

7

Avaliação de ΔK nas geometrias dos experimentos

Durante os ensaios no Laboratório de Fadiga executados nesta tese, foram realizadas diversas marcas nas frentes da trinca, conforme foi mostrado no Capítulo 4. A partir destas marcas, neste capítulo pretende-se conhecer a distribuição do FIT nos três corpos-de-prova com entalhe de borda, ou seja, nos CP01, CP06 e CP07, usando o programa FRANC3D e tratando essa distribuição do FIT com a metodologia de extrapolação de ΔK_I (ver Seção 5.3.3). Essas distribuições são relacionadas com o ângulo ϕ (ver Figura 5.9) indicado nas geometrias simplificadas para trinca curta (quarto-elipse concêntrica) e para trinca longa (quarto-elipse não concêntrica). Após determinar as distribuições de FIT, são ajustadas expressões de fator de intensidade de tensão, facilitando o uso destas soluções em estimativas de vida. Finalmente, são feitas previsões de vida usando as soluções de FIT e curvas $da/dN - \Delta K$ de um corpo-de-prova padrão sob tração.

A vantagem dessa abordagem é que não se estimam geometrias de frente de trinca durante o crescimento, conseqüentemente, elas independem da curva $da/dN - \Delta K$. A curva $da/dN - \Delta K$ é empregada apenas na previsão de vida.

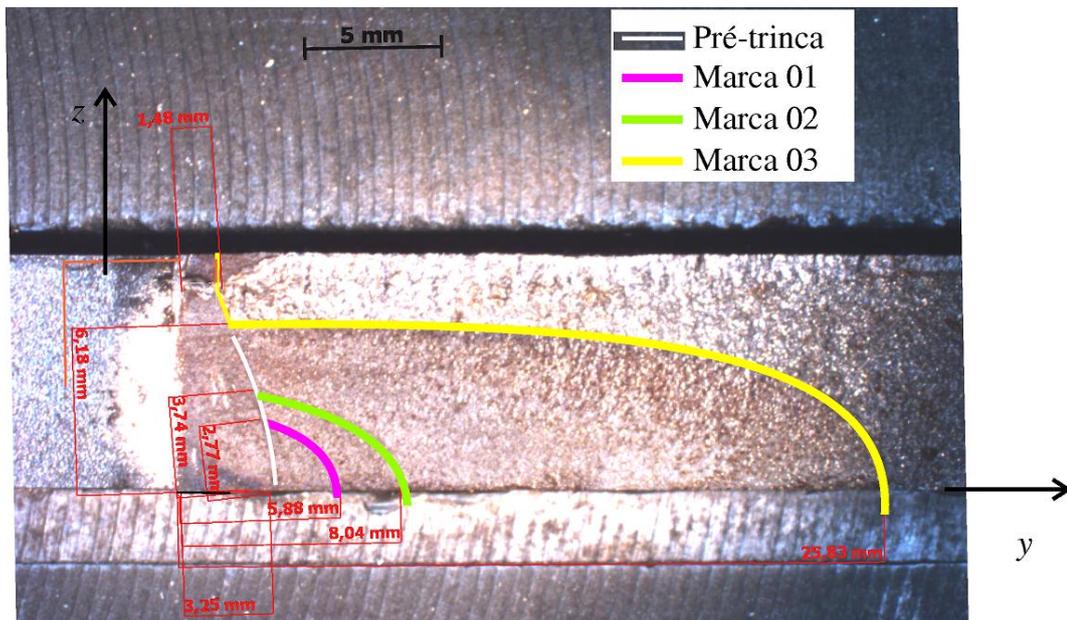
As hipóteses simplificadoras adotadas na análise de elementos finitos no programa FRANC3D acoplado com o ABAQUS são previamente apresentadas na Seção 5.1 e as dimensões da placa são fornecidas no Capítulo 4 para cada corpo-de-prova analisado.

7.1.

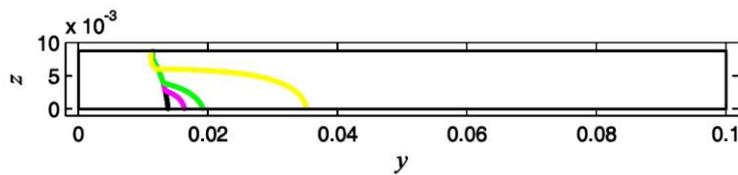
Frentes de trincas marcadas por aumentos de cargas

Três geometrias de frente de trinca foram marcadas por aumento do carregamento aplicado durante o experimento do CP01. Na Figura 7.1 (b) são apresentadas essas geometrias das frentes de trinca.

A geometria da pré-trinca é indicada com uma linha de cor branca na Figura 7.1. As cores magenta, verde e amarela são, respectivamente, as marcas das frentes de trincas chamadas por marcas 01, 02 e 03. As razões entre profundidade e comprimento da trinca (a/c) são 1.08 (marca 01), 0.77 (marca 02) e 0.28 (marca 03). Caso empreguem-se os semi-eixos das curvas quarto-elípticas não concêntricas como mostrado no Capítulo 4, as razões (a/c) são 0.66 (marca 01), 0.55 (marca 02) e 0.42 (marca 03).



(a)



(b)

Figura 7.1 – Marcas das geometrias da trinca no CP01: (a) Corpo-de-prova e (b) Geometria das frentes de trinca inseridas no programa FRANC3D.

A partir dessas marcas, calcula-se o ΔK_I , que pode ser escrito como

$$\Delta K_I = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} F, \quad (7.1)$$

onde $\Delta\sigma$ é a tensão máxima do carregamento aplicado. a é a profundidade da trinca de canto e F é o fator de geometria. O ΔK_I é obtido numericamente no FRANC3D, desta forma, rearranja-se a expressão (7.1) e obtém-se F , como

$$F = \frac{\Delta K_I}{\Delta\sigma\sqrt{\pi a}} \quad (7.2)$$

Note que os valores de F , apresentados na Figura 7.2, estão no trecho confiável de distribuição do FIT (conforme metodologia descrita na Seção 5.3.3). Adicionalmente, o termo a direita da igualdade na expressão (7.2) é chamado por FIT normalizado.

Como a pré-trinca é ligeiramente inclinada, a frente de trinca curva não atinge valores de ϕ igual a 90° . A marca 01 e a marca 02 interseccionam, respectivamente, a pré-trinca no ângulo de 64° e no ângulo 75° a partir da superfície inferior da placa.

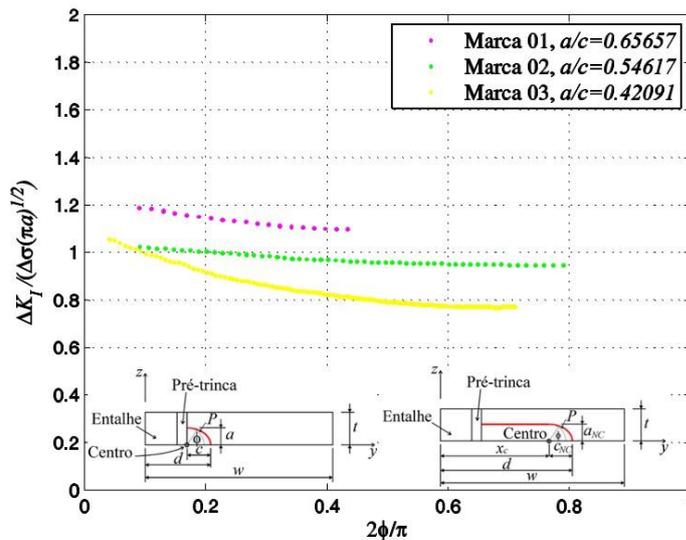


Figura 7.2 – FIT normalizado em relação ao ângulo ϕ obtido no FRANC3D com as marcas do CP01.

Conforme distribuições de F na Figura 7.2, observa-se que F decresce à medida que se distancia da superfície inferior da placa ($\phi = 0$), tendendo a valores constantes. Isto é coerente com o experimento, pois as marcas na profundidade da trinca eram menos nítidas, indicando uma magnitude do FIT constante.

A distribuição de F tende a um valor constante em trincas curtas (marca 01 e 02), que é simplificada por uma curva quarto-elipse concêntrica. Em trinca longa (marca 03), a magnitude de F na superfície inferior da placa (em $\phi = 0$) aumenta. Por outro lado, a magnitude de F na profundidade da trinca ($\phi = \pi/2$) tende a valores constantes de magnitude de aproximadamente 0.8.

Complementarmente, os dados mostrados na Figura 7.2 estão disponíveis na Tabela 7.1. Note que cada geometria tem uma razão da profundidade da trinca (a/t) e uma razão entre semi-eixos (a/c) ajustada pela curva quarto-elíptica.

Tabela 7.1 – Fatores de geometria do CP01 determinados no trecho confiável de ΔK_I .

| | | Ângulo ϕ , em graus. | | | | | | | | | | |
|---------|-------|---------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| | a/c | a/t | 0 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | i |
| Marca01 | 0.66 | 0.30 | - | - | 1.18 | 1.14 | 1.11 | 1.10 | - | - | - | 1 |
| Marca02 | 0.55 | 0.42 | - | - | 1.00 | 1.00 | 0.98 | 0.96 | 0.95 | 0.95 | 0.95 | 2 |
| Marca03 | 0.42 | 0.70 | - | 1.05 | 0.99 | 0.90 | 0.85 | 0.81 | 0.78 | 0.77 | - | 3 |

Com base nos dados apresentados na Tabela 7.1, verifica-se que à medida que a trinca se propaga, a relação a/c e o fator F decrescem. Adicionalmente, em cada a/c , F decresce enquanto ϕ aumenta.

Para facilitar o uso dos fatores de geometria F , é proposto um ajuste com uma expressão polinomial para descrever uma função de geometria empregada no FIT em uma frente de trinca com razão a/c conhecida. A expressão do FIT é $\Delta K_I(\phi, a/c) = \Delta\sigma\sqrt{\pi a} p_i(\phi)$, onde p_i é a função de geometria que ajusta os valores discretos de F por um polinômio, o índice i é encontrado na Tabela 7.1. Assim, os polinômios p_i são

$$\begin{aligned}
 p_1(\phi) &= 1.24 \times 10^{-6} \phi^3 - 2.40 \times 10^{-5} \phi^2 - 4.2 \times 10^{-3} \phi + 1.22 && \text{(para } \phi \leq 40^\circ) \\
 p_2(\phi) &= 9.40 \times 10^{-8} \phi^3 + 1.11 \times 10^{-6} \phi^2 - 2.6 \times 10^{-3} \phi + 1.04 && \text{(para } \phi \leq 70^\circ) \\
 p_3(\phi) &= -5.76 \times 10^{-7} \phi^3 + 1.48 \times 10^{-4} \phi^2 - 1.23 \times 10^{-2} \phi + 1.10 && \text{(para } \phi \leq 60^\circ)
 \end{aligned} \quad (7.3)$$

Esses polinômios são mostrados na Figura 7.3. Os valores são extrapolados até a superfície inferior da placa ($\phi = 0$) com o polinômio p_i e são assumidos constantes desde o ângulo indicado nas expressões p_i até $\phi = \pi/2$. Em trincas

longas (marca 03), onde a geometria da trinca é simplificada por um trecho com profundidade constante e paralela as superfícies da placa (ver Figura 5.9 (b)), o fator de geometria é assumido constante e igual ao fator de geometria determinado em $\phi = \pi/2$.

Finalmente, o ΔK no modo I pode ser calculado em cada razão a/c como

$$\begin{aligned}\Delta K_I(\phi, a/c = 0.66) &= \Delta\sigma\sqrt{2.6 \times 10^{-3} \pi} p_1(\phi) && (\text{para } \phi \leq 40^\circ) \\ \Delta K_I(\phi, a/c = 0.55) &= \Delta\sigma\sqrt{3.7 \times 10^{-3} \pi} p_2(\phi) && (\text{para } \phi \leq 70^\circ). \quad (7.4) \\ \Delta K_I(\phi, a/c = 0.42) &= \Delta\sigma\sqrt{6.2 \times 10^{-3} \pi} p_3(\phi) && (\text{para } \phi \leq 60^\circ)\end{aligned}$$

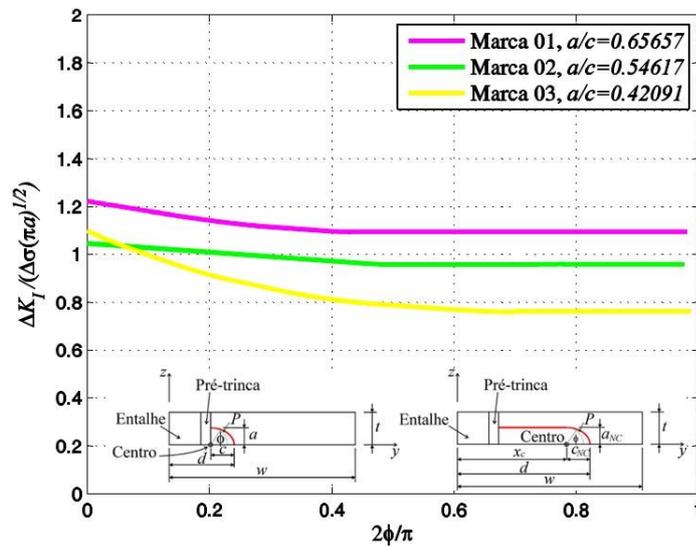


Figura 7.3 – Extrapolações do FIT normalizado no CP01, usando metodologia de extrapolação do FIT.

7.2.

Frentes de trincas marcadas por blocos de sobrecargas

Nesta seção são apresentadas as distribuições de FIT no CP06 nas marcas 01, 02, 03, 04 e 05. Na Figura 7.4 são ilustradas essas marcas de sobrecargas e geometria usada no programa FRANC3D. As razões dos semi-eixos a/c são, respectivamente, 0,71, 0,44, 0,33, 0,24 e 0,19.

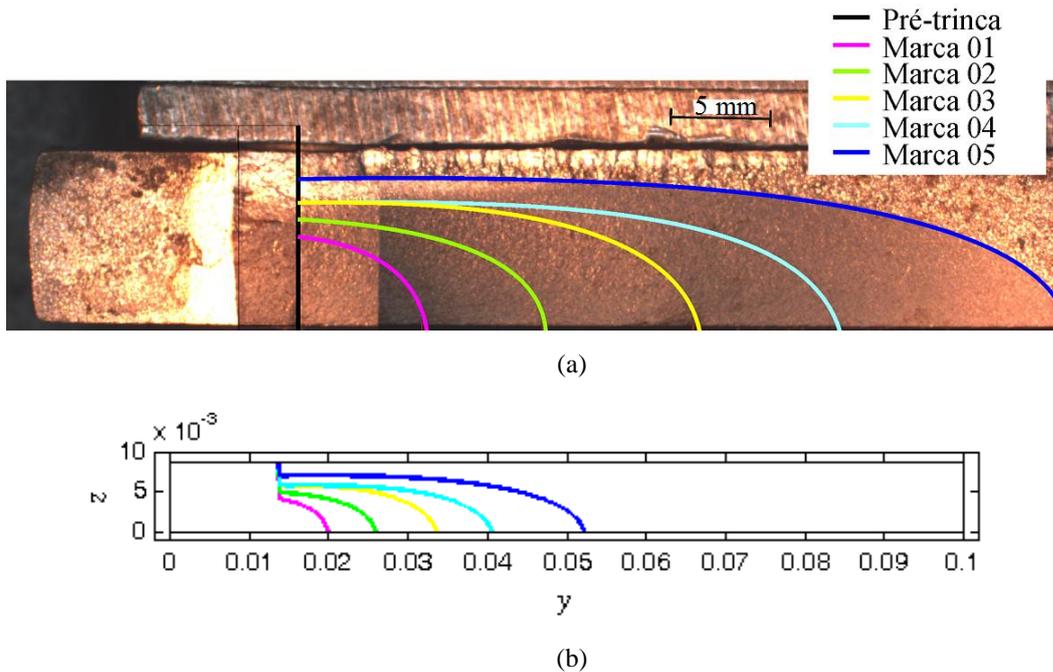


Figura 7.4 – Marcas das geometrias da trinca no CP06: (a) Corpo-de-prova e (b) Geometria da trinca usada no FRANC3D.

Na Figura 7.5 são mostradas as distribuições de F obtidas a partir do FIT no trecho confiável, usando resultados de FIT calculados no programa FRANC3D. Complementarmente, na Tabela 7.2 estão disponíveis os valores de F .

Os valores de F aumentam à medida que se aproximam da superfície inferior da placa ($\phi = 0$). Para uma magnitude fixa de ϕ , os valores de F decrescem até a razão a/c igual a 0.43 e, para a próxima razão a/c , F começa a crescer. Aparentemente, o decréscimo de F ocorre na transição da geometria da trinca inicial (trinca passante) até estabilizar em uma geometria com trinca de superfície.

Novamente, expressões polinomiais de grau 1, 2 ou 3 foram usadas para ajustar F no trecho confiável do FIT e extrapolar até a superfície inferior da placa. Primeiro, escreve-se o fator de intensidade de tensão como

$$\Delta K_I(\phi, a/c) = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} p_i(\phi), \quad (7.5)$$

onde $p_i(\phi)$ é o polinômio que ajusta a distribuição de F em relação a ϕ até alcançar a superfície inferior da placa ($\phi = 0$).

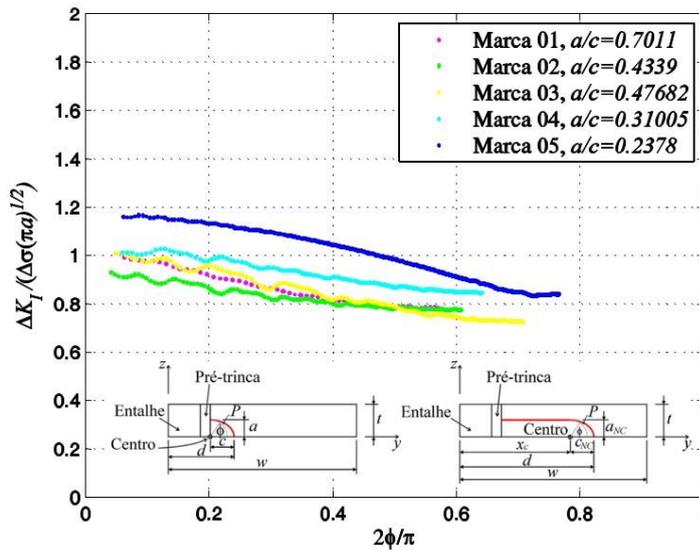


Figura 7.5 – FIT normalizado em relação ao ângulo ϕ obtido no FRANC3D com as marcas do CP06.

Tabela 7.2 – Fatores de geometria do CP06 determinados no trecho confiável de ΔK_I .

| | | Ângulo ϕ , em graus | | | | | | | |
|---------|-------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | a/c | a/t | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| Marca01 | 0.70 | 0.54 | 1.00 | 0.97 | 0.90 | 0.84 | 0.80 | 0.79 | |
| Marca02 | 0.43 | 0.65 | 0.91 | 0.89 | 0.84 | 0.82 | 0.79 | 0.78 | |
| Marca03 | 0.48 | 0.78 | 1.00 | 0.98 | 0.93 | 0.87 | 0.80 | 0.75 | 0.73 |
| Marca04 | 0.31 | 0.78 | | 1.02 | 0.99 | 0.94 | 0.89 | 0.86 | |
| Marca05 | 0.24 | 0.87 | 1.16 | 1.16 | 1.12 | 1.08 | 1.02 | 0.95 | 0.86 |

A distribuição do FIT para cada razão a/c pode ser determinada como

$$\begin{aligned}
 \Delta K_I(\phi, a/c = 0.71) &= \Delta\sigma \sqrt{4.5 \times 10^{-3}} \pi p_1(\phi) && (\text{para } \phi \leq 50^\circ) \\
 \Delta K_I(\phi, a/c = 0.44) &= \Delta\sigma \sqrt{5.4 \times 10^{-3}} \pi p_2(\phi) && (\text{para } \phi \leq 55^\circ) \\
 \Delta K_I(\phi, a/c = 0.48) &= \Delta\sigma \sqrt{6.2 \times 10^{-3}} \pi p_3(\phi) && (\text{para } \phi \leq 60^\circ). \quad (7.6) \\
 \Delta K_I(\phi, a/c = 0.31) &= \Delta\sigma \sqrt{6.2 \times 10^{-3}} \pi p_4(\phi) && (\text{para } \phi \leq 50^\circ) \\
 \Delta K_I(\phi, a/c = 0.24) &= \Delta\sigma \sqrt{7.5 \times 10^{-3}} \pi p_5(\phi) && (\text{para } \phi \leq 65^\circ)
 \end{aligned}$$

com

$$\begin{aligned}
 p_1(\phi) &= 2.35 \times 10^{-6} \phi^3 - 1.33 \times 10^{-4} \phi^2 - 3.9 \times 10^{-3} \phi + 1.02 && (\text{para } \phi \leq 50^\circ) \\
 p_2(\phi) &= 7.03 \times 10^{-7} \phi^3 - 1.99 \times 10^{-5} \phi^2 - 4.0 \times 10^{-3} \phi + 0.94 && (\text{para } \phi \leq 55^\circ) \\
 p_3(\phi) &= 1.48 \times 10^{-6} \phi^3 - 1.27 \times 10^{-4} \phi^2 - 2.5 \times 10^{-3} \phi + 1.02 && (\text{para } \phi \leq 60^\circ) \\
 p_4(\phi) &= -3.8 \times 10^{-3} \phi + 1.05 && (\text{para } \phi \leq 50^\circ) \\
 p_5(\phi) &= -6.2 \times 10^{-3} \phi + 1.25 && (\text{para } \phi \leq 65^\circ)
 \end{aligned} \quad (7.7)$$

O valor mínimo de F é extrapolado por uma reta paralela ao eixo das coordenadas desde o ângulo indicado na expressão de p_i até o ângulo $\phi = \pi/2$, que corresponde à posição da profundidade da trinca a . Essas distribuições de F extrapoladas são apresentadas na Figura 7.6.

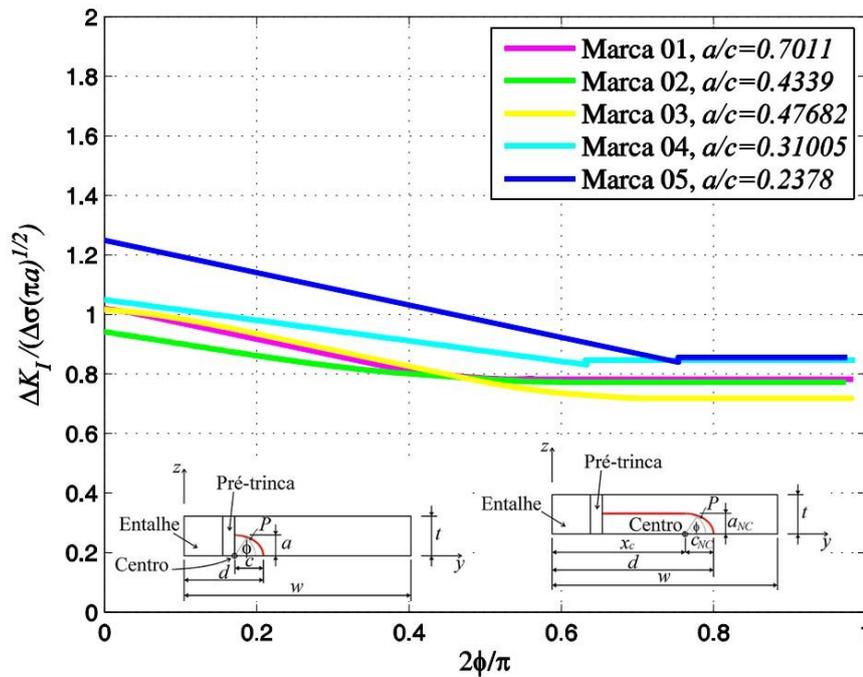


Figura 7.6 – Extrapolações do FIT normalizado para CP06, usando metodologia de extrapolação do FIT.

7.3.

Frentes de trincas marcadas por blocos de subcargas

Nesta seção são reproduzidas as marcas de frente de trinca no CP07 no programa FRANC3D, determinando-se o fator de intensidade de tensão.

Dezessete marcas de frente de trinca deste CP foram analisadas, que são ilustradas na Figura 7.7.

Na Figura 7.8 é mostrada a distribuição do FIT normalizado na frente da trinca. Como existem diversas marcas de frente de trinca, percebe-se uma tendência a valores constantes do fator F à medida que ϕ se aproxima de $\pi/2$. Esse valor é aproximadamente 0.8. Em todas as marcas, F aumenta conforme se aproxima da superfície inferior da placa ($\phi = 0$).

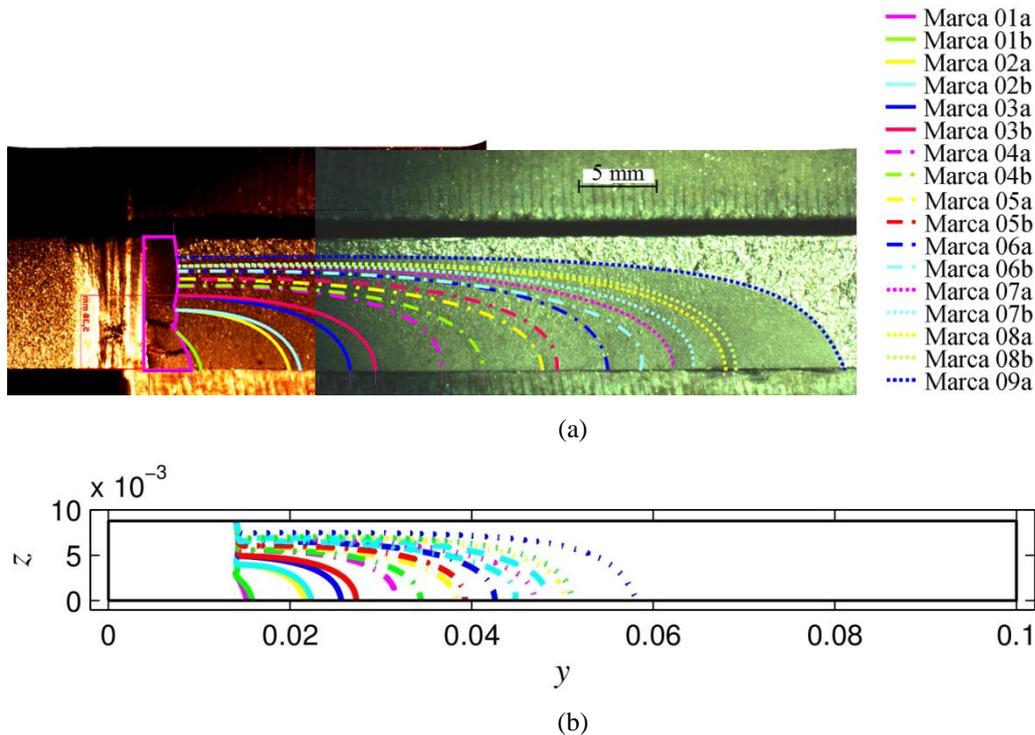


Figura 7.7 – Marcas das geometrias da trinca no CP07: (a) Corpo-de-prova e (b) Geometria da marcas de frente da trinca usada na Figura 7.8.

Os dados apresentados na Figura 7.8 são colocados na Tabela 7.3. Para um dado ϕ , os valores de F decrescem até a razão a/c igual a 0.45, a partir da próxima razão a/c tende a valores de F constantes e, à medida que a trinca aumenta seu comprimento, F começam a aumentar. Esse decréscimo de F pode ser oriundo da mudança de geometria da frente de trinca, que inicia passante e torna-se uma trinca de superfície.

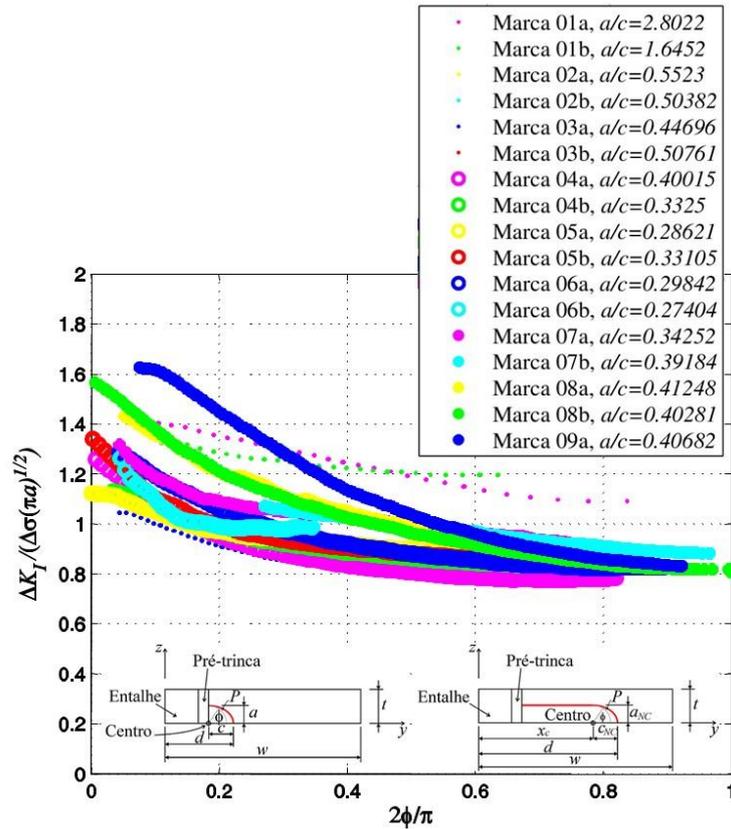


Figura 7.8 – FIT normalizado em relação ao ângulo ϕ obtido no FRANC3D com as marcas do CP07.

Tabela 7.3 – Fatores de geometria do CP07 determinados no trecho confiável de ΔK_I .

| | a/c | a/t | Ângulo ϕ , em graus | | | | | | | | | i |
|---------|-------|-------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| | | | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | |
| Marca1a | 2.80 | 0.29 | | 1.40 | 1.34 | 1.28 | 1.22 | 1.16 | 1.11 | 1.09 | | 1 |
| Marca1b | 1.65 | 0.29 | | 1.33 | 1.28 | 1.24 | 1.21 | 1.20 | | | | 2 |
| Marca2a | 0.55 | 0.45 | | 1.02 | 0.97 | 0.91 | 0.87 | 0.86 | | | | 3 |
| Marca2b | 0.50 | 0.45 | | 1.05 | 0.96 | 0.91 | 0.87 | 0.85 | | | | 4 |
| Marca3a | 0.45 | 0.56 | 1.04 | 0.98 | 0.90 | 0.84 | 0.81 | 0.78 | | | | 5 |
| Marca3b | 0.51 | 0.56 | 1.10 | 1.04 | 0.94 | 0.88 | 0.85 | | | | | 6 |
| Marca4a | 0.40 | 0.63 | 1.15 | 1.05 | 0.93 | 0.86 | 0.82 | 0.79 | 0.78 | 0.78 | | 7 |
| Marca4b | 0.33 | 0.63 | 1.11 | 1.05 | 0.96 | 0.91 | 0.88 | 0.85 | 0.84 | | | 8 |
| Marca5a | 0.29 | 0.69 | 1.09 | 1.04 | 0.96 | 0.93 | 0.91 | 0.89 | 0.87 | 0.87 | | 9 |
| Marca5b | 0.33 | 0.69 | 1.20 | 1.09 | 0.97 | 0.92 | 0.90 | 0.87 | 0.85 | 0.85 | | 10 |
| Marca6a | 0.30 | 0.75 | 1.26 | 1.18 | 1.03 | 0.95 | 0.90 | 0.86 | 0.84 | 0.82 | 0.82 | 11 |
| Marca6b | 0.27 | 0.75 | 1.21 | 1.07 | 0.98 | 0.99 | | | | | | 12 |
| Marca7a | 0.34 | 0.78 | 1.26 | 1.17 | 1.08 | 1.04 | 1.01 | 0.98 | 0.95 | | | 13 |
| Marca7b | 0.39 | 0.78 | | | | 1.05 | 1.01 | 0.98 | 0.94 | 0.92 | 0.89 | 14 |
| Marca8a | 0.41 | 0.80 | 1.42 | 1.35 | 1.19 | 1.10 | 1.02 | 0.96 | | | | 15 |
| Marca8b | 0.40 | 0.80 | 1.47 | 1.34 | 1.18 | 1.07 | 1.00 | 0.94 | 0.89 | 0.85 | 0.82 | 16 |
| Marca9a | 0.41 | 0.85 | | 1.60 | 1.42 | 1.23 | 1.09 | 0.99 | 0.92 | 0.87 | 0.84 | 17 |

A expressão simplificada do FIT para a razão a/c é dada por

$$\Delta K_I(\phi, a/c) = \Delta\sigma\sqrt{\pi a}p_i(\phi), \quad (7.8)$$

onde ϕ é o ângulo que varia desde 0 à magnitude indicada na expressão p_i (expressão 7.9). Novamente, expressões polinomiais p_i são usadas para extrapolar o fator de intensidade de tensão normalizado até a superfície inferior da placa ($\phi=0^\circ$). Note que o índice i usado para identificar os polinômios foi relacionado às marcas da frente da trinca na Tabela 7.3. Estas expressões são:

$$\begin{aligned} p_1(\phi) &= 1.26 \times 10^{-6} \phi^3 - 1.24 \times 10^{-4} \phi^2 - 2.3 \times 10^{-3} \phi + 1.43 && (\text{para } \phi \leq 70^\circ) \\ p_2(\phi) &= -2.20 \times 10^{-7} \phi^3 + 8.19 \times 10^{-5} \phi^2 - 7.5 \times 10^{-3} \phi + 1.40 && (\text{para } \phi \leq 50^\circ) \\ p_3(\phi) &= 9.44 \times 10^{-7} \phi^3 - 7.42 \times 10^{-6} \phi^2 - 6.9 \times 10^{-3} \phi + 1.10 && (\text{para } \phi \leq 50^\circ) \\ p_4(\phi) &= -4.08 \times 10^{-8} \phi^3 + 1.07 \times 10^{-4} \phi^2 - 1.11 \times 10^{-2} \phi + 1.14 && (\text{para } \phi \leq 50^\circ) \\ p_5(\phi) &= -1.06 \times 10^{-6} \phi^3 + 2.18 \times 10^{-4} \phi^2 - 1.47 \times 10^{-2} \phi + 1.11 && (\text{para } \phi \leq 50^\circ) \\ p_6(\phi) &= 6.11 \times 10^{-7} \phi^3 + 9.45 \times 10^{-5} \phi^2 - 1.23 \times 10^{-2} \phi + 1.15 && (\text{para } \phi \leq 40^\circ) \\ p_7(\phi) &= -2.03 \times 10^{-6} \phi^3 + 3.65 \times 10^{-4} \phi^2 - 2.24 \times 10^{-2} \phi + 1.26 && (\text{para } \phi \leq 70^\circ) \\ p_8(\phi) &= -1.36 \times 10^{-6} \phi^3 + 2.33 \times 10^{-4} \phi^2 - 1.05 \times 10^{-2} \phi + 1.13 && (\text{para } \phi \leq 60^\circ) \\ p_9(\phi) &= -7.16 \times 10^{-7} \phi^3 + 1.49 \times 10^{-4} \phi^2 - 1.23 \times 10^{-2} \phi + 1.12 && (\text{para } \phi \leq 70^\circ) \\ p_{10}(\phi) &= -2.20 \times 10^{-6} \phi^3 + 3.77 \times 10^{-4} \phi^2 - 2.21 \times 10^{-2} \phi + 1.30 && (\text{para } \phi \leq 70^\circ) \\ p_{11}(\phi) &= -1.27 \times 10^{-6} \phi^3 + 2.71 \times 10^{-4} \phi^2 - 2.02 \times 10^{-2} \phi + 1.35 && (\text{para } \phi \leq 80^\circ) \\ p_{12}(\phi) &= -3.20 \times 10^{-5} \phi^3 + 2.40 \times 10^{-3} \phi^2 - 5.82 \times 10^{-2} \phi + 1.45 && (\text{para } \phi \leq 30^\circ) \\ p_{13}(\phi) &= -3.12 \times 10^{-6} \phi^3 + 4.04 \times 10^{-4} \phi^2 - 1.95 \times 10^{-2} \phi + 1.34 && (\text{para } \phi \leq 60^\circ) \\ p_{14}(\phi) &= 4.76 \times 10^{-7} \phi^3 - 6.58 \times 10^{-5} \phi^2 - 4.89 \times 10^{-4} \phi + 1.11 && (\text{para } \phi \leq 80^\circ) \\ p_{15}(\phi) &= -2.36 \times 10^{-6} \phi^3 + 3.51 \times 10^{-4} \phi^2 - 2.32 \times 10^{-2} \phi + 1.54 && (\text{para } \phi \leq 50^\circ) \\ p_{16}(\phi) &= -1.44 \times 10^{-6} \phi^3 + 3.03 \times 10^{-4} \phi^2 - 2.47 \times 10^{-2} \phi + 1.54 && (\text{para } \phi \leq 90^\circ) \\ p_{17}(\phi) &= -1.05 \times 10^{-6} \phi^3 + 3.10 \times 10^{-4} \phi^2 - 3.18 \times 10^{-2} \phi + 1.86 && (\text{para } \phi \leq 80^\circ) \end{aligned} \quad (7.9)$$

As expressões do fator de intensidade de tensão são reescritas com os valores já substituídos de a :

$$\begin{aligned}
\Delta K_I(\phi, a/c = 2.80) &= \Delta\sigma\sqrt{2.6\times 10^{-3}}\pi p_1(\phi) && (\text{para } \phi \leq 80^\circ) \\
\Delta K_I(\phi, a/c = 1.65) &= \Delta\sigma\sqrt{2.6\times 10^{-3}}\pi p_2(\phi) && (\text{para } \phi \leq 57^\circ) \\
\Delta K_I(\phi, a/c = 0.55) &= \Delta\sigma\sqrt{4.0\times 10^{-3}}\pi p_3(\phi) && (\text{para } \phi \leq 55^\circ) \\
\Delta K_I(\phi, a/c = 0.50) &= \Delta\sigma\sqrt{4.0\times 10^{-3}}\pi p_4(\phi) && (\text{para } \phi \leq 55^\circ) \\
\Delta K_I(\phi, a/c = 0.45) &= \Delta\sigma\sqrt{4.9\times 10^{-3}}\pi p_5(\phi) && (\text{para } \phi \leq 55^\circ) \\
\Delta K_I(\phi, a/c = 0.51) &= \Delta\sigma\sqrt{4.9\times 10^{-3}}\pi p_6(\phi) && (\text{para } \phi \leq 55^\circ) \\
\Delta K_I(\phi, a/c = 0.40) &= \Delta\sigma\sqrt{5.6\times 10^{-3}}\pi p_7(\phi) && (\text{para } \phi \leq 60^\circ) \\
\Delta K_I(\phi, a/c = 0.33) &= \Delta\sigma\sqrt{5.6\times 10^{-3}}\pi p_8(\phi) && (\text{para } \phi \leq 60^\circ) \\
\Delta K_I(\phi, a/c = 0.29) &= \Delta\sigma\sqrt{6.0\times 10^{-3}}\pi p_9(\phi) && (\text{para } \phi \leq 65^\circ) \\
\Delta K_I(\phi, a/c = 0.33) &= \Delta\sigma\sqrt{6.0\times 10^{-3}}\pi p_{10}(\phi) && (\text{para } \phi \leq 60^\circ) \\
\Delta K_I(\phi, a/c = 0.30) &= \Delta\sigma\sqrt{6.6\times 10^{-3}}\pi p_{11}(\phi) && (\text{para } \phi \leq 70^\circ) \\
\Delta K_I(\phi, a/c = 0.27) &= \Delta\sigma\sqrt{6.6\times 10^{-3}}\pi p_{12}(\phi) && (\text{para } \phi \leq 65^\circ) \\
\Delta K_I(\phi, a/c = 0.34) &= \Delta\sigma\sqrt{6.9\times 10^{-3}}\pi p_{13}(\phi) && (\text{para } \phi \leq 70^\circ) \\
\Delta K_I(\phi, a/c = 0.39) &= \Delta\sigma\sqrt{6.9\times 10^{-3}}\pi p_{14}(\phi) && (\text{para } \phi \leq 75^\circ) \\
\Delta K_I(\phi, a/c = 0.41) &= \Delta\sigma\sqrt{7.0\times 10^{-3}}\pi p_{15}(\phi) && (\text{para } \phi \leq 75^\circ) \\
\Delta K_I(\phi, a/c = 0.40) &= \Delta\sigma\sqrt{7.0\times 10^{-3}}\pi p_{16}(\phi) && (\text{para } \phi \leq 75^\circ) \\
\Delta K_I(\phi, a/c = 0.41) &= \Delta\sigma\sqrt{7.5\times 10^{-3}}\pi p_{17}(\phi) && (\text{para } \phi \leq 70^\circ)
\end{aligned} \tag{7. 10}$$

Na Figura 7.9 são apresentados os valores de F extrapolados, conforme explicado anteriormente. Nas expressões (7. 9) são usados polinômios de grau 2 ou 3 para ajustar os dados de F no trecho confiável, estes polinômios de ajuste são extrapolados até a superfície inferior da placa ($\phi = 0$), evitando as oscilações numéricas obtidas nas análises do FRANC3D na interseção da trinca com a superfície inferior da placa ($\phi = 0$).

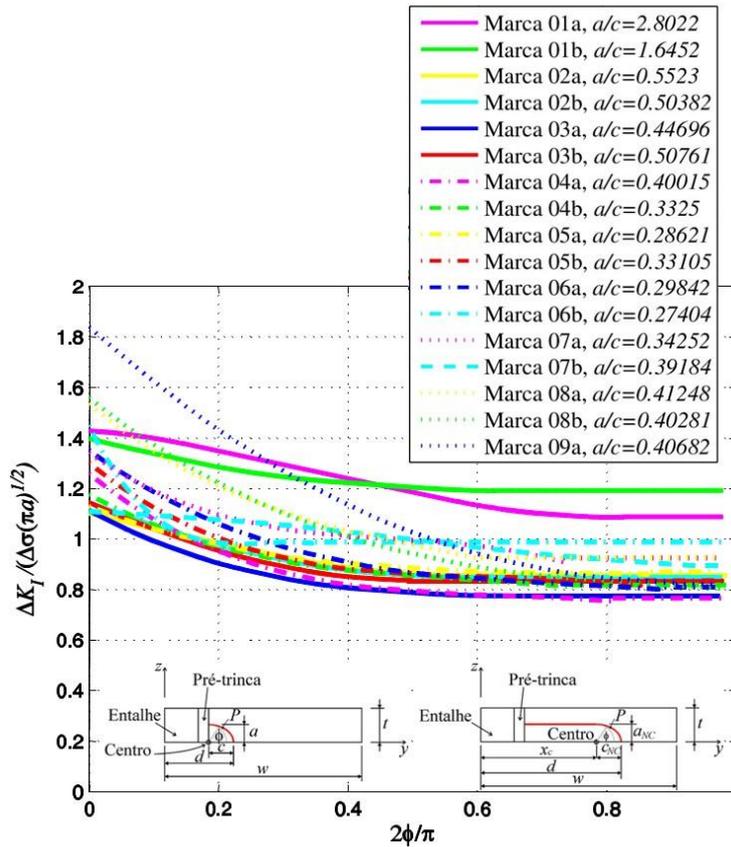


Figura 7.9 – Extrapolações do FIT normalizado no CP07, usando metodologia de extrapolação do FIT.

7.4. Funções de geometria para o CP com um entalhe de borda

Nas Seções 7.1, 7.2 e 7.3 foram feitas avaliações numéricas do fator de intensidade de tensão com as geometrias da frente da trinca obtidas nos corpos-de-prova ensaiados. Nesta seção, a partir das avaliações de F , são propostas expressões simplificadas de $\Delta K_{I,c}$, $\Delta K_{I,a}$ e ΔK_I . Note que ΔK_I é determinado no CP01, pois tanto o CP07 como o CP06 foram submetidos a blocos de carregamentos que ocasionaram sobrecargas e subcargas. Essas sobrecargas e subcargas podem gerar retardos em diferentes proporções na frente da trinca, podendo alterar diferentemente o incremento de trinca na profundidade a e no comprimento d da trinca.

Adicionalmente, na Figura 2.7 foram ilustrados os pontos C e A onde se localizam, respectivamente, $\Delta K_{I,c}$ e $\Delta K_{I,a}$. Essa figura é novamente ilustrada na Figura 7.10, pois esses pontos são empregados nas seções a seguir.

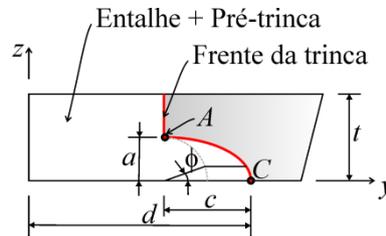


Figura 7.10 – Parâmetros usados na determinação do FIT na geometria de trinca de canto.

7.4.1.

Solução de $\Delta K_{I,c}$

A expressão de $\Delta K_{I,c}$ é feita utilizando os valores de F em C ($\phi = 0$). Esses valores são determinados extrapolações dos polinômios em relação ao ângulo ϕ previamente mostrados na Seção 7.1, 7.2 e 7.3. Na Figura 7.11 são mostrados os valores F obtidos em cada corpo-de-prova ao longo da razão d/w . O ajuste de F é indicado na legenda como Aproximação.

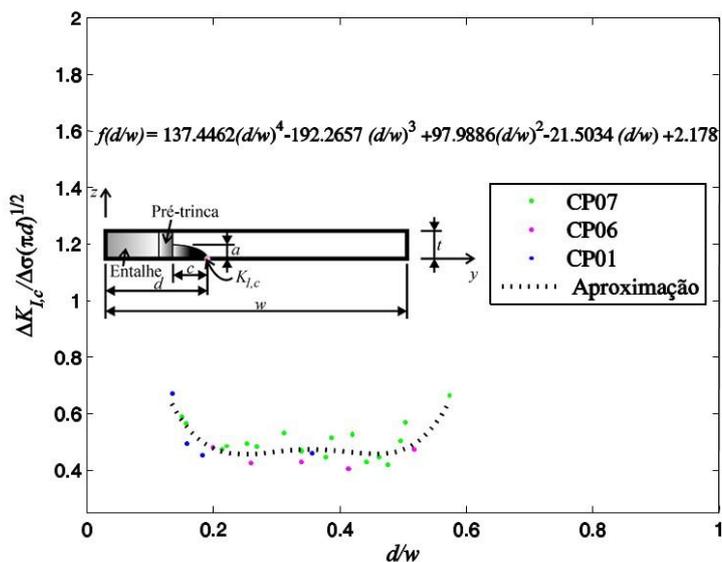


Figura 7.11 – Pontos discretos de F em C e polinômio da função de geometria utilizada em $\Delta K_{I,c}$.

Em relação ao comportamento do fator de geometria, como se pode observar na Figura 7.11, F decresce para relação d/w entre 0.10 e 0.20, que pode ser explicado pela mudança da geometria da trinca, que inicia passante e se estabiliza como uma trinca de superfície. Após estabilização da geometria da trinca, F permanece praticamente constante no intervalo d/w entre 0.20 e 0.40, depois F cresce à medida que a razão d/w aumenta.

Finalmente, a solução na superfície inferior da placa pode ser ajustada a uma forma polinomial $f(d/w)$, descrevendo $\Delta K_{I,c}(d/w)$ como

$$\Delta K_{I,c}(d,w) = \Delta\sigma\sqrt{\pi d}f(d/w) \quad (7.11)$$

onde

$$f(d/w) = 137.45\left(\frac{d}{w}\right)^4 - 192.27\left(\frac{d}{w}\right)^3 + 97.99\left(\frac{d}{w}\right)^2 - 21.50\left(\frac{d}{w}\right) + 2.18 \quad (7.12).$$

7.4.2.

Solução de $\Delta K_{I,a}$

A expressão de $\Delta K_{I,a}$ em A ($\phi = \pi/2$) é ajustada nesta seção, a partir das funções de geometria obtidas na Seção 7.1, 7.2 e 7.3. Os valores normalizados do FIT em A ($\Delta K_{I,a}/\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$) são apresentados na Figura 7.12. Nesta figura é ilustrada a função de geometria $f(a/t)$ indicada na legenda como Aproximação, que ajusta esses valores em A .

Para a razão a/t menor que 0.40, não foi possível determinar o trecho confiável da distribuição do FIT, pois os pontos A e C estão próximos. Por essa razão, os valores de $\Delta K_{I,a}$ foram descartados para razões a/t inferiores a 0.40.

Com base na Figura 7.12, F , onde $F = \Delta K_{I,a}/\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$, é praticamente constante (em torno de 0.8) com pequeno decréscimo à medida que a profundidade da trinca aumenta.

A solução de $\Delta K_{I,a}$ é apresentada em forma de um ajuste polinomial como

$$\Delta K_{I,a} = \Delta\sigma\sqrt{\pi a}(-0.100(a/t)+0.878) \quad \text{para } a/t > 0.4, \quad (7.13)$$

usando os resultados de extrapolação do FIT. Mais explicitamente, a função de geometria $f(a/t)$ é

$$f(a/t) = -0.100(a/t) + 0.878. \quad (7.14)$$

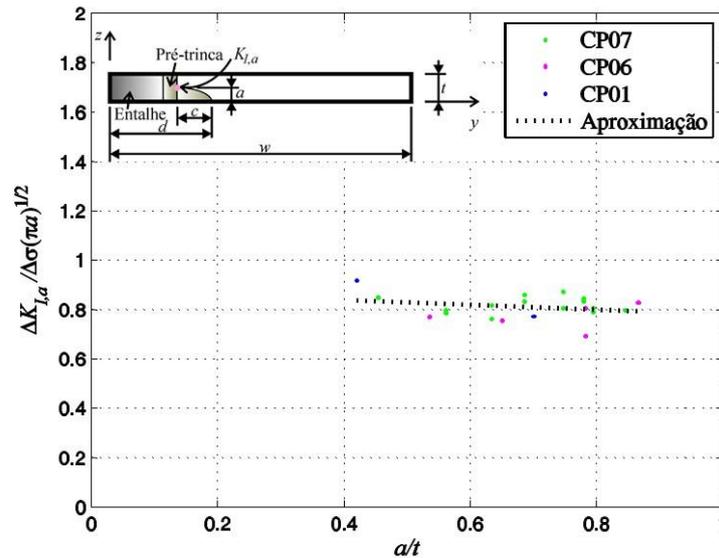


Figura 7.12 – Pontos discretos de F em A e polinômio da função de geometria utilizada em $\Delta K_{I,a}$.

7.4.3. Solução de ΔK_I no CP01

Finalmente, a partir dos resultados de FIT obtidos nos corpos-de-prova ensaiados, determina-se uma expressão geral para ΔK_I em trincas inicialmente passantes que se propagam com fechamento parcial induzido por carregamento de fadiga de flexão pura com base no CP01.

Entretanto, é complicado estimar precisamente a geometria da trinca durante seu crescimento. Para isso, foram escolhidas marcas adicionais para se determinar uma única expressão de ΔK_I em relação à ϕ no CP01, usando diversas razões a/c . O uso de marcas adicionais deve-se à diferença elevada de comprimento Δd de trinca na superfície inferior da placa entre marca 02 e 03 no CP01 (ver Figura 7.13).

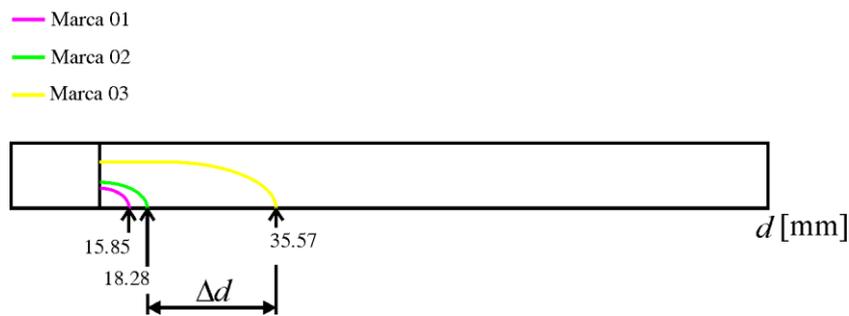


Figura 7.13 – Marcas das frentes da trinca obtidas no corpo-de-prova CP01, ilustrando a distância entre marca 02 e 03.

Desta forma, marcas adicionais são extraídas dos corpos-de-prova ensaiados, que não sofreram retardos ou acelerações que modificaram consideravelmente a geometria da trinca de canto. Visto que no CP07 e CP06 foram aplicados blocos de carregamento de $\Delta\sigma$, que podem modificar essa geometria. Por esta razão, não foram usadas geometrias das marcas no CP06 e geometrias do CP07 obtidas por blocos com decréscimo $\Delta\sigma$, que não ocasionaram crescimento na profundidade da trinca (estes blocos geraram as marcas 01b, 02b, 03b, 04b, 05b, 06b, 07b e 08b).

A expressão geral do FIT na frente da trinca é proposta entre a marca 01 e a marca 03 no CP01, usando as marcas intermediárias marca 02a, marca 03a e marca 04a do CP07. O esquema da geometria da trinca durante seu crescimento é ilustrado na Figura 7.14. Nesta figura, indica-se o comprimento d da trinca em milímetros. Futuramente, devem-se executar mais ensaios para que se determine com mais precisão a geometria da trinca e distribuição do FIT.

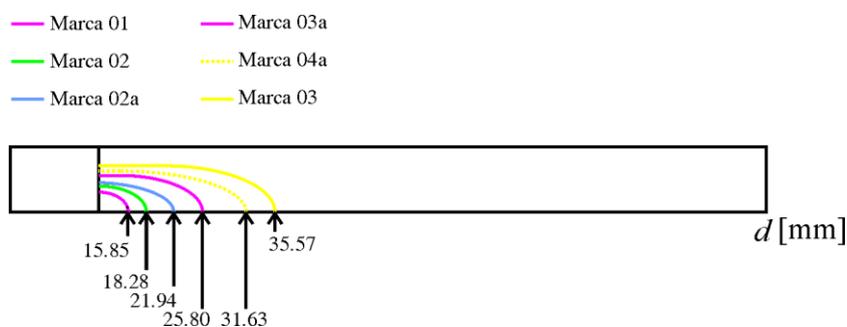


Figura 7.14 – Marcas obtidas nos corpos-de-prova CP01 e CP07, com distribuições ΔK_I determinadas no FRANC3D aproximadas por uma solução geral de interpolação destas marcas.

Novamente, são usados os resultados de distribuições do FIT com o método de correlação dos deslocamentos obtidos nas Seções 7.1, 7.2 e 7.3, que foram tratados com extrapolação do FIT, conforme descrito na Seção 5.3.3. A solução geral para interpolar as distribuições de FIT nas geometrias indicadas, que é ajustada com o método dos mínimos quadrados, é

$$\Delta K_I(\phi, a/t, a/c) = \Delta\sigma \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} g(\phi, a/t, a/c) f_w(c/w, a/t) \quad (7.15)$$

para a/c e a/t indicados na Tabela 7.4, onde

$$f_w(c/w, a/t) = \left[\sec\left(\frac{\pi c}{2w} \sqrt{\frac{a}{t}}\right) \right]^{1/2}, \quad (7.16)$$

$$\begin{aligned} Q &= 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65} && \text{para } \frac{a}{c} \leq 1 \\ Q &= 1 + 1.464 \left(\frac{c}{a}\right)^{1.65} && \text{para } \frac{a}{c} > 1 \end{aligned}, \quad (7.17)$$

$$\begin{aligned} g(\phi, a/t, a/c) &= M_{11} \left(\frac{a}{c}\right) \left(\frac{a}{t}\right) + M_{02} \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_{01} \left(\frac{a}{t}\right) + \\ &+ M_{00} + M_{10} \left(\frac{a}{c}\right) + M_{20} \left(\frac{a}{c}\right)^2 \end{aligned}, \quad (7.18)$$

$$\begin{aligned} M_{11} &= 2.327 \times 10^{-7} \phi^5 - 5.9087 \times 10^{-5} \phi^4 + 5.5001 \times 10^{-3} \phi^3 - 0.25899 \phi^2 + \\ &+ 9.1077 \phi - 222.66 \\ M_{02} &= 2.7195 \times 10^{-8} \phi^5 - 8.0089 \times 10^{-6} \phi^4 + 9.2466 \times 10^{-4} \phi^3 - 0.060526 \phi^2 + \\ &+ 2.7833 \phi - 66.241 \\ M_{01} &= -1.3624 \times 10^{-7} \phi^5 + 3.5848 \times 10^{-5} \phi^4 - 3.5428 \times 10^{-3} \phi^3 + 0.187 \phi^2 + \\ &- 7.3993 \phi + 179.45 \\ M_{00} &= 1.2842 \times 10^{-7} \phi^5 - 3.2062 \times 10^{-5} \phi^4 + 2.9122 \times 10^{-3} \phi^3 - 0.13321 \phi^2 + \\ &+ 4.7081 \phi - 116.04 \\ M_{10} &= -3.9308 \times 10^{-7} \phi^5 + 9.6161 \times 10^{-5} \phi^4 + 8.4192 \times 10^{-3} \phi^3 - 0.35539 \phi^2 + \\ &- 11.433 \phi + 285.29 \\ M_{20} &= 2.8482 \times 10^{-7} \phi^5 - 6.8655 \times 10^{-5} \phi^4 + 5.8497 \times 10^{-3} \phi^3 - 0.23196 \phi^2 + \\ &+ 6.8897 \phi - 170.99 \end{aligned} \quad (7.19)$$

Essa expressão de ΔK_I é obtida conforme expressão para trinca de superfície proposta em Newman e Raju (1981), onde f_w é o fator de correção para placas com largura finita e g é uma função obtida por julgamento de engenharia, ajustando dados que dependem de $\phi, a/t, a/c$. Portanto, na expressão (7. 15), $g f_w / \sqrt{Q}$ originam a função de geometria para esta solução de FIT.

Complementarmente, em trincas longas, que são simplificadas por curvas quarto-elípticas não-concêntricas (ver Figura 5.9 (b)), deve-se utilizar $\phi = 90^\circ$ na expressão (7. 15) no trecho com profundidade constante simplificada assumido paralelo às superfícies da placa, pois o FIT é constante neste trecho e igual à magnitude alcançada no semi-eixo a ($\phi = 90^\circ$) da curva-elíptica não concêntrica.

Tabela 7.4 – Fatores de geometria utilizados na solução geral do FIT, onde c é o semi-eixo da elipse.

| | a/c | a/t | a [mm] | c [mm] |
|---------|-------|-------|-------------|-------------|
| Marca01 | 0.66 | 0.30 | 2.68 | 3.96 |
| Marca02 | 0.55 | 0.42 | 3.49 | 6.39 |
| Marca2a | 0.55 | 0.45 | 3.96 | 7.17 |
| Marca3a | 0.45 | 0.56 | 4.93 | 11.03 |
| Marca4a | 0.40 | 0.63 | 5.54 | 13.37 |
| Marca03 | 0.42 | 0.70 | 6.20 | 14.73 |

7.5. Estimativa da vida à fadiga no CP01

Na seção anterior foram feitas estimativas de FIT. Para se conhecer a eficiência destas estimativas, deve-se prever a vida e comparar com os dados medidos durante o ensaio do corpo-de-prova analisado, CP01.

Convencionalmente, essa previsão de vida é feita com as estimativas de FIT e curva $da/dN - \Delta K$ de um corpo-de-prova padrão sob tração usinado com o mesmo material, que traz informações das propriedades à fadiga do material. Note que sob tração, a trinca cresce com geometria passante. Por outro lado, sob flexão pura, a trinca, independente da sua geometria inicial, torna-se uma trinca de canto.

A dificuldade desta previsão é que em diversos trabalhos (ver Capítulo 1) foram obtidas as taxas de crescimento da trinca passante superiores às taxas de crescimento da trinca de canto. Por esta razão, nesta seção é apresentada esta previsão de vida, calculando o FIT com as expressões da Seção 7.4, extraindo os dados de carregamento e geometria do CP01. Além disso, são discutidas as taxas de crescimento obtidas em cada geometria da frente da trinca (trinca passante e trinca de superfície). Finalmente, utiliza-se o fator de intensidade de tensão efetivo para melhorar a previsão de vida.

7.5.1. Valores aceitáveis

Em Newman & Raju (1981; 1982) foram sugeridas expressões de fator de intensidade de tensão para trincas de superfície. Para obter essas expressões, foram efetuadas investigações comparando tensões experimentais e tensões calculadas numericamente. Foi observado que existe uma faixa de valores aceitáveis entre essas duas tensões. No caso de tensões calculadas usando o método dos elementos finitos, essa faixa de valores aceitáveis é +/- 10%.

7.5.2. Curvas $da/dN - \Delta K$

Neste trabalho foram efetuadas duas amostras de corpos-de-prova sob tração para determinar a curva $da/dN - \Delta K$ do material ASTM A36, os ajustes desta curva estão no Apêndice 2. Nesta seção, são usados os ajustes da segunda amostra de corpos-de-prova. Entretanto, por causa da dispersão dos dados medidos nestes ensaios, foram feitos três ajustes $da/dN - \Delta K$. Um ajuste considera a média dos dados obtidos, que é chamado de ajuste por pontos médios, e outro ajuste considera uma distribuição de Gauss dos pontos medidos e confiabilidade de 97.72% para obter os pontos inferiores e ajustar a curva $da/dN - \Delta K$.

Assim, o modelo de $da/dN - \Delta K$ de ajuste dos pontos médios é

$$\frac{da}{dN} = 9.702 \times 10^{-13} \Delta K^{2.975} \left[\frac{\Delta K - \Delta K_{th} (1 + 0.42R)}{(1 - R)} \right]^{0.683} \quad (7.20)$$

onde $\Delta K_{th} = 8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ e $R = 0.1$. Os dados $da/dN - \Delta K$ são obtidos em m/ciclos. O ajuste de $da/dN - \Delta K$ nos pontos inferiores é

$$\frac{da}{dN} = 2.687 \times 10^{-13} \Delta K^{3.49} \left(\frac{\Delta K - (1 - 76.915R)}{(1 - R)} \right)^{0.292} \quad (7.21)$$

onde $R = 0.1$. Adicionalmente, para os pontos médios, foi feito ajuste dos dados com a equação de Paris. Esse ajuste foi obtido por

$$\frac{da}{dN} = 3.029 \times 10^{-13} \Delta K^{3.955}. \quad (7.22)$$

7.5.3.

ΔK na superfície inferior da placa e na profundidade da trinca

Para se prever a vida a fadiga, deve-se estimar precisamente o fator de intensidade de tensão. Nesta seção são apresentadas as magnitudes de fator de intensidade de tensão, $\Delta K_{I,c}$, usando a expressão (7. 11) e o fator de intensidade de tensão, $\Delta K_{I,a}$, utilizando a expressão (7. 13). Essas magnitudes são determinadas com as tensões do carregamento aplicado remotamente no CP01 e dimensões deste corpo-de-prova.

Na Figura 7.15 e na Figura 7.16 são ilustradas $\Delta K_{I,c}$ e $\Delta K_{I,a}$, respectivamente. As legendas nessas figuras indicam o carregamento $\Delta\sigma$ aplicado remotamente.

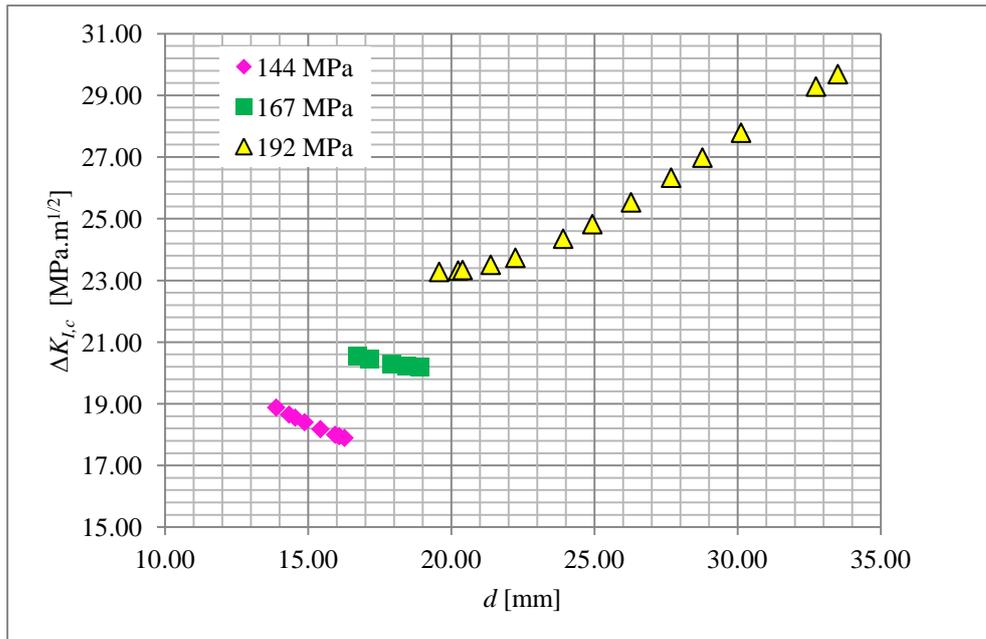


Figura 7.15 – Fator de intensidade de tensão em C no CP01.

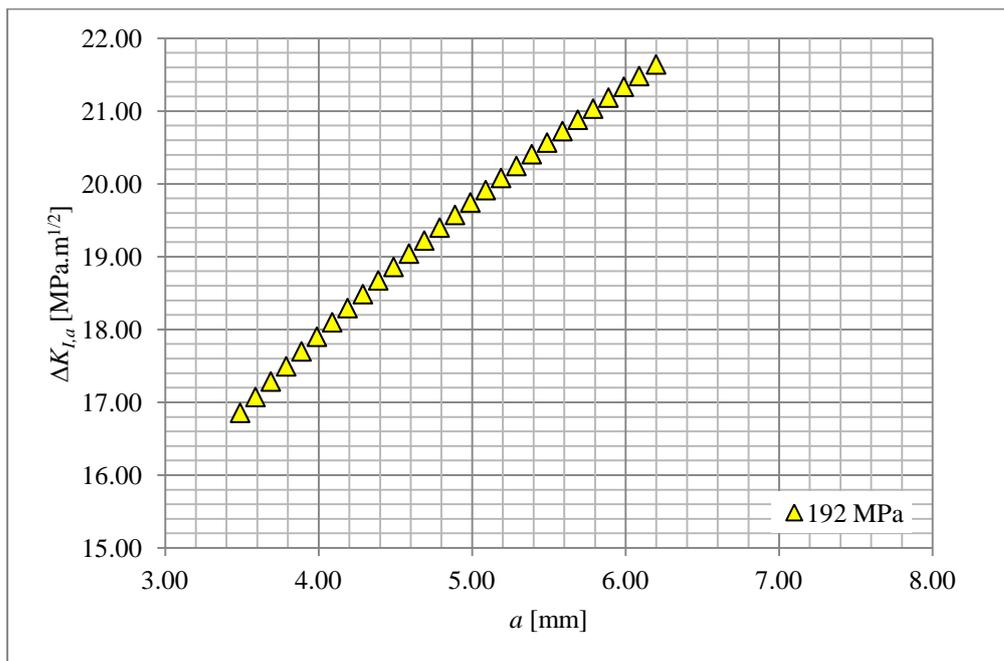


Figura 7.16 – Fator de intensidade de tensão em A no CP01.

7.5.4. Comparação das taxas de propagação

Nesta seção são comparadas as taxas de propagação obtidas no ensaio de tração e ensaio de flexão pura do CP01. A motivação em desenvolver esta seção é avaliar as taxas de crescimento em toda a frente da trinca usando as estimativas de FIT feitas na Seção 7.4. Os incrementos da trinca são determinados com a distância Δa entre as marcas na Figura 7.14. Já os incrementos de ciclos ΔN medidos são calculados durante ensaio dos corpos-de-prova na superfície inferior da placa. Assim, é possível estimar as taxas de crescimento em toda a frente da trinca.

Nesta seção determinam-se primeiro as taxas de crescimento em C e em A (ver Figura 2.7). Depois, avaliam-se as taxas de crescimento em três trajetórias ao longo da trinca de canto.

Durante todo o ensaio, os dados d vs. N foram coletados apenas na superfície inferior da placa. Esses dados foram medidos constantemente no ensaio. Todavia, o FIT é na interseção da trinca com a superfície inferior é estimado por extrapolação de um polinômio de ajuste, ocasionando incertezas no FIT.

Além disso, o crescimento da trinca de canto é complexo, porque envolve uma trajetória em um plano. Por exemplo, em uma posição inicialmente próxima a superfície inferior da placa, poderia alcançar uma localização no trecho curvo da trinca de canto, ao final da sua trajetória (por exemplo, ver a trajetória 3 na Figura 7.17). Entretanto, nas estimativas de taxa de crescimento na superfície inferior da placa é adotado que a trinca tem uma trajetória que se mantém na superfície inferior da placa. Essas duas trajetórias são ilustradas na Figura 7.17.

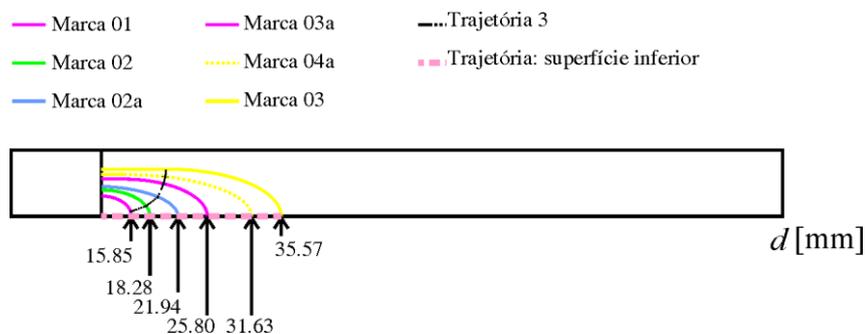


Figura 7.17 – Trajetórias da trinca adotada na superfície inferior da placa e trajetória 3.

Para se obter as taxas de propagação do ensaio de flexão pura, foram utilizados os dados de d vs. N coletados durante o ensaio deste corpo-de-prova. Esses dados são ilustrados na Figura 7.18 e são ajustados por

$$d = 8 \times 10^{-27} N^4 - 10^{-20} N^3 + 3 \times 10^{-15} N^2 + 4 \times 10^{-9} N + 1.38 \times 10^{-2}, \quad (7.23)$$

onde d é o comprimento da trinca na superfície inferior da placa e N é o número de ciclos acumulado.

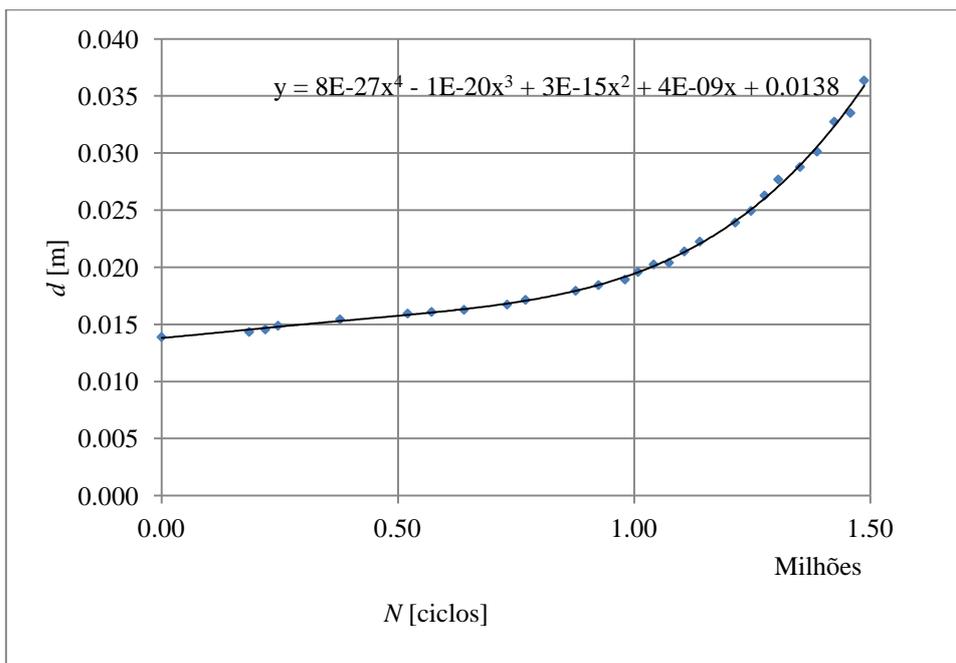


Figura 7.18 – Ajuste polinomial dos dados d vs. N coletados durante ensaio no CP01.

Os dados $da/dN - \Delta K$ na superfície inferior da placa são determinados com o fator de intensidade de tensão na expressão (7. 11) e com taxas de propagação da/dN com a expressão (7. 23). O único dado $da/dN - \Delta K$ na profundidade da trinca é obtido com a diferença Δa entre a marca 03 e 02 do CP01, ΔN foi obtido nestas marcas na superfície inferior da placa. Adicionalmente, o FIT em A é calculado com a expressão (7. 13).

Esses dados são comparados com os ajustes das taxas de propagação apresentadas na Seção 7.5.2 e são mostrados na Figura 7.19. A legenda Hall 4 parametros, C(t) Paris e Hall 4P inferior referem-se às expressões (7. 20), (7. 22) e (7. 21), respectivamente.

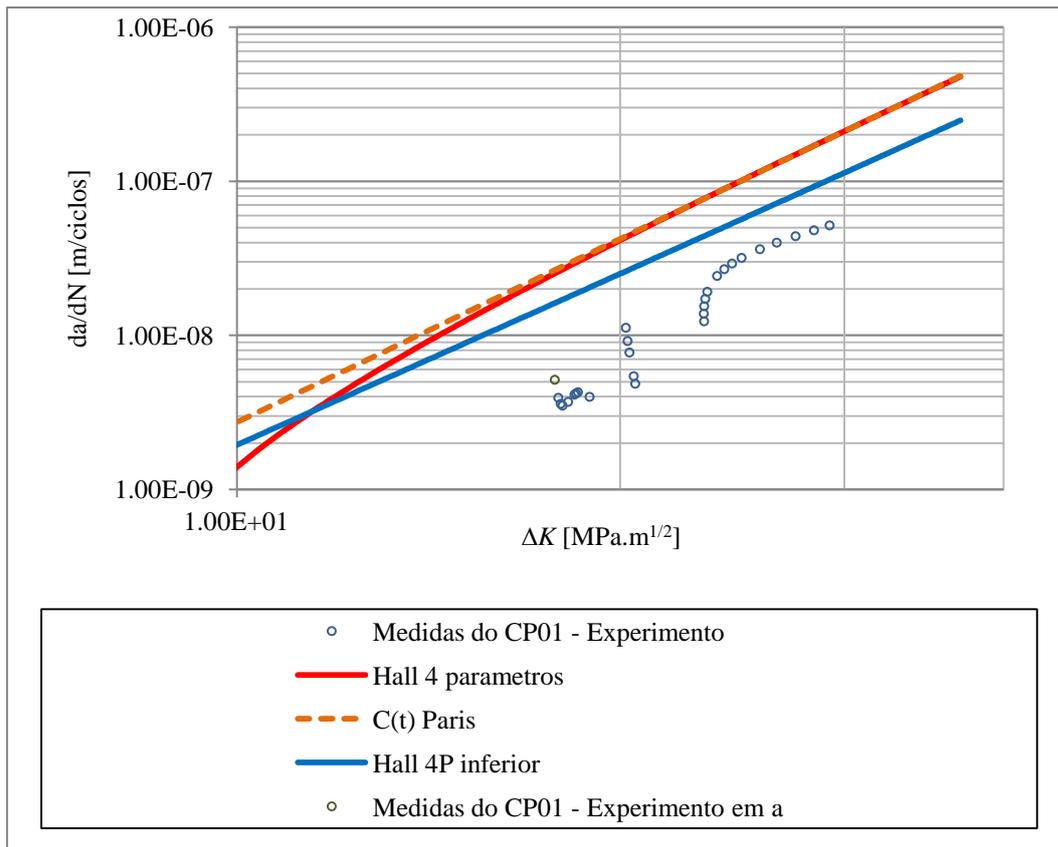


Figura 7.19 – Comparação das taxas de propagação no corpo-de-prova padrão sob tração (trinca passante) e taxas de propagação no CP01 (trinca de superfície), localizadas em A e em C.

Complementarmente, são definidas três trajetórias de trinca usando as geometrias simplificadas introduzidas no Capítulo 4. Essas geometrias foram previamente mostradas na Figura 7.14. Na Figura 7.20, elas são novamente ilustradas com as três trajetórias. Note que cada trajetória inicia na marca 01 com ângulo ϕ escolhido aleatoriamente. A partir desta marca, a direção de crescimento é normal a marca i com o incremento de trinca Δa determinado como o comprimento do vetor nesta direção de crescimento partindo da marca i até a marca subsequente. Por esta razão, o ângulo ϕ muda e ele é determinado a partir do centro X do CP01 ($X = 11.89$ mm), usando as simplificações de geometria mostradas no Capítulo 4. Na Tabela 7.5 estão disponíveis esses ângulos, que são utilizados para determinar ΔK_i na expressão (7. 15).

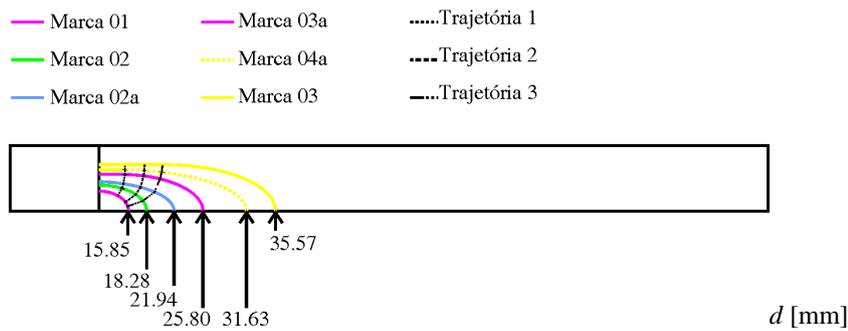


Figura 7.20 – Trajetórias de crescimento da trinca partindo da marca 01, usando direção de crescimento normal a marca atual.

Tabela 7.5 – Ângulo ϕ [em graus] determinado nas trajetórias usadas para determinar as taxas de crescimento na trinca de superfície.

| | Marcas | Trajatória 01 | Trajatória 02 | Trajatória 03 |
|------------|-----------|---------------|---------------|---------------|
| ϕ [°] | Marca 01 | 50 | 26 | 14 |
| | Marca 02 | 61 | 39 | 23 |
| | Marca 02a | 68 | 54 | 40 |
| | Marca 03a | 87 | 76 | 61 |
| | Marca 04a | 88 | 79 | 71 |

Desta forma, relaciona-se o número de ciclos acumulados N medidos na superfície inferior da placa com as marcas, obtendo-se o ΔN . Entretanto, nas marcas do CP07, devem-se remover os ciclos adicionais oriundos de retardos ocasionados pelos blocos de subcargas (decréscimo do carregamento $\Delta\sigma$ remotamente aplicado). Isto pode ser realizado com os dados de comprimento de trinca d na marca 02a, 03a e 04a e expressão (7. 23), para calcular o N nestas marcas usando a curva d vs. N do CP01.

Os ciclos calculados são indicados na Tabela 7.6. A comparação entre curvas d vs. N do CP01 e CP07 é mostrada na Figura 7.21. Com o N estimado de acordo com a curva d vs. N do CP01, pode-se determinar o ΔN . Adicionalmente, na Tabela 7.6 também se encontra o resumo dos dados para estimar as taxas de propagação nessas trajetórias.

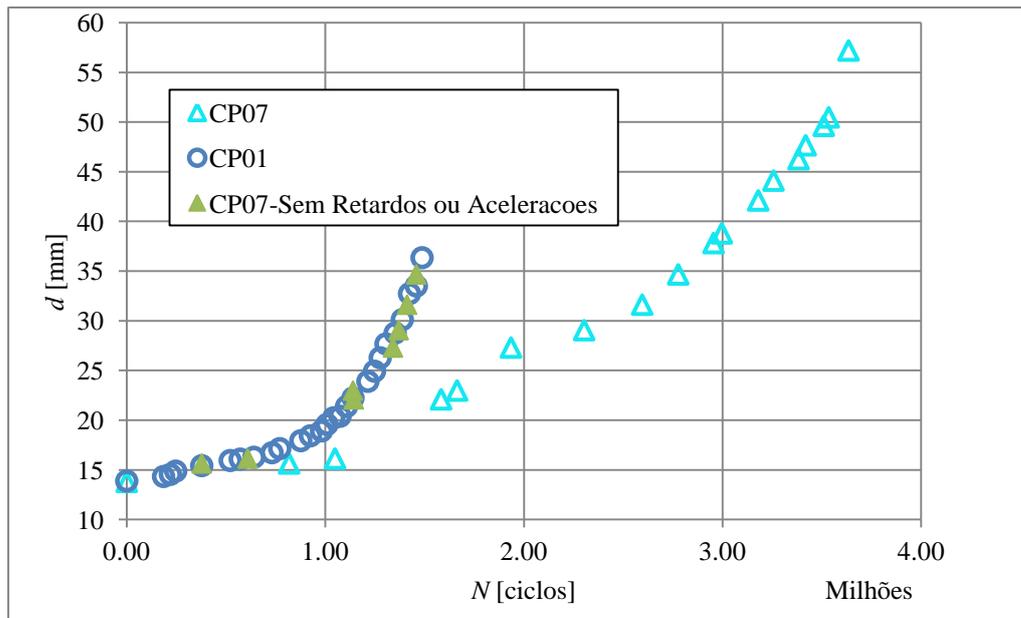


Figura 7.21 – Determinação do número de ciclos acumulados nas marcas do CP07 eliminando retardos ou acelerações.

Tabela 7.6 – Resumo da geometria da trinca nas marcas usadas na expressão de ΔK_I .

| CP | Marcas | x_c [mm] | a [mm] | c [mm] | a/c^* | a/t | d [mm] | N [ciclos] |
|------|-----------|---------------|-------------|-------------|---------|-------|-------------|--------------------|
| CP01 | Marca 01 | - | 2.68 | 3.96 | 1.08 | 0.30 | 15.85 | 0.69×10^6 |
| | Marca 02 | - | 3.49 | 6.39 | 0.77 | 0.42 | 18.28 | 0.98×10^6 |
| | Marca 03 | 20.79 | 6.20 | 14.73 | 0.28 | 0.70 | 35.57 | 1.49×10^6 |
| CP07 | Marca 02a | - | 3.96 | 7.17 | 0.53 | 0.45 | 21.94 | 1.14×10^6 |
| | Marca 03a | - | 4.93 | 11.03 | 0.43 | 0.56 | 25.80 | 1.34×10^6 |
| | Marca 04a | 16.49 | 5.54 | 13.37 | 0.32 | 0.63 | 31.63 | 1.41×10^6 |

De posse de da/dN e ΔK_I , para cada trajetória, na Figura 7.22 comparam-se as taxas de crescimento na trinca de canto com as taxas de crescimento previamente mostradas na Figura 7.19. Com essa comparação, percebe-se a influência do caminho da trinca durante o crescimento. Quando a hipótese de direção normal de crescimento da trinca é feita na trinca de canto, as taxas de crescimento são mais altas do que as taxas de crescimento nas extremidades da trinca de canto (em A e C).

A previsão da vida pode ser influenciada por uma hipótese de trajetória da trinca inconsistente com a trajetória nos corpos-de-prova. Por este motivo, em trabalhos futuros, dever-se-ia executar ensaios em diversos corpos-de-prova sob carregamento de flexão com amplitude constante e interromper esses ensaios em

diferentes comprimentos d . Após o ensaio, o corpo-de-prova seria quebrado em nitrogênio líquido e a geometria da trinca de canto poderia ser mapeada. Com essas geometrias, deveriam ser feitas diversas hipóteses de trajetória da trinca, para se conhecer a melhor hipótese de crescimento em trincas de superfície.

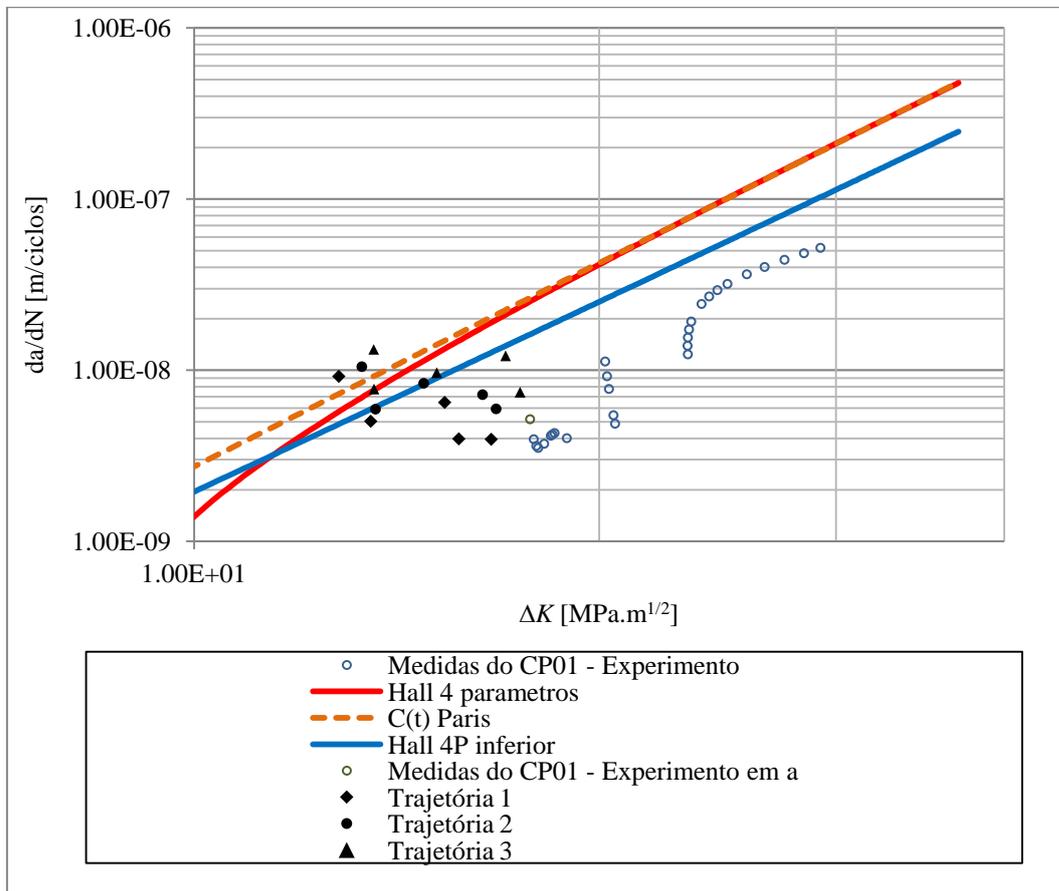


Figura 7.22 – Taxas de propagação ao longo das trajetórias 1, 2 e 3.

7.5.5. Previsão de vida à fadiga

Primeiramente, é feita a estimativa da vida na superfície inferior do CP01 e compara-se com os dados medidos neste corpo-de-prova, esta previsão é ilustrada na Figura 7.23. Os dados de FIT foram previamente calculados na Seção 7.5.3 e as curvas de crescimento da trinca usadas nesta previsão, foram mostradas na Seção 7.5.2.

Os números de ciclos acumulados com a curva de propagação da trinca do CP sob tração e razão entre dados obtidos a partir da simulação numérica e dados experimentais coletados são resumidos na Tabela 7.7.

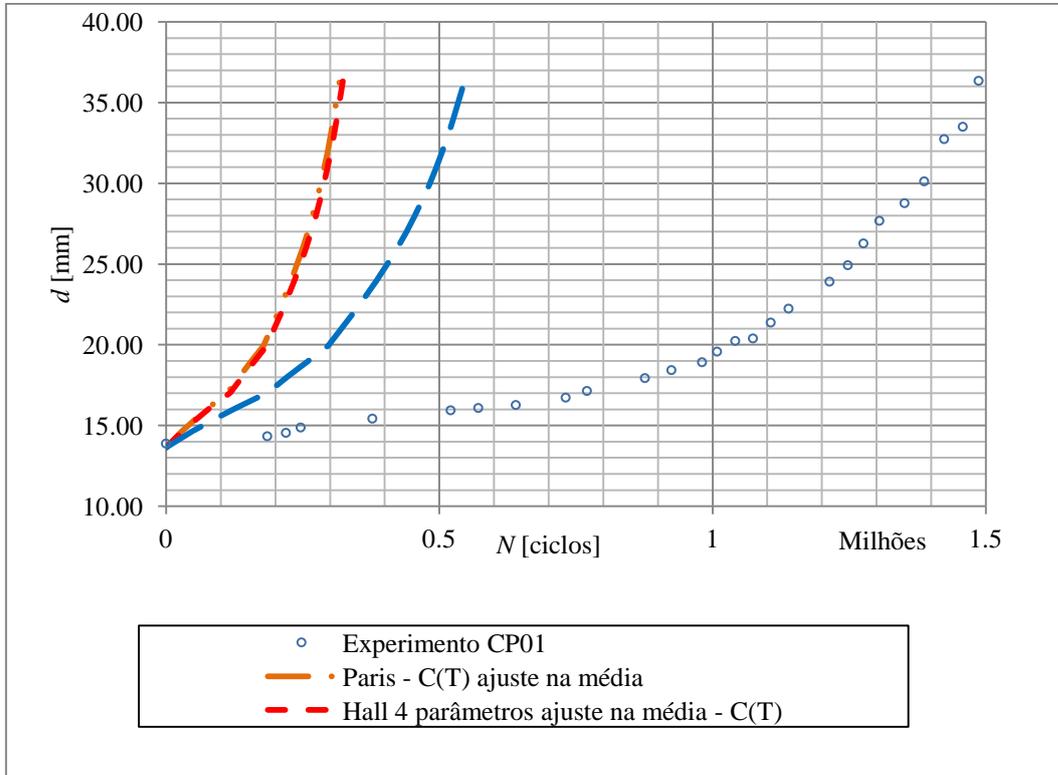


Figura 7.23 – Comparação de d vs. N com previsão numérica da vida usando $\Delta K_{I,c}$ e medidas do ensaio no CP01.

Os resultados apresentados na Figura 7.23 são conservadores, onde a trinca na predição numérica cresce mais rápido que o crescimento medido no CP01. Esta predição alcançou a razão entre número de ciclos da predição N e número de ciclos medidos no experimento N_{exp} semelhante a predição realizada no Capítulo 6, executada com incrementos discretos de trinca. Isto mostra que o FIT nestas duas predições é semelhante.

Na Figura 7.24 são apresentadas as estimativas de vida entre a marca 02 e 03 em A. Complementarmente, as razões entre dados obtidos a partir da simulação numérica e dados experimentais estão disponíveis na Tabela 7.8. Novamente, os resultados são conservadores e na Seção 7.5.6 serão tratados com parâmetros de fechamento por Elber (1970).

Tabela 7.7 – Resumo das estimativas totais do número de ciclos N usando expressão de $\Delta K_{I,c}$ e taxas de propagação de um corpo-de-prova padrão sob tração.

| Início da previsão | Pré-trinca | |
|---|--------------------|---------------|
| | N (ciclos) | N / N_{exp} |
| Dados considerados | | |
| Experimentos CP01 | 1.49×10^6 | 1.00 |
| da/dN- ΔK – corpo-de-prova CT, ajuste de Paris nos pontos médios | 0.32×10^6 | 0.22 |
| da/dN- ΔK – corpo-de-prova CT, ajuste de Hall nos pontos médios | 0.33×10^6 | 0.22 |
| da/dN- ΔK – corpo-de-prova CT, ajuste de Hall nos pontos inferiores | 0.55×10^6 | 0.37 |

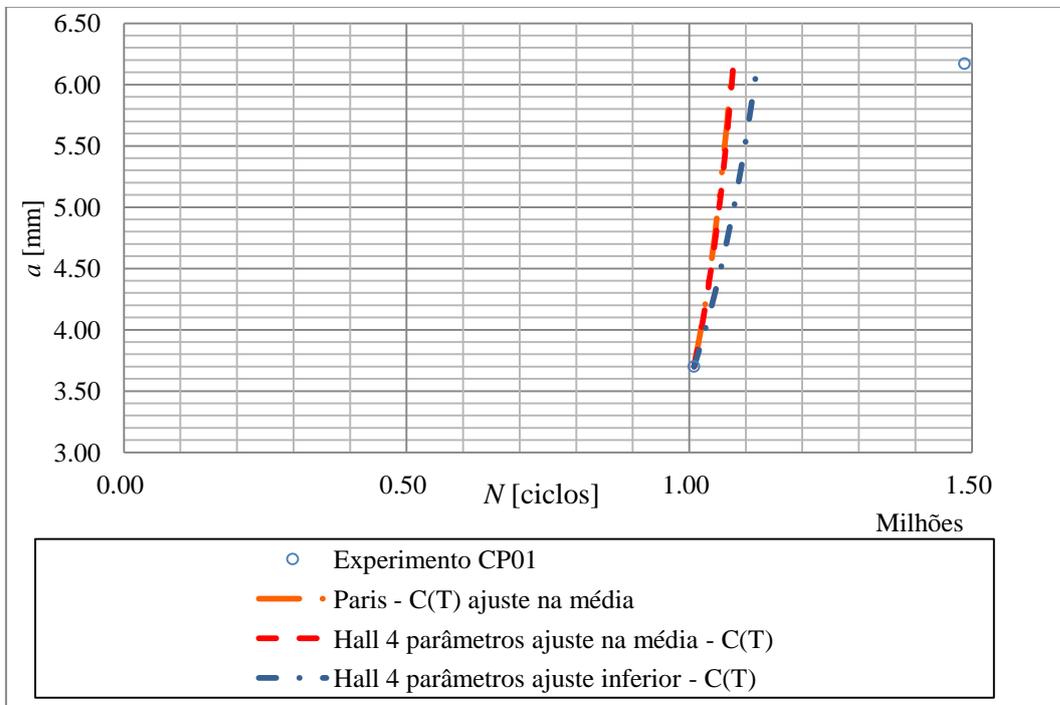


Figura 7.24 – Comparação de a vs. N com previsão numérica da vida usando $\Delta K_{I,a}$ e medidas do ensaio no CP01.

Tabela 7.8 – Resumo das estimativas totais de número de ciclos usando expressão de $\Delta K_{I,a}$ e diversos ajustes das taxas de propagação realizadas em um ensaio de tração.

| Início da previsão | Marca 02 | |
|---|--------------------|---------------|
| | N (ciclos) | N / N_{exp} |
| Dados considerados | | |
| Experimentos CP01 | 0.48×10^6 | 1.00 |
| da/dN- ΔK – corpo-de-prova CT, ajuste de Paris nos pontos médios | 0.07×10^6 | 0.14 |
| da/dN- ΔK – corpo-de-prova CT, ajuste de Hall nos pontos médios | 0.07×10^6 | 0.15 |
| da/dN- ΔK – corpo-de-prova CT, ajuste de Hall nos pontos inferiores | 0.11×10^6 | 0.23 |

As razões entre N/N_{exp} são comparadas com a medida realizada na marca 2 e marca 3, por isso são N_{exp} é igual a 0.48×10^6 . As razões N/N_{exp} são menores em A do que as razões em C. A profundidade da trinca não é acompanhada durante o experimento. Assim, a medida de incremento de trinca não é realizada em pequenos intervalos. Além disso, a estimativa do fator de intensidade de tensão, que é feita por extrapolação de valores, não alcança a profundidade de 90° . A geometria inicial da trinca passante (pré-trinca) do CP01 é ligeiramente inclinada. Isto pode interferir na direção de crescimento na profundidade da trinca, pois $\Delta K_{I,a}$ foi determinado em uma direção normal às superfícies da placa, ou seja, para uma trajetória reta e não ligeiramente inclinada. Neste caso, essa simplificação pode ser inadequada para crescimento em A.

7.5.6.

Correção do fator de intensidade de tensão

Uma análise de propagação de trinca por fadiga requer algumas entradas de dados como, por exemplo, propriedade do material, precisão no fator de intensidade de tensão, tamanho da trinca, curva de taxa de propagação ($da/dN - \Delta K$). A qualidade do resultado final depende da qualidade de cada uma destas entradas de dados.

Assumindo-se que todas essas entradas de dados são satisfatórias, diferenças obtidas na estimativa de vida podem ser explicadas por algum mecanismo que

alterou a magnitude do fator de intensidade de tensão, decorrente de uma frente de trinca não completamente aberta. Assim, muitas vezes são considerados os fatores de intensidade de tensão efetivo. Essa solução será utilizada neste trabalho.

O conceito de fechamento da trinca utiliza ΔK_{eff} que é obtido experimentalmente para diversas razões de tensão R . Entretanto, neste trabalho, a $da/dN - \Delta K$ foi obtida apenas para $R = 0.1$. Por este motivo, utiliza-se uma razão $U (R = 0.1)$ encontrada em Schijve (1988) para corpos-de-prova com trinca passante sob tração. Esta razão U foi apresentada no Capítulo 3 para o aço médio e aplicando as expressões (3.12) e (3.13) com $R = 0.1$, resulta, respectivamente, em $U = 0.74$ e 0.71 . Nesta correção de FIT é adotado o valor $U = 0.74$ para relacionar $\Delta K_{eff} / \Delta K_I$, onde ΔK_I é o FIT determinado no corpo-de-prova sob tração (trinca passante). Assim, a taxa de propagação ajustada com a Lei de Paris no corpo-de-prova padrão (ver Apêndice 2) é

$$\frac{da}{dN} = 3.029 \times 10^{-13} \Delta K^{3.955}. \quad (7.24)$$

Usando $\Delta K_{eff} = U \Delta K$, com $U = 0.74$, obtém o ajuste da Lei de Paris como

$$\frac{da}{dN} = 10 \times 10^{-13} \Delta K_{eff}^{3.954}. \quad (7.25)$$

Esses ajustes são apresentados na Figura 7.25.

Por outro lado, existe uma razão U que relaciona ΔK_{eff} e $\Delta K_{I,sup}$ ($U = \Delta K_{eff} / \Delta K_{I,sup}$). Esta razão U , entretanto, pode não depender apenas de R e ter magnitudes diferentes ao longo da frente da trinca de canto. Para se distinguir U em uma trinca passante (corpo-de-prova sob tração) e o U em um trinca de canto (corpo-de-prova sob flexão), adota-se a nomenclatura U para trinca passante e U_{sup} para relacionar ΔK_{eff} e $\Delta K_{I,sup}$, onde $\Delta K_{I,sup}$ são $\Delta K_{I,c}$ e $\Delta K_{I,a}$.

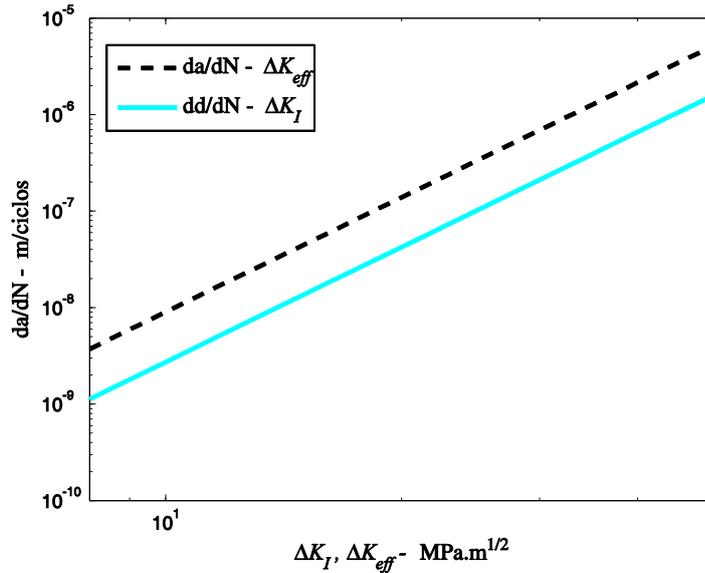


Figura 7.25 – Taxas de crescimento do aço ASTM A36 ajustadas com lei de Paris $da/dN - \Delta K_I$ e $da/dN - \Delta K_{eff}$.

O procedimento de cálculo do fator de correção exibido na Tabela 7.9 é: (i) extraí taxas de crescimento da/dN do ensaio de flexão no CP01; (ii) estimativa de ΔK_I utilizando taxas de crescimento obtidas em (i) e o ajuste das taxas de crescimento $da/dN - \Delta K$ de um ensaio de tração (expressão (7. 24)); (iii) determina ΔK_{eff} com $\Delta K_{eff} = U \Delta K_I$, onde $U = 0.74$; (iv) calcula $\Delta K_{I,c}$ a partir da expressão (7. 11) com d_i do ensaio de flexão; e (v) obtém U_{sup} empregando $\Delta K_{eff} - \Delta K_{eff,num} = 0$, onde $\Delta K_{eff,num} = U_{sup} \Delta K_{I,c}$. Complementarmente, o fator de intensidade de tensão de abertura K_{op} é a diferença entre K_{max} e ΔK_{eff} .

O mesmo procedimento de cálculo é aplicado em A na frente da trinca de canto, determinando $\Delta K_{I,a}$ com a expressão (7. 13). Os dados obtidos estão na Tabela 7.10.

Na Figura 7.26 são exibidas as distribuições discretas do K_{op} em relação à K_{max} . Note que $K_{max} = \Delta K / (1 - R)$. Na Figura 7.27 relacionam-se os valores de U_{sup} e $\Delta K_{I,sup}$, conforme apresentados na Tabela 7.9 e Tabela 7.10.

O ajuste do coeficiente U_{sup} na Figura 7.27 é realizado com a expressão

$$U_{sup} = 6.8722 \times 10^{-3} \Delta K_{I,sup}^{1.0497} + 0.3444, \quad (7. 26)$$

onde $\Delta K_{I,sup}$ são $\Delta K_{I,c}$ e $\Delta K_{I,a}$.

Em trabalhos futuros, devem-se estudar a influencia de diferentes razões R , diversas espessuras t de placa e comprimento de entalhe na estimativa U_{sup} para se generalizar a sua aplicação.

Tabela 7.9 – Dados usados para determinar U_{sup} na interseção de trinca com a superfície inferior.

| da/dN | Trinca passante C(T) - $U = 0.74$ | | Trinca de superfície | | | |
|----------------------|--------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------|-----------|-------------------|
| | ΔK_I [MPa] | ΔK_{eff} [MPa] | $\Delta K_{I,c}$ [MPa] | d [mm] | U_{sup} | K_{op} [MPa] |
| 4×10^{-9} | 11.01 | 8.15 | 17.80 | 16.64 | 0.53 | 11.36 |
| 1×10^{-8} | 13.90 | 10.29 | 20.25 | 19.44 | 0.51 | 12.03 |
| 2×10^{-8} | 16.55 | 12.25 | 23.33 | 20.25 | 0.50 | 13.34 |
| 3×10^{-8} | 18.00 | 13.32 | 24.24 | 23.63 | 0.50 | 13.33 |
| 3.5×10^{-8} | 19.06 | 14.10 | 24.93 | 25.14 | 0.50 | 13.44 |
| 4×10^{-8} | 19.71 | 14.59 | 25.87 | 26.89 | 0.50 | 13.94 |
| 4.6×10^{-8} | 20.42 | 15.11 | 27.05 | 28.89 | 0.50 | 14.58 |
| 5×10^{-8} | 20.86 | 15.44 | 28.41 | 31.17 | 0.50 | 15.94 |
| 5.8×10^{-8} | 21.66 | 16.03 | 29.82 | 33.77 | 0.50 | 16.73 |

Tabela 7.10 – Dados usados para determinar U_{sup} em A.

| da/dN | Trinca passante C(T) $U = 0.74$ | | Trinca de superfície | | | | |
|-----------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------|-----------|-------------------|-------------|
| | ΔK_I [MPa] | ΔK_{eff} [MPa] | $\Delta K_{I,a}$ [MPa] | d [mm] | U_{sup} | K_{op} [MPa] | a [mm] |
| 2.79×10^{-9} | 10.05 | 7.44 | 14.93 | 15.85 | 0.50 | 9.03 | 2.68 |
| 2.89×10^{-9} | 10.15 | 7.51 | 17.65 | 18.28 | 0.43 | 11.84 | 3.49 |
| 4.92×10^{-9} | 11.61 | 8.59 | 18.80 | 21.94 | 0.46 | 12.00 | 3.96 |
| 8.60×10^{-9} | 11.68 | 8.64 | 20.98 | 25.80 | 0.42 | 14.31 | 4.93 |
| 8.74×10^{-9} | 17.66 | 13.07 | 22.24 | 31.63 | 0.58 | 11.50 | 5.54 |

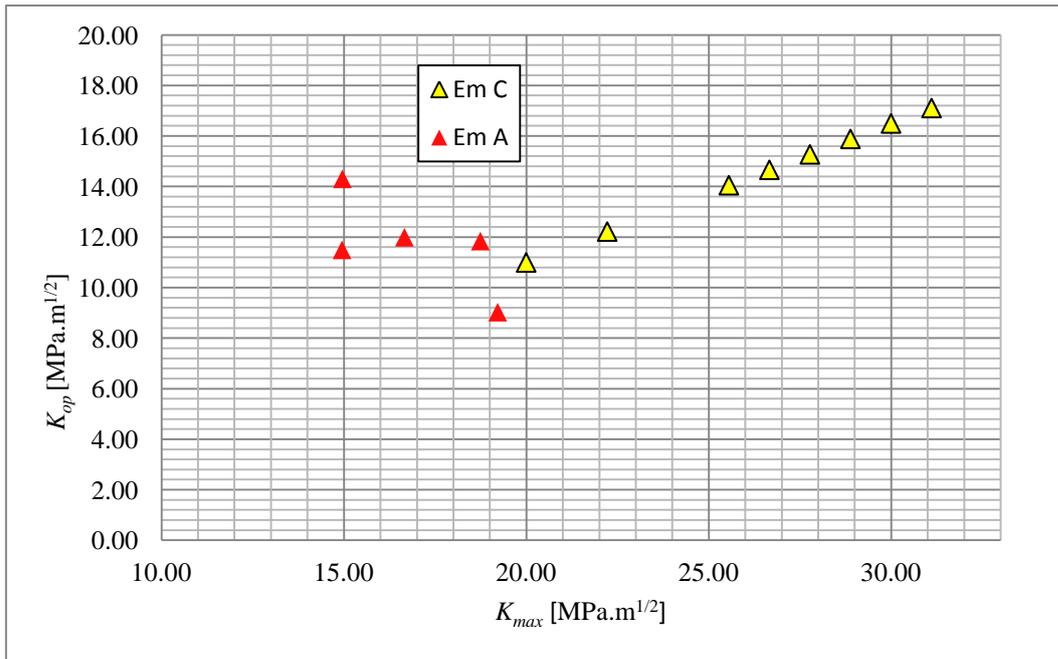


Figura 7.26 – Gráfico K_{max} vs. K_{op} em A e em C.

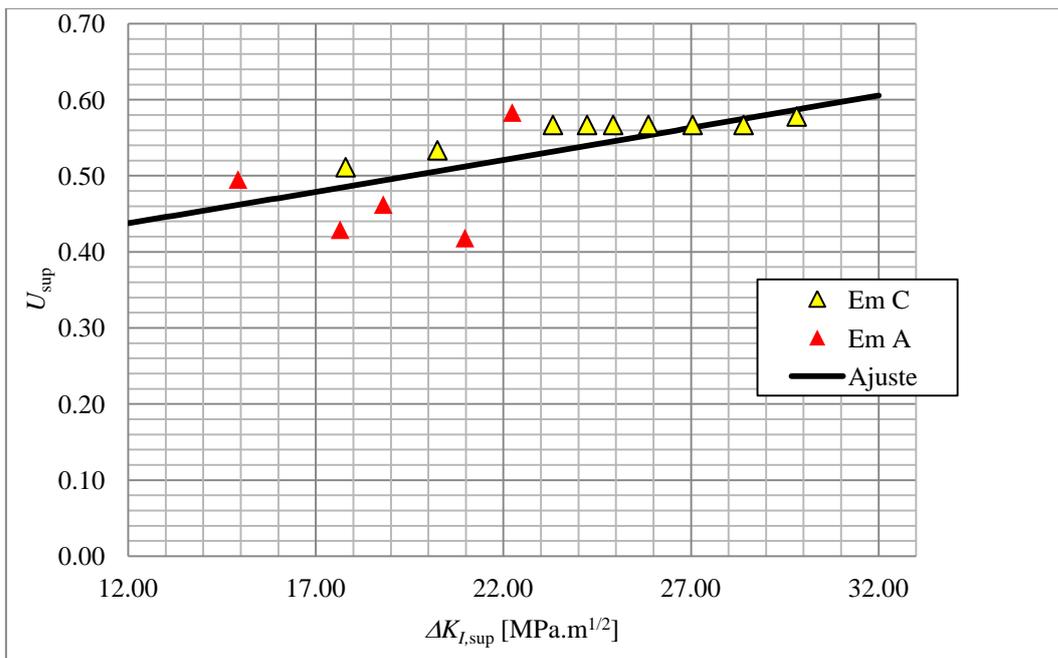


Figura 7.27 – Gráfico U_{sup} vs. $\Delta K_{I,sup}$ em A e em C.

Finalmente, a curva d vs. N é reconstruída com os seguintes passos: (i) utiliza-se a expressão de $\Delta K_{I,c}$ definida na expressão (7. 11) em d_i ; (ii) determina-se ΔK_{eff} , onde $\Delta K_{eff} = U_{sup} \Delta K_{I,c}$, usando a expressão (7. 26); (iii)

substitui ΔK_{eff} na curva $da/dN - \Delta K_{eff}$ (expressão (7. 25)) e encontra-se da/dN ; (iv) a partir desta da/dN , estima-se ΔN empregando $\Delta d = d_{i+1} - d_i$. Assim, $\Delta N = \Delta d / (da/dN)$; e (v) $N = \sum \Delta N$. A curva a vs. N utiliza os mesmos passos descritos, onde em (i) se deve empregar $\Delta K_{I,a}$ em a_i (expressão (7. 13)) ao invés de $\Delta K_{I,c}$ em d_i . Essas curvas são apresentadas na Figura 7.28 e Figura 7.29.

Os resultados apresentados na Figura 7.28 e na Figura 7.29 são melhores estimados com as razões entre número de ciclos N e número de ciclos medidos no experimento N_{exp} mais próximas de 1, conforme indicado na Tabela 7.11 e na Tabela 7.12.

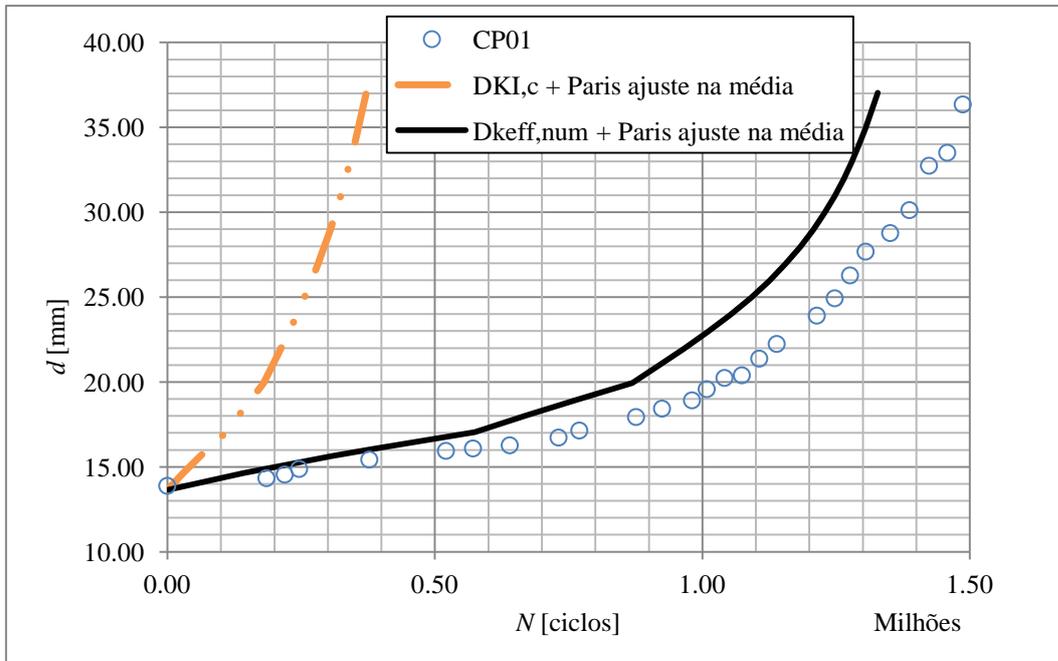


Figura 7.28 – Predição de vida usando ΔK_{eff} em C.

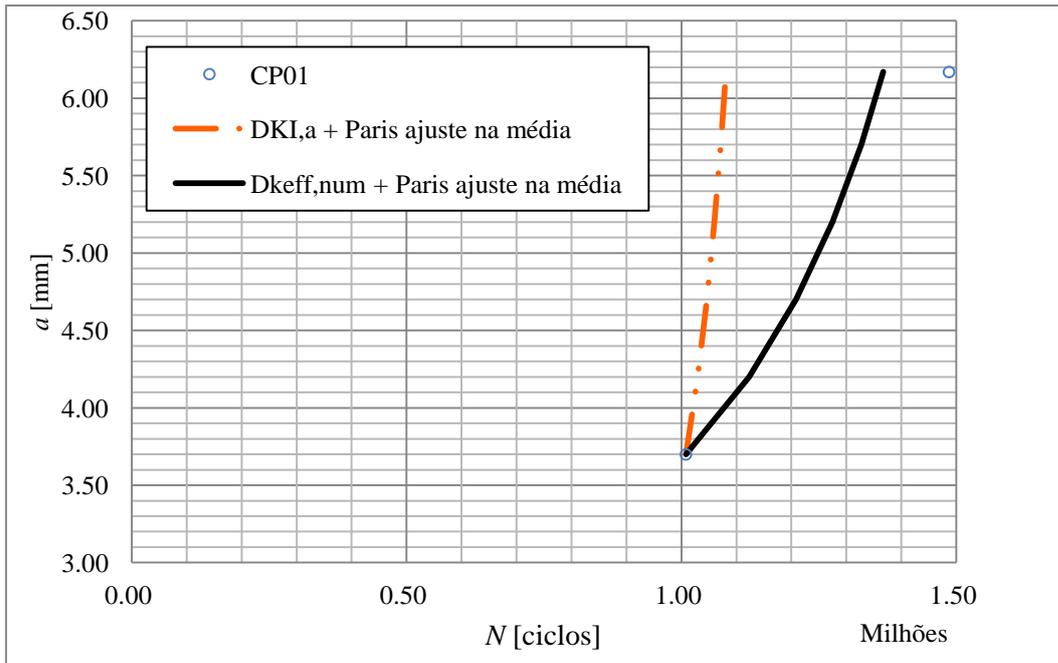


Figura 7.29 – Predição de vida usando ΔK_{eff} em A.

Tabela 7.11 – Razão N/N_{exp} usando $\Delta K_{eff, num}$ em C.

| Dados considerados | N | N/N_{exp} em C |
|---|--------------------|------------------|
| Experimentos | 1.49×10^6 | 1.00 |
| $\Delta K_{I,c}$ e Paris ajuste na média | 0.37×10^6 | 0.25 |
| $\Delta K_{eff, num}$ e Paris ajuste na média | 1.40×10^6 | 0.94 |

Tabela 7.12 - Razão N/N_{exp} usando $\Delta K_{eff, num}$ em A entre a marca 02 e 03.

| Dados considerados | N | N/N_{exp} em A |
|--|--------------------|------------------|
| Experimentos | 0.48×10^6 | 1.00 |
| $\Delta K_{I,a}$ e Paris ajuste na média | 0.07×10^6 | 0.14 |
| ΔK_{eff} e Paris ajuste na média | 0.36×10^6 | 0.75 |