende a uma profundidade constante quando atinge comprimentos longos.

Caso fossem alcançados comprimentos de trinca maiores, essa trinca poderia se tornar passante. A geometria e comprimento da trinca estimados com base nesses ensaios de crescimento da trinca são ilustrados na Seção 4.8.

Algumas estimativas dos ângulos de interseção são ilustradas na Figura 4.29. Estes ângulos de interseções são entre a frente da trinca e a superfície inferior da placa.



Figura 4.29 – Ângulo de interseção da frente da trinca com superfície livre.

# 4.6.2. CP com entalhe central

As frentes de trinca que cresceram simultaneamente em um CP com entalhe central, CP03 e CP02, são apresentadas na Figura 4.30 e Figura 4.31, respectivamente.



Figura 4.30 – Trinca de superfície CP03: (a) trinca A; (b) trinca B.



Figura 4.31 – Trinca de superfície CP02 no microscópio Zeiss: (a) trinca A; (b) trinca B.

## 4.7. Avaliação e resumo dos dados coletados

As medidas coletadas na superfície inferior da placa durante todo o experimento são apresentadas no gráfico d vs. N (Figura 4.32) nos CPs com entalhe de borda. Complementarmente, os pontos de mudança de carregamento deixaram marcas na frente da trinca. Essas marcas foram medidas após quebrar o CP. Mais uma vez, relacionou-se o comprimento da trinca d com o número de ciclos (momento em que se mudou de carga) como é também indicado neste gráfico.

Em todos os experimentos de flexão, observou-se que a geometria da frente da trinca mudou significantemente durante a propagação por flexão pura. A frente de trinca inicialmente reta e passante ou levemente inclinada tornou-se curva.

A região sob tensões normais máximas de tração remotamente aplicadas corresponde à superfície inferior da placa, consequentemente, a trinca cresce inicialmente na superfície inferior e atinge profundidade superior a t/2 (superfície média da placa), decorrente da mudança da linha neutra. Esta mudança ocorre por causa das distintas larguras de colaboração da região sob tensões de compressão e região sob tensões de tração.



Figura 4.32 -Curva *d vs. N* dos CPs com entalhe de borda.

A trinca não propaga em nenhum momento na região superior da placa, onde atuam tensões de compressão, e nessa região aconteceu contato. Resultando uma trinca com dois diferentes comportamentos. Na transição entre esses dois comportamentos da frente da trinca apareceu uma quina. Essa quina é visualizada desde as primeiras marcas de frente de trinca sob flexão pura e permanece.

Na região do ligamento residual em que cresce essa trinca, ocorre uma plastificação localizada do lado oposto a frente da trinca (superfície superior da placa). Análises com dois tipos de materiais verificando a influência desse comportamento elasto-plástico na forma da trinca devem ser investigadas futuramente. Em uma futura abordagem deste problema, deveria adotar um comportamento do material elasto-plástico na região de tensões de compressão. Entretanto, nesta tese, as análises numéricas consideram apenas material elástico linear.

A razão entre a profundidade e comprimento da trinca diminui conforme o comprimento da trinca cresceu, mostrando que os incrementos de trinca são maiores na superfície inferior da placa do que na profundidade.

## 4.8. Simplificação da geometria no plano de trincamento

Existem duas motivações em se simplificar a geometria da trinca: a primeira é facilitar no esboço ou previsão da geometria ao longo da superfície; a segunda motivação e mais importante é que essa geometria é relacionada com uma distribuição de FIT. Essa distribuição vai tender a ajustar a geometria da trinca com as tensões ao longo da placa que são oriundas do carregamento aplicado.

Quanto mais precisa for essa geometria da simplificação da geometria em relação à geometria obtida nos corpos-de-prova, mais precisa é a distribuição de FIT. Essa dependência é a maior motivação em se obter uma frente de trinca coincidente com a frente da trinca do experimento.

Na literatura, uma forma bem conhecida de aproximação da geometria das trincas de canto é utilizando uma curva quarto-elíptica. A comparação entre geometrias dos experimentos e curvas quarto-elípticas é feita na Figura 4.33, na Figura 4.34 e na Figura 4.35.



Figura 4.33 - Comparação da frente da trinca no CP01 com quarto-elípticas concêntricas.



Figura 4.34 - Comparação da frente da trinca no CP06 com quarto-elípticas concêntricas.



Figura 4.35 - Comparação da frente da trinca do CP07 com quarto-elípticas concêntricas.

A trinca procurou uma geometria quarto-elíptica concêntrica nas primeiras marcas de frente de trinca. Entretanto, conforme a trinca cresceu, a marca da frente da trinca obtida nos experimentos é superior à curva de um quarto de elipse concêntrica. Essas diferenças de geometria aumentam à medida que a trinca cresce. Além disso, a trinca de canto, quando atinge comprimentos longos, tende a uma profundidade constante e praticamente paralela às superfícies da placa em um trecho. Essa tendência pode ser efeito da superfície superior da placa, ocasionando redistribuição dos esforços nessa região.

As frentes de trincas inicialmente puderam ser bem aproximadas por curvas quarto-elípticas concêntricas. Essas trincas são chamadas por trincas curtas. Notou-se que o comprimento d máximo para empregar simplificações quarto-elípticas concêntricas nos corpos-de-prova CP01, CP06 e CP07 é, respectivamente, 18.28 mm, 25.96 mm e 25.80 mm. Além disso, as razões geométricas a/c são superiores a 0.43 nessas simplificações quarto-elípticas concêntricas (ver Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Tabela 4.6).

Tabela 4.4 – Semi-eixos das curvas quarto-elipses concêntricas no CP01, usadas na Figura 4.33.

Marcas	a [mm]	<i>c</i> [mm]	a / c	a / t	a / c *	<i>d</i> [mm]
Marca 01	2.68	3.96	0.68	0.30	1.08	15.85
Marca 02	3.49	6.39	0.55	0.42	0.77	18.28
Marca 03	6.20	23.68	0.26	0.70	0.28	35.57

\* Usando o comprimento de trinca *c* computado a partir da ponta da pré-trinca.

Tabela 4.5 - Semi-eixos das curvas quarto-elipses concêntricas no CP06, usadas na Figura 4.34.

Marcas	<i>a</i> [mm]	<i>c</i> [mm]	a / c *	a / t	<i>d</i> [mm]
Marca 01	4.48	6.39	0.71	0.54	20.02
Marca 02	5.35	12.33	0.44	0.65	25.96
Marca 03	6.17	19.98	0.33	0.78	33.61
Marca 04	6.17	26.95	0.24	0.78	40.58
Marca 05	7.41	38.00	0.19	0.87	51.63

\* O comprimento de trinca *c* computado a partir da ponta da pré-trinca e o centro das quartoelipses são coincidentes.

Assim, para esses dados, podem-se aproximar as geometrias das trincas por curvas quarto-elípticas concêntricas até comprimento d igual a 25.96 mm. Esses dados relacionados aos CPs são apresentados na Tabela 4.7. O centro dessas curvas quarto-elípticas concêntricas é X. As coordenadas do centro X nos CP01,

CP06 e CP07 são apresentadas na Figura 4.36, Figura 4.37 e Figura 4.38, respectivamente.

Marcas	<i>a</i> [mm]	<i>c</i> [mm]	a / c	a / t	a / c *	<i>d</i> [mm]
Marca 01a	2.55	0.91	2.80	0.29	2.25	15.68
Marca 01b	2.55	1.55	1.65	0.29	1.44	16.32
Marca 02a	3.96	7.17	0.55	0.45	0.53	21.94
Marca 02b	3.96	7.86	0.50	0.45	0.48	22.63
Marca 03a	4.93	11.03	0.45	0.56	0.43	25.80
Marca 03b	4.93	12.64	0.39	0.56	0.37	27.41
Marca 04a	5.54	16.86	0.33	0.63	0.32	31.63
Marca 04b	5.54	18.72	0.30	0.63	0.27	33.49
Marca 05a	6.07	23.29	0.26	0.69	0.25	38.06
Marca 05b	6.07	24.21	0.25	0.69	0.24	38.98
Marca 06a	6.60	27.44	0.24	0.75	0.23	42.21
Marca 06b	6.60	29.50	0.22	0.75	0.21	44.27
Marca 07a	6.86	31.62	0.22	0.78	0.21	46.39
Marca 07b	6.86	32.86	0.21	0.78	0.20	47.63
Marca 08a	7.04	34.97	0.20	0.80	0.19	49.74
Marca 08b	7.04	35.61	0.20	0.80	0.19	50.38
Marca 09a	7.48	42.56	0.18	0.85	0.17	57.33

Tabela 4.6 - Semi-eixos das curvas quarto-elipses concêntricas no CP07, usadas na Figura 4.35.

\* O comprimento de trinca *c* computado a partir da ponta da pré-trinca e o centro das quartoelipses são coincidentes.

Tabela 4.7 – Comprimento máximo d da trinca simplificada apenas por curva quarto-elíptica.

CPs	<i>d</i> [mm]	a / c	a / t
CP01	18.28	0.77	0.42
CP06	25.96	0.45	0.65
CP07	25.80	0.43	0.56



Figura 4.36 - Coordenadas do centro X no CP01 das curvas quarto-elípticas concêntricas.



Figura 4.37 – Coordenada do centro X no CP06 das curvas quarto-elípticas concêntricas.



Figura 4.38 – Coordenadas do centro X no CP07 das curvas quarto-elípticas concêntricas.

Uma geometria satisfatória para simplificar as demais frentes de trinca é obtida adotando duas regiões com diferentes geometrias: (i) uma região com profundidade de trinca constante até um dado comprimento da trinca; (ii) uma curva quarto - elíptica com centro não concêntrico com as primeiras marcas. Essa simplificação é ilustrada na Figura 4.39, Figura 4.40 e Figura 4.41.



Figura 4.39 – Comparação entre frente de trinca experimental e um quarto de elipses não concêntricas no CP01.



Figura 4.40 – Comparação entre marcas de experimento e curvas quarto-elípticas não concêntricas no CP06.



Figura 4.41 – Comparação entre marcas de experimento e curvas quarto-elípticas não concêntricas no CP07.

Um único centro foi suficiente para obter boas aproximações das três últimas marcas de frente de trinca no CP06, ou seja, essas marcas foram aproximadas por curvas quarto-elipses concêntricas entre elas. A nova coordenada do centro (20.66 mm) no CP06 é similar a nova coordenada de centro no CP01 (20.79 mm). Todavia, não foi possível encontrar um único centro para o CP07. A coordenada do centro  $(x_c)$  e semi-eixos  $a_{NC}$  e  $c_{NC}$  são apresentados nas Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10.

As razões geométricas  $a_{NC} / c_{NC}$  entre 0.24 e 0.51 são boas aproximações das curvas quarto-elípticas não necessariamente concêntricas usadas para descrever as frentes de trincas. Adicionalmente, a menor razão  $a_{NC} / c_{NC}$  foi encontrada no CP06, essa razão de 0.24 pode ter sido ocasionada por um retardo nas taxas de propagação devido à sobrecarga aplicada, que modificou a geometria da trinca.

Foi possível simplificar por duas geometrias as frentes da trinca do CP com uma trinca de borda sob flexão pura. Essas geometrias são ilustradas na Figura 4.42(b) e (c). A localização dos eixos e o corte *AA* na placa ensaiada podem ser visualizados na Figura 4.42(a).

No início do experimento as geometrias de frentes de trinca podem ser aproximadas por uma curva quarto-elíptica concêntrica. Essa aproximação pode ser feita até o comprimento y = d = 25.96 mm. Para essa configuração, ilustrada na Figura 4.42 (b), as coordenadas do ponto *P* na frente da trinca curva são

$$x = 0$$
  

$$y = X + c \cos \phi$$
 (4.5),  

$$z = a \sin \phi$$

onde X é a coordenada do centro (resumida na Tabela 4.11).

Tabela 4.8 – Novo centro e semi-eixos da Marca03 do CP01, ilustradas na Figura 4.39.

Marcas	<i>x</i> <sub>c</sub> [mm]	$a_{_{NC}}$ [mm]	<i>c</i> <sub><i>NC</i></sub> [mm]	$a_{_{NC}}$ / $c_{_{NC}}$	$a_{_{NC}}$ / $t$	a / c *
Marca 03	20.79	6.23	14.73	0.42	0.70	0.28

Marcas	<i>x</i> <sub>c</sub> [mm]	$a_{_{NC}}$ [mm]	<i>c</i> <sub><i>NC</i></sub> [mm]	$a_{_{NC}}$ / $c_{_{NC}}$	$a_{_{NC}}$ / $t$	a / c *
Marca 03	20.66	6.17	12.94	0.48	0.78	0.33
Marca 04	20.66	6.17	19.90	0.31	0.78	0.24
Marca 05	20.66	7.41	31.16	0.24	0.87	0.19

113

Tabela 4.9 - Novo centro e semi-eixos de 3 Marcas no CP06, ilustradas na Figura 4.40.

\* Usando o comprimento de trinca c computado a partir da ponta da pré-trinca.

Tabela 4.10 - Novos centros e semi-eixos de 12 Marcas no CP07, conforme ilustrado na Figura 4.41.

Marcas	<i>x</i> <sub>c</sub> [mm]	$a_{_{NC}}$ [mm]	<i>c</i> <sub><i>NC</i></sub> [mm]	$a_{_{NC}}$ / $c_{_{NC}}$	$a_{_{NC}}$ / $t$	a / c **
Marca 03b	16.49	4.67	9.20	0.51	0.56	0.37
Marca 04a	16.49	5.35	13.37	0.40	0.63	0.32
Marca 04b	16.49	5.35	16.09	0.33	0.63	0.27
Marca 05a	16.49	5.81	20.30	0.29	0.69	0.25
Marca 05b	18.40	5.81	17.55	0.33	0.69	0.24
Marca 06a	18.40	6.24	20.91	0.30	0.75	0.23
Marca 06b	18.40	6.27	22.88	0.27	0.75	0.21
Marca 07a	21.32	6.34	18.51	0.34	0.78	0.21
Marca 07b	23.10	6.34	16.18	0.39	0.78	0.20
Marca 08a	24.40	6.48	15.71	0.41	0.80	0.19
Marca 08b	24.40	6.59	16.36	0.40	0.80	0.19
Marca 09a	27.54	6.92	17.01	0.41	0.85	0.17

\*\* O comprimento de trinca c computado a partir da ponta da pré-trinca e o centro das elipses são coincidentes.

Tabela 4.11 - Resumo das coordenadas de centro nos três CPs.

CPs	<i>X</i> [mm]
CP01	11.89
CP06	13.63
CP07	14.77



Figura 4.42 – Coordenadas na frente da trinca: (a) Indicação de corte *A*-*A* na placa; (b) Corte *A*-*A* trinca curta; (c) Corte *A*-*A* trinca longa.

Caso o comprimento *d* seja superior a 25.96mm, deve-se aproximar a frente de trinca por uma reta constante e uma curva quarto-elíptica, conforme Figura 4.42(c). As coordenadas de qualquer ponto *P* da frente da trinca curva podem ser obtidas pelas expressões a seguir. Se  $X \le y \le x_c$ , as coordenadas são

$$x = 0$$
  

$$y = d$$
 (4. 6).  

$$z = a_{NC}$$

Se  $y > x_c$ , as coordenadas na frente da trinca curva são

$$x = 0$$
  

$$y = x_c + c_{NC} \cos \phi$$
 (4.7).  

$$z = a_{NC} \sin \phi$$

Os dados  $a_{NC}$ ,  $c_{NC}$  e  $x_c$  foram apresentados nas Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10.

Complementarmente, são propostas duas expressões para determinar a profundidade da trinca a ( $a = a_{NC}$ ) e posição do centro ( $x_c$ ), utilizando as relações encontradas nas frentes de trincas dos corpos-de-prova CP01 e CP07 (ver Figura 4.43). Entretanto, são usados os dados referentes às marcas do CP07 obtidas antes da aplicação dos blocos de subcargas.



Figura 4.43 – Curvas de ajuste de a/t e centro  $x_c$ .

O melhor ajuste polinomial relaciona as dimensões d e a. Esse ajuste é

$$\frac{a}{t} = 6.97 \left(\frac{d}{w}\right)^3 - 1.03 \times 10^1 \left(\frac{d}{w}\right)^2 + 5.72 \left(\frac{d}{w}\right) - 3.60 \times 10^{-1}.$$
 (4.8)

#### 4 Procedimentos e resultados experimentais

Novamente, utilizando *d* é sugerida uma expressão para determinar o centro da curva quarto-elíptica, como

$$\frac{x_c}{w} = 1.76 \left(\frac{d}{w}\right)^3 - 1.37 \left(\frac{d}{w}\right)^2 + 5.87 \times 10^{-1} \left(\frac{d}{w}\right) + 6.17 \times 10^{-2}, \quad (4.9)$$

onde  $x_c$  é o centro das aproximações quarto-elíptica concêntricas e não concêntricas. Admitindo que essas expressões (4. 8) e (4. 9) possam ser extrapoladas até a razão a/t = 1. Então, essa trinca se tornaria passante para uma razão d/w = 0.71 e com comprimento na superfície superior de  $x_c/w = 0.42$ . A geometria dessa trinca é ilustrada na Figura 4.44, onde w = 101.4 mm, d = 72.0 mm e  $x_c = 42.6$  mm.



Figura 4.44 – Esboço da trinca de superfície para a/t = 1.

As geometrias de trincas obtidas no CP com entalhe central são bem estimadas por quarto-elipses concêntricas. Na Figura 4.45 e Figura 4.46 são apresentadas essas comparações para geometria do CP03 e CP02. Na Tabela 4.12 e Tabela 4.13 são indicados os semi-eixos e razões de geometria.

Com base nas razões obtidas nessas tabelas, pode-se afirmar que nos CPs com entalhe central a geometria da trinca pode ser simplificada por curvas quartoelipses até uma razão a/t = 0.70 e a/c = 0.33. Enquanto, em CPs com entalhe de borda, a razão máxima para simplificar a geometria da trinca por quarto-elipse é a/t = 0.65 e a/c = 0.44. A partir dessa razão, a trinca tende a crescer mais rápido na superfície inferior da placa do que na profundidade da placa.

Por este motivo, a geometria da trinca não é bem estimada por uma curva quarto-elipse concêntrica. A simplificação da geometria da trinca longa deve ser com um trecho com profundidade da trinca praticamente constante e paralelo às superfícies da placa e outro trecho com uma curva quarto-elipse não necessariamente concêntrica de semi-eixos  $a_{NC}$  e  $c_{NC}$ .



(b)

Figura 4.45 – Comparação da frente de trinca obtida no CP03 com quarto-elipses: (a) trinca A e (b) trinca B.

Tabela 4.12 – Semi-eixos das elipses concêntricas no CP03.

	Marca	<i>a</i> [mm]	<i>c</i> [mm]	a/c	a/t
Trinca A	Marca 01	2.58	2.99	0.86	0.29
	Marca 02	3.66	5.05	0.72	0.41
	Marca 03	4.07	9.13	0.45	0.46
	Marca 04	4.15	9.99	0.42	0.47
	Marca 05	5.03	15.01	0.33	0.57
	Marca 06	5.94	16.37	0.36	0.67
Trinca B	-	6.09	17.24	0.35	0.69





(b)

Figura 4.46 - Comparação da frente de trinca obtida no CP02 com quarto-elipses: (a) trinca A e (b) trinca B.

Tabela 4.13 – Semi-eixos das elipses concêntricas no CP02.

Marca	<i>a</i> [mm]	<i>c</i> [mm]	a/c	a/t
Trinca A	6.18	14.5	0.43	0.70
Trinca B	5.59	13.34	0.42	0.64