

6

Predição numérica do crescimento da trinca

Neste capítulo são realizadas duas predições numéricas do crescimento da trinca com base no programa acoplado de elementos finitos, FRANC3D e ABAQUS, obtendo-se previsões de geometria da frente da trinca usando os dados do corpo-de-prova CP01. Para reconstruir numericamente o processo de crescimento da trinca, utiliza-se a geometria inicial da trinca passante obtida no ensaio de pré-trincamento deste corpo-de-prova. A distribuição do fator de intensidade de tensão para essa geometria é obtida no programa FRANC3D, que faz esse crescimento incrementalmente, usando a metodologia de suavização da frente da trinca descrita na Seção 5.3.1. São feitas duas predições numéricas de crescimento incremental usando curvas de propagação da trinca $da/dN - \Delta K$ com inclinações diferentes na região II. O objetivo destas predições é avaliar a influência dessas inclinações no crescimento incremental da trinca.

As previsões de vida determinadas a partir dos FITs obtidos na interseção da trinca com a superfície inferior da placa são comparadas com as medições de vida no corpo-de-prova CP01.

As hipóteses simplificadoras e descrição do problema são encontradas na Seção 5.1. As dimensões da placa CP01 são encontradas no Capítulo 4.

6.1.

Ajustes da taxa de crescimento da trinca

Dois ajustes diferentes de taxa de crescimento $da/dN - \Delta K$ foram usados para propagar a trinca. Eles são chamados neste capítulo por $da/dN - \Delta K$ e $dd/dN - \Delta K$, onde $da/dN - \Delta K$ é a taxa de propagação medida no ensaio de um corpo-de-prova padrão sob tração (ver Apêndice 2) e $dd/dN - \Delta K$ é o ajuste das taxas de propagação obtidas no ensaio de flexão pura no CP01 usando as

estimativas de ΔK_I obtidas com o crescimento incremental com a curva $da/dN - \Delta K$. Na Figura 6.1 são ilustradas essas curvas de taxas de propagação.

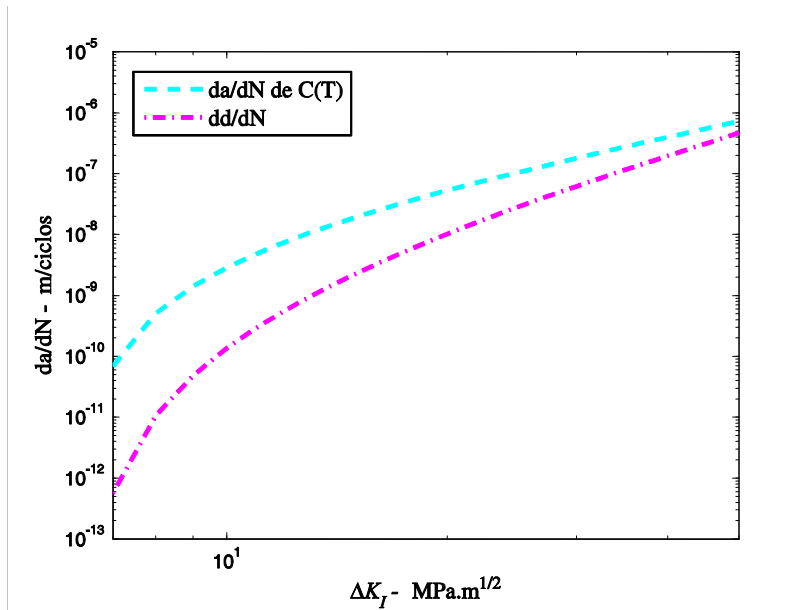


Figura 6.1 – Curva $da/dN - \Delta K$ usadas na predição do crescimento do CP01.

A curva $da/dN - \Delta K$, que ajustou dados medidos em uma primeira amostra do material, é

$$\frac{da}{dN} = 1.53 \times 10^{-10} (\Delta K - \Delta K_{th} (1 - R))^{2.23}, \quad (6.1)$$

onde $\Delta K_{th} = 7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ e $R = 0.1$. A taxa de crescimento da trinca da/dN e ΔK devem ser em m/ciclos e em $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, respectivamente. O ajuste dos dados experimentais são apresentados no Apêndice 2.

A curva $dd/dN - \Delta K$ (curva em magenta- Figura 6.1) é ajustada com

$$\frac{dd}{dN} = 1.84 \times 10^{-12} (\Delta K - \Delta K_{th} (1 - R))^{3.29}, \quad (6.2)$$

onde R é 0.1 e ΔK_{th} é o limiar de propagação e vale $\Delta K_{th} = 7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

6.2. Predição das geometrias da trinca durante seu crescimento

Nesta seção é apresentada a predição numérica do crescimento incremental da trinca baseando-se nos dados do CP01. Com esta finalidade, extraiu-se a geometria da pré-trinca indicada na Figura 4.20 (c), que é inserida no programa FRANC3D como defeito inicial (passo 0). O crescimento da trinca é realizado com as seguintes hipóteses: (i) propagação incremental da trinca com a rotina incorporada no programa FRANC3D, utilizando a metodologia de suavização da frente da trinca (explicada na Seção 5.3.1); (ii) comportamento do material homogêneo e isotrópico; (iii) estimativas precisas de FIT; (iv) direção de crescimento bidimensional e os incrementos de trinca são perpendiculares à frente de trinca atual. (v) a relação $da/dN - \Delta K$ é mesma ao longo de toda a frente da trinca e também para qualquer direção de propagação.

Os incrementos de trinca são diferentes na frente da trinca e são determinados por relações entre Δa_{\max} e curva $da/dN - \Delta K$, onde o usuário fornece o incremento máximo de trinca. Neste caso, esse incremento máximo foi 0.25 mm ($t/35$) em todos os passos.

Em um específico passo, o incremento máximo é relacionado com a curva $da/dN - \Delta K$ e distribuição do FIT calculada para determinar os demais incrementos de trinca da frente da trinca, obtendo-se assim a nova geometria da trinca. Nessa simulação de propagação, foram necessários 89 passos para se atingir o comprimento final da trinca, isto é, foram feitas 89 análises no FRANC3D.

Como as frentes da trinca foram suavizadas em todos os passos, não existe quina nestas geometrias de frente da trinca. Por causa da ausência de quina, eliminaram-se os picos na distribuição do FIT. Na Figura 6.2 e na Figura 6.3 são exemplificadas distribuições do FIT nas frentes de trinca suavizadas. Na Figura 6.4 é comparada a predição numérica da geometria com a geometria alcançada no CP01.

A geometria da frente da trinca durante a predição numérica do seu crescimento é apresentada na Figura 6.5. Devido à grande quantidade de incrementos (89), optou-se em ilustrar apenas a geometria da trinca a cada 8 passos no seu plano de crescimento (plano $y-z$).

Complementarmente, na Figura 6.6 são encontrados os FIT normalizados em relação ao ângulo ϕ . A razão a/c é obtida com profundidade (a) e o comprimento (c) da trinca de canto. Note que $c = d - X$, onde $X = 11.89$ mm no CP01.

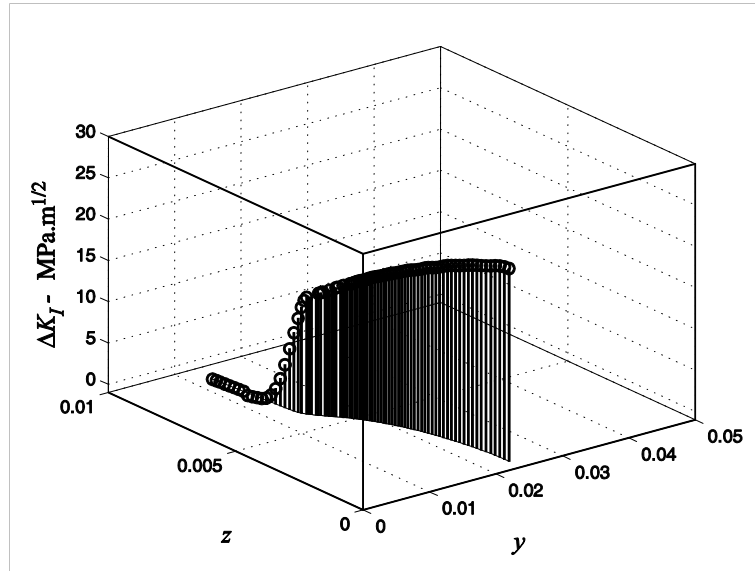


Figura 6.2 – Distribuição do FIT no passo 32 com a geometria da frente da trinca obtida incrementalmente no FRANC3D.

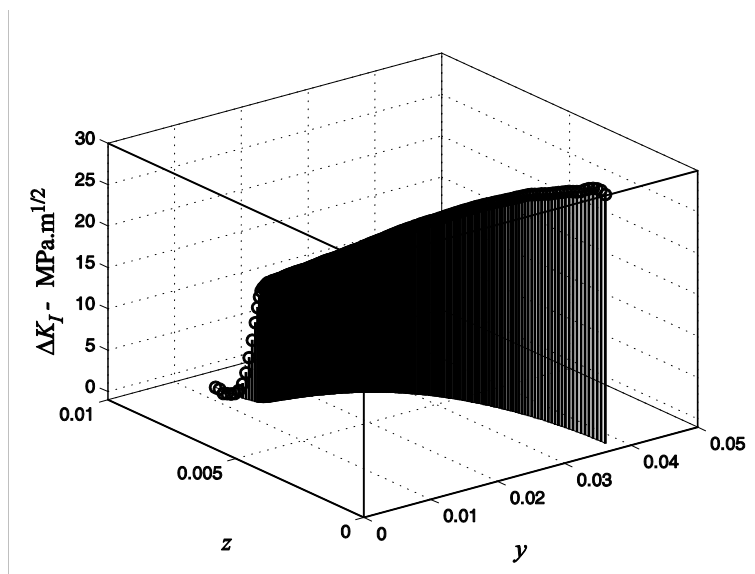


Figura 6.3 – Distribuição do FIT no passo 89 com a geometria da frente da trinca obtida incrementalmente no FRANC3D.

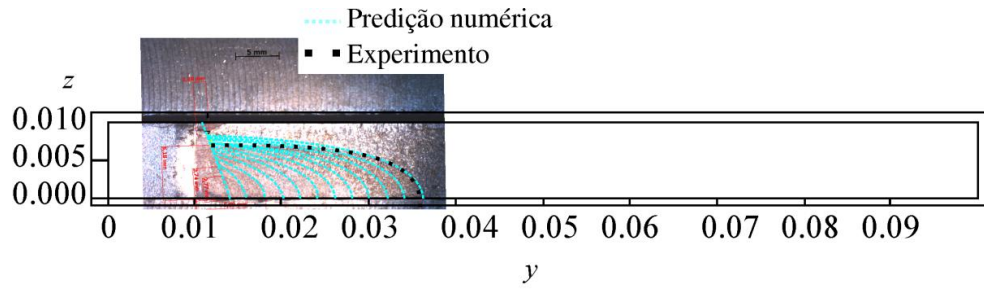


Figura 6.4 – Comparação da geometria obtida na predição numérica com a geometria do CP01.

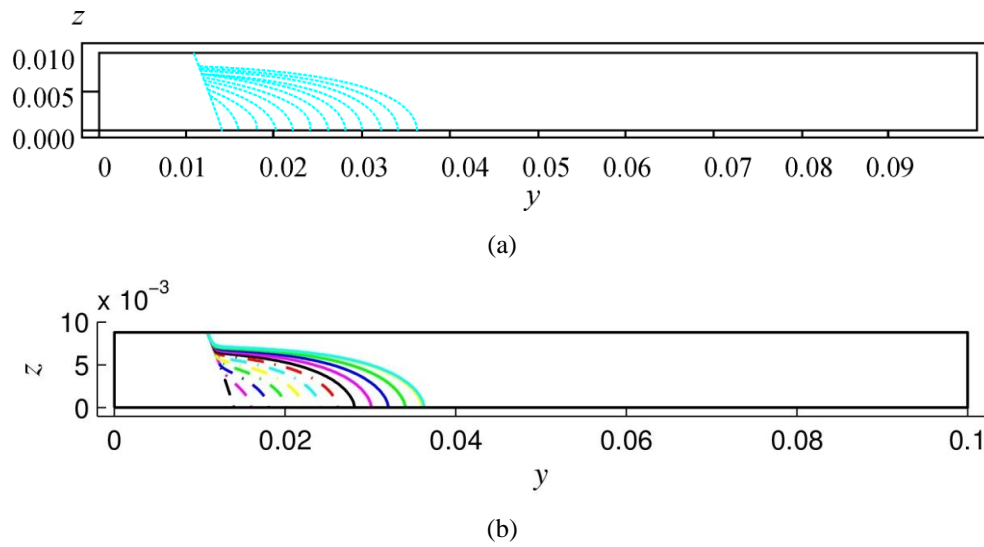


Figura 6.5 – Predições de geometria obtidas no crescimento com $da/dN-\Delta K$ de um corpo-de-prova sob tração: (a) Geometria da frente da trinca a cada 8 passos e (b) Legenda para relacionar a frente da trinca com a distribuição do FIT na figura a seguir.

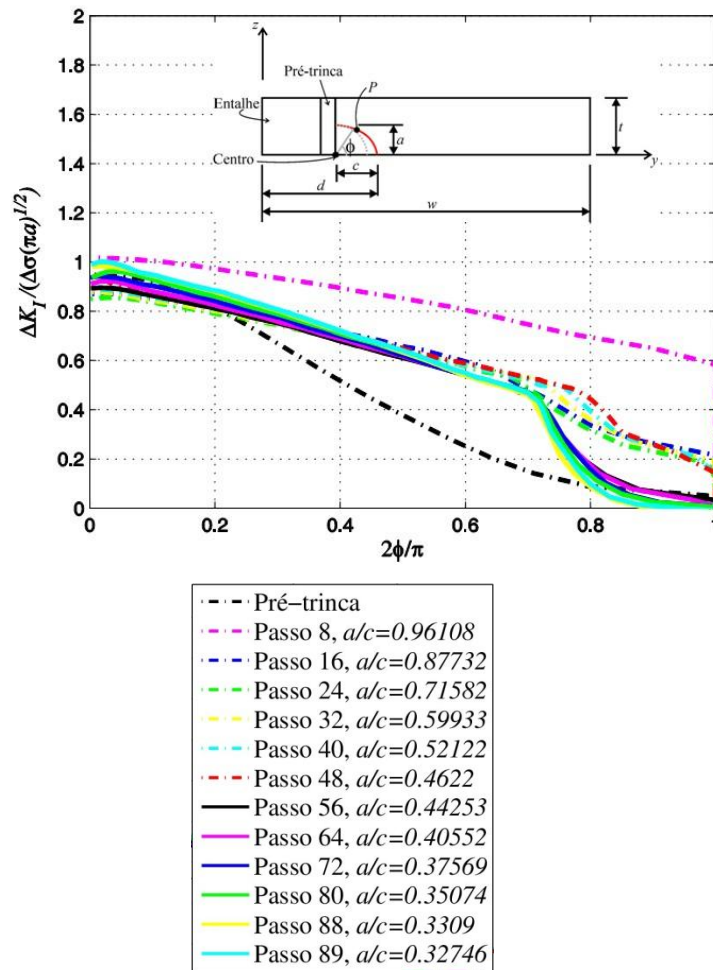


Figura 6.6 –Distribuição do FIT normalizado ao longo do ângulo ϕ obtidos no crescimento da trinca com a $da/dN-\Delta K$

Usando a mesma metodologia de crescimento da trinca com a curva $dd/dN - \Delta K$ e mesmas hipóteses simplificadoras do problema, realiza-se uma nova predição do crescimento da trinca. Nessa simulação incremental foi utilizado um incremento máximo de 0.25 mm ($t/35$) em cada passo. Devida a uma oscilação maior do fator de intensidade de tensão na interseção entre a frente da trinca e superfície inferior da placa, foram necessários 96 passos para se alcançar o comprimento total da trinca obtido no experimento. A predição da frente da trinca a cada 8 passos é ilustrada na Figura 6.7. As geometrias do último incremento de trinca são comparadas com a geometria do CP01, conforme elas estão na Figura 6.8.

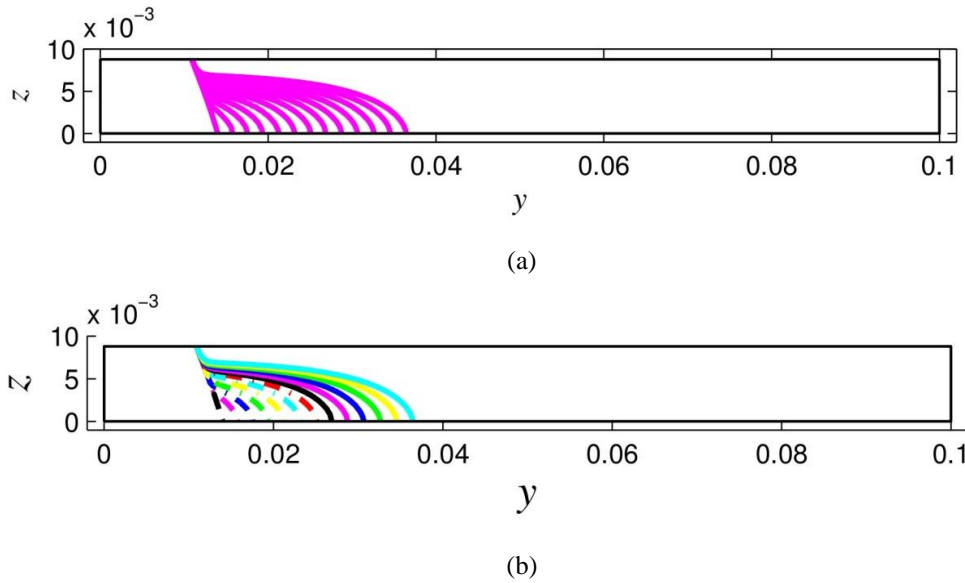


Figura 6.7 - Predições de geometria obtidas no crescimento com $dd/dN-\Delta K$ do CP01: (a) Geometria da frente da trinca a cada 8 passos e (b) Legenda para relacionar a frente da trinca com a distribuição do FIT na figura a seguir.

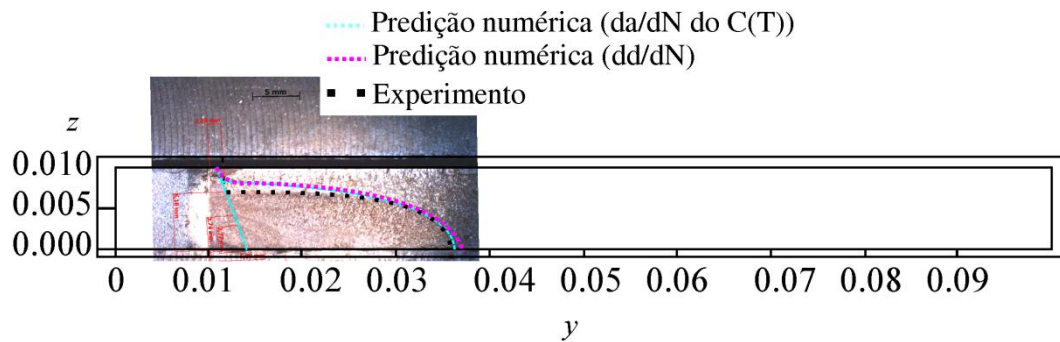


Figura 6.8 – Comparação das geometrias obtidas incrementalmente com a geometria do CP01.

Complementarmente, na Figura 6.9 são apresentados os FIT normalizados em relação ao ângulo ϕ . As distribuições do ΔK_I na frente da trinca foram diferentes quando se utilizou curvas de propagação $da/dN-\Delta K$ e $dd/dN-\Delta K$ (ver Figura 6.6 e Figura 6.9).

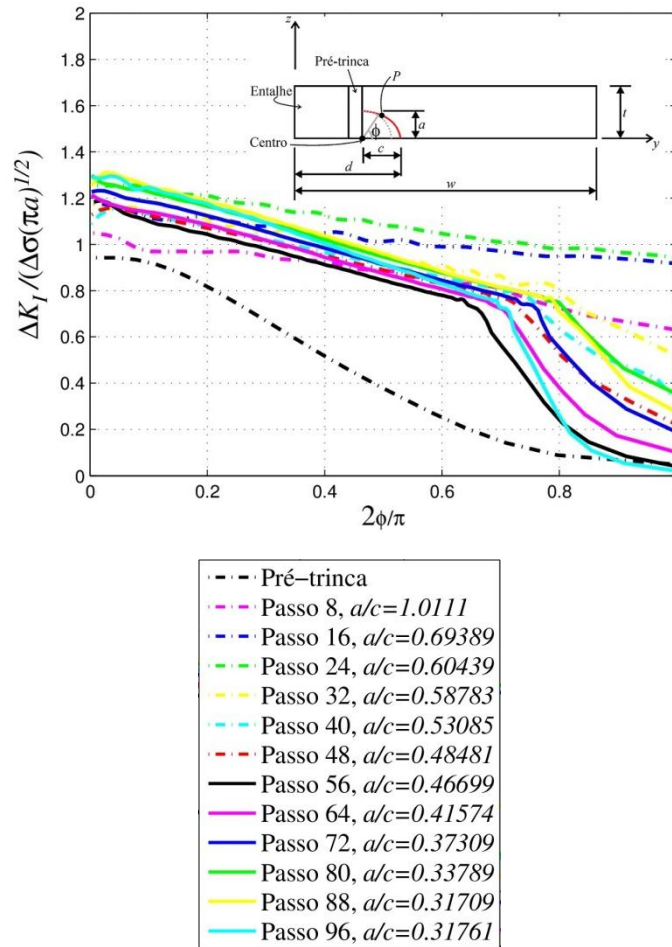


Figura 6.9 - Distribuição do FIT normalizado ao longo do ângulo ϕ obtidos no crescimento da trinca com a $da/dN-\Delta K$.

Com esse resultado, observa-se que a combinação da curva $da/dN-\Delta K$ e distribuição de ΔK_I determinam a nova geometria. Se a curva $da/dN-\Delta K$ usada na propagação incremental é diferente da curva que controla a propagação da trinca no experimento, a distribuição do ΔK_I é diferente da assistida nos experimentos. Mesmo assim, a geometria alcançada na simulação numérica tridimensional é similar. Essa é uma característica do processo iterativo, que é o caso de uma propagação incremental.

A comparação do desvio entre as geometrias é realizada com

$$Desvio(\%) = \frac{OP - OQ}{OQ} 100, \quad (6.3)$$

onde OP e OQ são ilustrados na Figura 6.10. Os desvios calculados para as frentes de trincas estão na Tabela 6.1. Eles são comparados com os dados medidos no CP01, conforme Tabela 6.2.

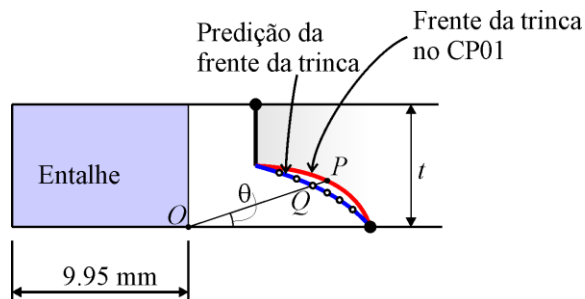


Figura 6.10 – Desvio da geometria da trinca.

Tabela 6.1 – Comparação da geometria da trinca na predição numérica e geometria do CP01.

(a) da/dN .

θ	OQ [mm]	y [mm]	z [mm]	<i>Desvio</i> [%]
0	26.37	36.32	0.04	2.94
10	23.04	32.82	3.86	1.34
20	17.27	26.88	5.78	1.80
30	12.76	22.20	6.48	1.31
40	9.83	19.07	6.76	3.53
50	7.76	16.76	6.92	4.14
60	6.32	15.04	7.01	3.45
73	4.91	13.10	7.10	2.83

(b) dd/dN .

θ	OQ [mm]	y [mm]	z [mm]	<i>Desvio</i> [%]
0	26.74	36.70	0.02	4.41
10	23.10	32.88	3.88	1.05
20	16.99	26.60	5.70	3.37
30	12.46	21.89	6.33	3.68
40	9.59	18.83	6.59	5.88
50	7.60	16.61	6.74	6.00
60	6.19	14.92	6.83	5.44
73	4.79	12.96	6.95	5.18

Tabela 6.2 – Coordenadas da geometria da trinca do CP01 e comprimento OP .

θ	OP [mm]	y [mm]	z [mm]
0	25.61	35.57	0.00
10	23.35	33.13	3.83
20	17.59	27.20	5.76
30	12.93	22.38	6.35
40	10.19	19.48	6.54
50	8.09	17.18	6.64
60	6.54	15.38	6.69
73	5.05	13.43	6.72

6.3. Discussão dos resultados

Como explicado no Capítulo 3 e na Seção 5.5, no caso de magnitudes de ΔK_I localizadas na região II de Paris, a distribuição de ΔK_I influencia na geometria da trinca, mas a magnitude de ΔK_I não é importante. Além disso, com base nas simulações com as curvas $da/dN-\Delta K$ e $dd/dN-\Delta K$, foi observado que embora as inclinações na região II dessas curvas sejam diferentes, não ocorreram mudanças drásticas nas previsões de geometria de frente de trinca quando se usou essas duas curvas.

Com este resultado, pode-se dizer que a geometria da trinca é relacionada às condições de carregamento remotamente aplicado e dimensões da placa. As consequências de diferentes curvas $da/dN-\Delta K$ no processo iterativo podem alterar a quantidade de passos e modificar as distribuições de ΔK_I .

Em ambas as simulações, a geometria da trinca durante o crescimento no programa FRANC3D é satisfatória. Entretanto, podem-se ter distribuições de FIT diferentes, pois elas dependem da geometria da trinca. Por sua vez, essa geometria de trinca subsequente pode ter tanto incrementos Δa_i diferentes (por causa da $da/dN-\Delta K$) como hipótese de direção de crescimento da trinca inadequada, que geram uma geometria de trinca na predição numérica diferente da geometria da trinca obtida no corpo-de-prova durante seu crescimento. A distribuição do FIT tende a ajustar essa geometria, corrigindo qualquer deficiência das hipóteses de

crescimento ou ajuste da curva $da/dN-\Delta K$ na predição numérica a cada passo. Entretanto, não se tem uma distribuição do FIT padronizada em todos os passos, após estabilizar a geometria da trinca. Essa distribuição depende da qualidade das hipóteses de crescimento ou ajuste da curva $da/dN-\Delta K$.

6.4. Previsão de vida

A previsão de vida deve ser realizada em outro programa, pois no programa FRANC3D apenas prevê a geometria da trinca e FIT. Com esta finalidade, foi implementado um código em MATLAB para se obter a previsão. Neste código é necessário determinar o FIT em cada incremento de trinca em um nó da frente da trinca de canto, para que se tenha um caminho da trinca. Neste caso, foi escolhido o FIT na interseção da superfície inferior da placa com a frente da trinca, que é a posição $\phi = 0$. A função de geometria nesta posição é obtida com o polinômio $f(d, w)$ de ajuste dos pontos discretos obtidos em cada incremento de trinca ilustrados na Figura 6.11. Esses pontos discretos foram mostrados previamente nas Figura 6.6 e Figura 6.9 com a normalização do FIT, que foram determinados nas análises de elementos finitos.

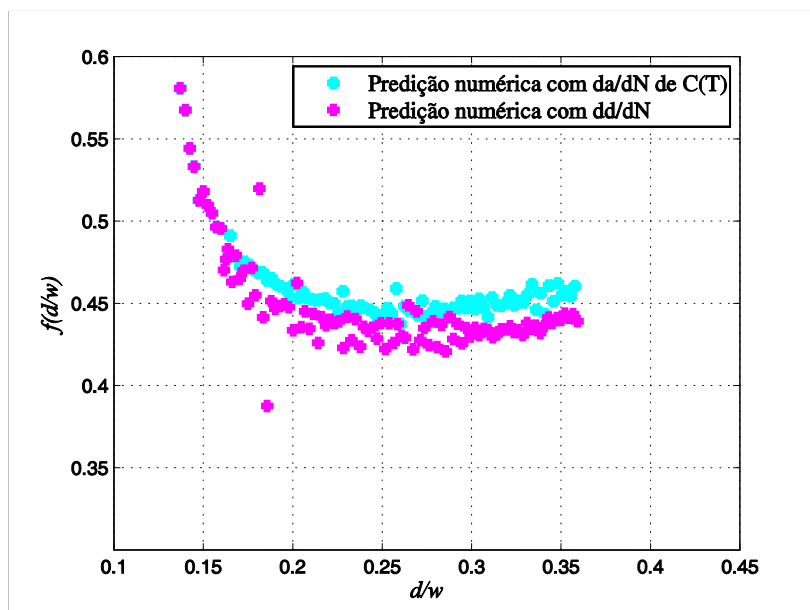


Figura 6.11 – Soluções discretas de fator de forma obtidas nas análises de EF.

Ajustando as soluções discretas F em C (superfície inferior da placa) mostradas na Figura 6.11, podem ser obtidas expressões polinomiais. Desta forma, a expressão polinomial de aproximação da função de geometria $f(d/w)$ usando a curva $da/dN - \Delta K$ é

$$f(d/w) = 449.3 \left(\frac{d}{w}\right)^4 - 487.1 \left(\frac{d}{w}\right)^3 + 196.5 \left(\frac{d}{w}\right)^2 - 35.01 \left(\frac{d}{w}\right) + 2.76 \quad (6.4)$$

e o polinômio de ajuste da função de geometria $f(d/w)$ com a curva $dd/dN - \Delta K$ é

$$f(d/w) = 394 \left(\frac{d}{w}\right)^4 - 429 \left(\frac{d}{w}\right)^3 + 174 \left(\frac{d}{w}\right)^2 - 31.4 \left(\frac{d}{w}\right) + 2.55. \quad (6.5)$$

onde $\Delta K_{I,c} = \Delta\sigma \sqrt{\pi d} f(d,w)$ é a expressão simplificada do FIT na superfície inferior da placa com função de geometria.

Na Figura 6.12 foi comparada a previsão da vida por fadiga, usando a expressão de $\Delta K_{I,c}$ e a curva $da/dN - \Delta K$ e $dd/dN - \Delta K$. Note que $\Delta K_{I,c}$ é estimado com as expressões (6.4) e (6.5).

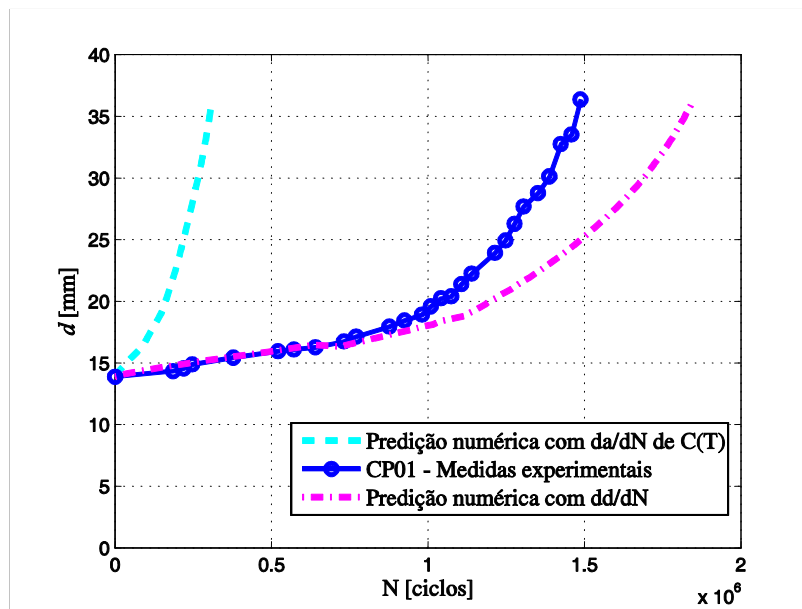


Figura 6.12 – Estimativas de vida na superfície inferior da placa.

Completando estes dados, na Tabela 6.3 estão disponíveis as razões obtidas entre o número total de ciclos estimados e número total de ciclos do experimento. A previsão da vida usando a curva $da/dN-\Delta K$ resulta numa estimativa conservadora. Em outras palavras, a trinca cresceu mais devagar nos experimentos do que o previsto numericamente com a curva $da/dN-\Delta K$. A principal observação é que a magnitude do FIT é importante apenas para prever a vida. Na previsão da geometria, o FIT ajusta eficientemente a geometria da trinca obtida incrementalmente, resultando em boas previsões de geometria independentemente da qualidade dos dados usados na curva $da/dN-\Delta K$.

A previsão da vida usando a curva $dd/dN-\Delta K$ é coincidente com os dados medidos no ensaio do CP01 até 10^6 ciclos ($d = 18.65$ mm). Depois deste ciclo, a previsão de vida N é ligeiramente menor do que a vida medida no corpo-de-prova CP01. As medidas de vida dependem da curva $dd/dN-\Delta K$ e precisão do $\Delta K_{I,c}$. Por esta razão, no Capítulo 7 é realizada uma melhor previsão de vida utilizando o conceito de fechamento da trinca proposto por Elber (1970).

Tabela 6.3 – Resumo das estimativas totais de número de ciclos em d .

Dados considerados	N (ciclos)	N/N_{exp}
Experimentos	1,487,115	1.00
$da/dN-\Delta K$	303,654	0.20
$dd/dN-\Delta K$.	1,849,010	1.24

6.5. Hipótese de direção de crescimento da trinca

Como já comentado, a hipótese de direção de crescimento da trinca é perpendicular à frente da trinca atual. Entretanto, na Seção 5.4 foi sugerida uma hipótese de crescimento mais adequada. Contudo, é um desafio conhecer a direção de propagação quando a trinca ainda é passante e inicia-se a aplicação do carregamento remoto de flexão pura.

Uma hipótese mais adequada para a direção de crescimento é assumir que a trinca cresce perpendicular à toda a frente de trinca inicial. Assim, usando a primeira distribuição de FIT (ver Figura 6.13), a trinca muda de geometria apenas próxima à superfície inferior da placa. A geometria da frente subsequente é ilustrada na Figura 6.14 (a).

A partir do segundo passo, uma nova hipótese de propagação de trinca deve ser feita. Assume-se que a trinca cresce perpendicular ao trecho que propagou no primeiro passo (ver Figura 6.14 (b)) sem ocorrer qualquer interferência do restante da trinca.

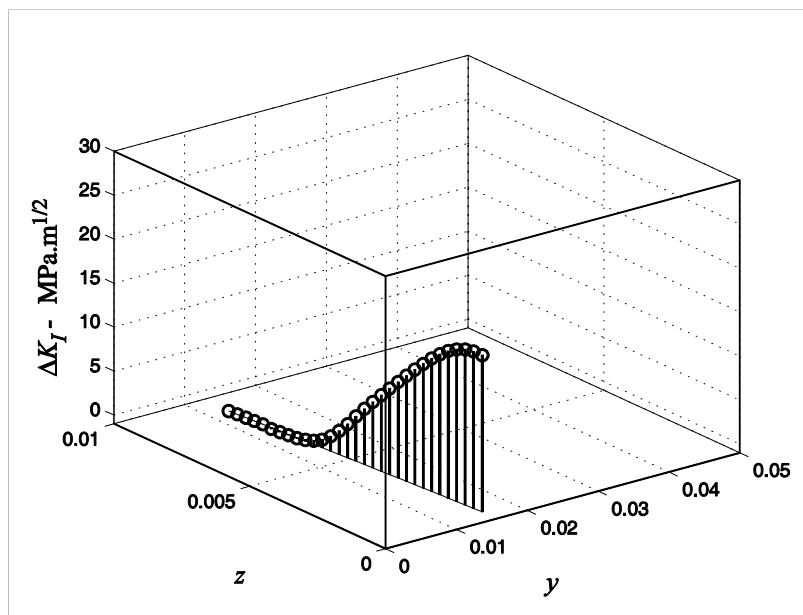


Figura 6.13 – Distribuição do FIT na superfície de trincamento com geometria da pré-trinca.

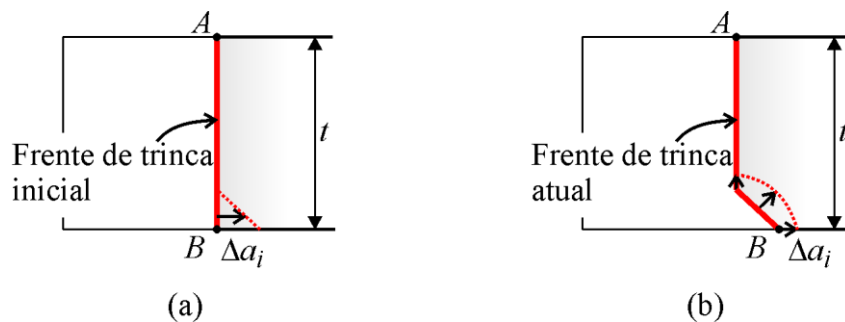


Figura 6.14 – Direção de propagação: (a) Passo 1 e (b) Passo 2.