

5

Análise numérica dos parâmetros usados na reconstrução do crescimento da trinca

Neste capítulo, pretende-se avaliar o desempenho separadamente dos parâmetros necessários para uma predição numérica do crescimento da trinca. Como foi explicado no Capítulo 3, na MFLE, o crescimento da trinca pode ser predito utilizando três dados: (i) estimativas precisas de FIT, (ii) curva $da/dN - \Delta K$ do material e (iii) pequeno incremento de trinca, $\Delta a_{máx}$.

Na Seção 5.1, é feita a descrição do modelo e hipóteses simplificadoras adotadas. Assim, na Seção 5.2 são apresentadas as distribuições do FIT obtidas nas frentes da trinca marcadas nos ensaios de flexão efetuados nesta tese (ver Capítulo 4). O principal objetivo é elucidar o efeito da quina, que é a transição entre trinca reta e trinca de canto, observada na frente da trinca dos corpos-de-prova ensaiados. O tratamento numérico na quina para se melhorar os resultados da predição numérica é proposto na Seção 5.3. A direção de propagação na trinca de superfície é avaliada na Seção 5.4, que explica a necessidade de uma hipótese mais geral para seu crescimento.

Na Seção 5.5, são feitos testes de crescimento incremental da trinca usando dois ajustes diferentes de curva $da/dN - \Delta K$ do material. Complementarmente, por se tratar de uma trinca com distribuição de ΔK_I , foi estudada a influência da magnitude máxima de ΔK_I na geometria da trinca.

Finalmente, na Seção 5.6 são mostradas as distribuições de F , que foram obtidas com as distribuições normalizadas do FIT, em geometrias de trincas longas aproximadas por quarto-elipses concêntricas. Essas distribuições são comparadas com as mesmas distribuições em geometrias dos corpos-de-prova CP01.

O teste de convergência da malha de elementos finitos e uma breve introdução da metodologia de crescimento da trinca implementada no FRANC3D¹ (FRANC3D, 2010) são encontrados no Apêndice 1 desta tese.

5.1. Descrição do problema e hipóteses usadas

Para reprodução numérica dos experimentos realizados nesta tese, são usadas as seguintes hipóteses simplificadoras: (i) comportamento do material linear elástico, com as propriedades levantadas no ensaio de tração do aço ASTM A36, sendo que o módulo de elasticidade E e o coeficiente de Poisson ν usados nas simulações numéricas são 211 GPa e 0.3 (ver Tabela 4.2), respectivamente; (ii) pequenos deslocamentos e pequenas deformações; (iii) problema de contato nas faces da trinca; e (iv) condições de escoamento de pequena escala na frente da trinca, utilizando as hipóteses de mecânica da fratura linear elástica (MFLE). Desta forma, o fator de intensidade de tensão é empregado no crescimento da trinca.

A descrição deste problema é esquematizada na Figura 5.1. A placa foi modelada apenas na região contida entre os dois apoios inferiores do suporte de flexão com comprimento de 515 mm. A distância L indicada na Figura 5.1 é igual a 385 mm e, nessas condições de apoios, induz-se carregamento de flexão pura provocando fechamento parcial das faces da trinca. Este carregamento ocasiona tração e compressão na frente da trinca. Sob compressão, as faces da trinca estão em contato, que é considerado nesta reprodução numérica. Adicionalmente, a área de contato é encontrada iterativamente no programa de elementos finitos (o ABAQUS) para cada geometria de trinca. Mais detalhes do modelo de contato definido no ABAQUS são apresentados no Apêndice 6.

Por outro lado, a trinca cresce na região sob tração, como observado nos corpos-de-prova (ver Capítulo 4), que se tornou uma trinca de canto (caso particular de trincas de superfície).

¹ Mais detalhes da interface FRANC3D com programas comerciais de elementos finitos são encontrados em <http://fac.cfm.cornell.edu/index_files/FRANC3D_V5.0_Brochure.pdf>. Acesso em: 09 set. 2012.

Uma análise tridimensional da placa deve ser feita, já que a área de contato é variável ao longo da espessura da placa. Além disso, a mecânica da fratura tridimensional deve ser empregada, pois em trinca de superfície existe uma distribuição do fator de intensidade de tensão na frente da trinca.

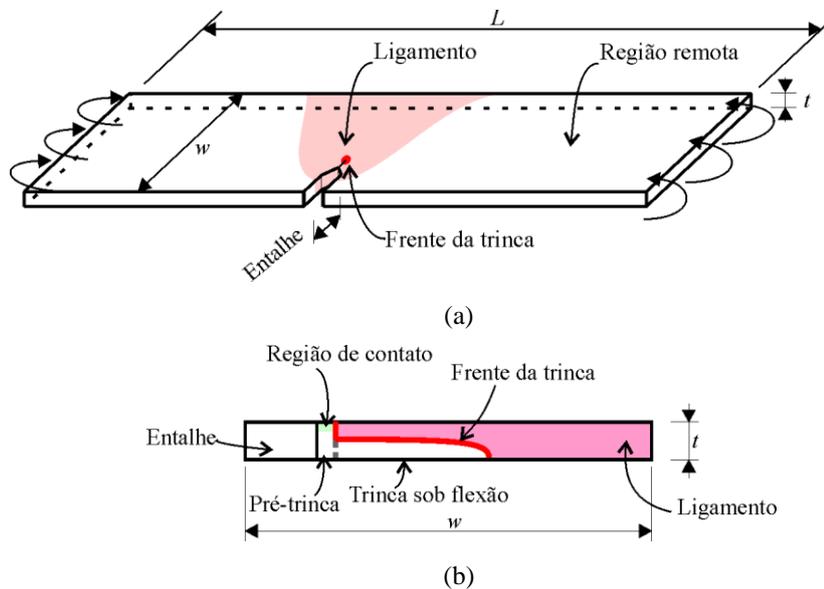


Figura 5.1 – Descrição do problema estudado numericamente: (a) Esquema da placa tridimensional e carregamento aplicado de flexão pura e (b) Indicação da região de contato e trecho da frente da trinca que cresce na seção de ligamento.

O programa tridimensional de MFLE empregado nas análises é o FRANC3D. Esse programa importa e exporta arquivos em formatos compatíveis com o programa de elementos finitos tridimensionais ABAQUS² (Hibbitt et al., 1996). Enquanto que no FRANC3D gera-se a malha de elementos finitos com trinca, região de contato das faces da trinca; tensões e deslocamentos do problema são calculados no ABAQUS. Ao final dos cálculos no ABAQUS, é determinada a distribuição do FIT no programa FRANC3D com o método de correlação de deslocamentos.

Complementarmente, os elementos sólidos tridimensionais empregados para discretizar a placa nessas análises são C3D10, C3D15 e C3D20. Note que C3D indica que o elemento é sólido tridimensional. C3D10, C3D15 e C3D20 são, respectivamente, elemento tetraédrico quadrático com 10 nós, elemento

² ABAQUS é uma marca registrada da Dassault Systemes Simulia Corp.

prismático triangular quadrático com 15 nós e elemento *brick* quadrático com 20 nós.

O carregamento de flexão aplicado é a magnitude ΔP obtida pela diferença entre o carregamento máximo e carregamento mínimo aplicado ($\Delta P = F_{\max} - F_{\min}$). O ΔP induz à tensão $\Delta\sigma$, onde a razão $R = F_{\min}/F_{\max} = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0.1$. Embora $\Delta\sigma$ varie ao longo da espessura da placa, a razão R mantém-se constante. Note que esse carregamento ocasiona apenas ΔK_I , pois a trinca abre sob modo I de fratura da trinca (os FIT dos modos II e III de fratura são nulos).

5.2. Singularidades numéricas na frente da trinca

Nos ensaios dos corpos-de-prova sob flexão pura foram encontradas geometrias de frente de trinca que puderam ser simplificadas por um trecho de trinca reta e outro trecho de trinca de canto. A transição destes dois trechos foi uma quina, conforme foi ilustrado no Capítulo 4.

Nesta seção, são mostradas as distribuições do FIT na frente da trinca obtidas nos ensaios, avaliando-se a coerência do crescimento de trinca que decorre destas distribuições com o crescimento observado nos corpos-de-prova. Com essa avaliação, percebeu-se que a quina introduz singularidade numérica no FIT nesta posição. Então, existem duas singularidades nesta frente da trinca: (i) interseção da trinca com a superfície inferior da placa e; (ii) quina.

Utilizando o FRANC3D, determina-se a distribuição do fator de intensidade de tensão (FIT) usando uma geometria de trinca com um raio de arredondamento na quina. Este raio de arredondamento é empregado, pois no programa FRANC3D não se gera geometria de frente de trinca com quinas. A posição da quina e o raio de arredondamento são ilustrados na Figura 5.2.

Na Figura 5.3 são ilustradas as distribuições de ΔK_I avaliadas numericamente nas Marcas 02a, 02b, 03a, 05b, 06b, 08a e 09a com raios de arredondamento de 1 mm. Na quina, devido a singularidades numéricas, são obtidos valores superiores aos valores alcançados na interseção da trinca com a

superfície inferior da placa. Uma distribuição de ΔK_I com valor na quina superior ou igual ao valor na superfície inferior da placa tenderia a incrementos maiores ou similares na quina que na superfície inferior da placa. Contudo, o crescimento observado nos experimentos mostrou uma desaceleração nos incrementos de trinca na direção da profundidade da trinca (na quina).

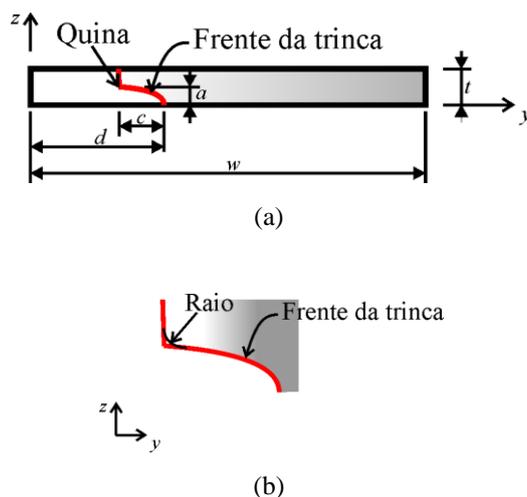
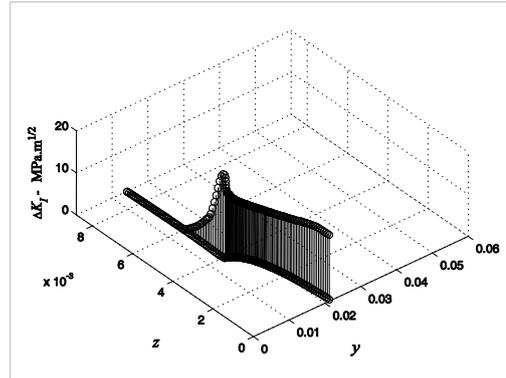


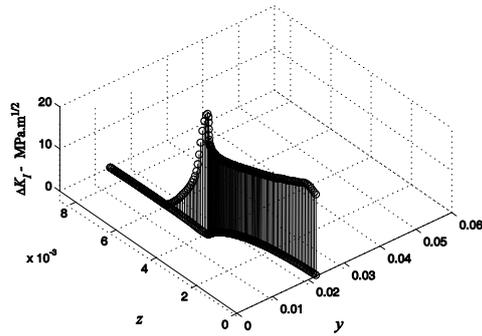
Figura 5.2 – Esquema da geometria da frente da trinca: (a) Localização da quina obtida nos corpos-de-prova ensaiados e (b) raio de arredondamento utilizado para gerar a geometria do ensaio no FRANC3D.

Ainda com base nas observações dos corpos-de-prova, a trinca de canto cresce continuamente sem mudanças repentinas de geometria. Desta forma, após sua estabilização de geometria para o carregamento aplicado, é esperada uma distribuição de ΔK_I semelhante em todos os passos. Isso implica que a magnitude de ΔK_I é máxima na superfície inferior da placa e decresce de magnitude em posições da frente da trinca que se afasta dessa superfície. Portanto, na Seção 5.3 são propostas metodologias para se obter distribuição de ΔK_I sem influência de singularidades numéricas.

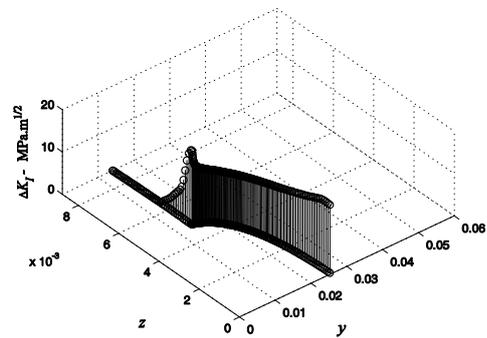
Adicionalmente, são feitas algumas análises com diferentes raios de arredondamento com a finalidade de se conhecer sua influência na magnitude e distribuição de ΔK_I na quina. Os resultados de ΔK_I usando a geometria da trinca da Marca 03b do CP07 são apresentados na Figura 5.4 para um comprimento de trinca normalizado.



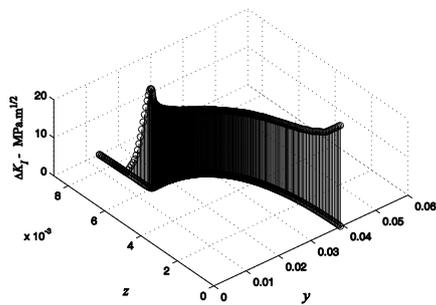
(a) Marca 02a do CP07.



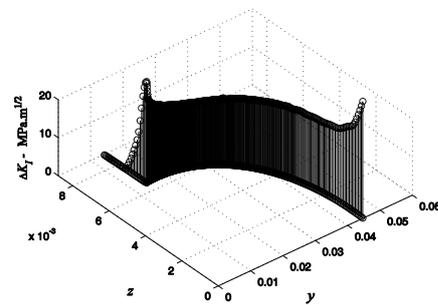
(b) Marca 02b do CP07.



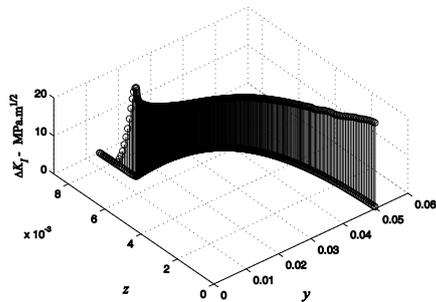
(c) Marca 03a do CP07.



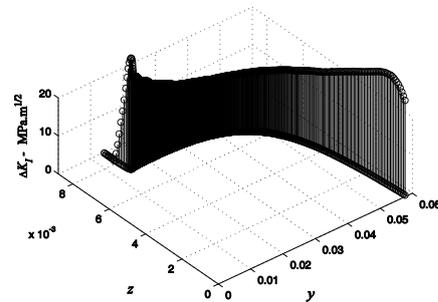
(d) Marca 05b do CP07.



(e) Marca 06b do CP07.



(f) Marca 08a do CP07.



(g) Marca 09a do CP07.

Figura 5.3 – Distribuição do ΔK_I usando diversas geometrias de trincas obtidas nos corpos-de-prova ensaiados.

Define-se a coordenada 0.0 na superfície superior da placa (onde atuam remotamente as tensões de compressão máxima) e a coordenada 1.0, na superfície inferior da placa (onde atuam remotamente as tensões de tração máxima). Normalizam-se todas as posições na frente da trinca pelo comprimento total da frente da trinca, que é o caminho da frente da trinca desde a superfície superior até a superfície inferior da placa. A posição da quina é aproximadamente 0.2 da frente da trinca normalizada.

No gráfico na Figura 5.4 é encontrada a variação do FIT em relação a uma dada frente de trinca normalizada usando raios de arredondamento com valores de 0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 3 mm e 4 mm, conforme indicado na legenda.

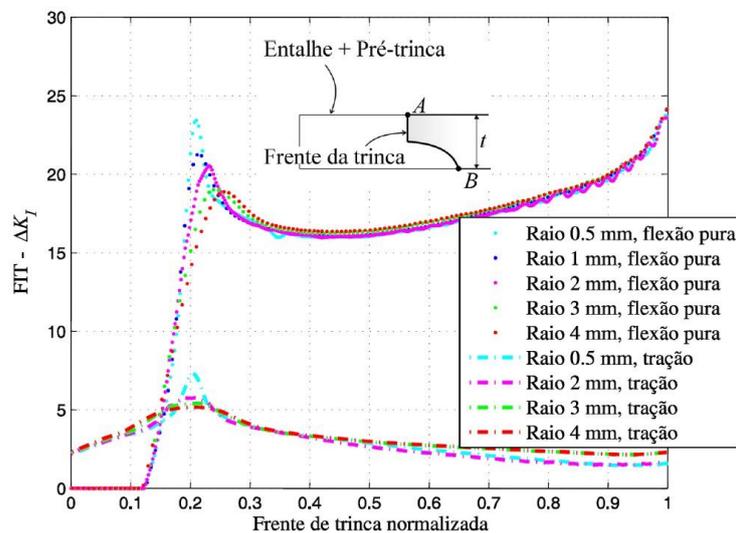


Figura 5.4 – Distribuição do FIT na frente da trinca normalizada usando a geometria da Marca 03b no CP07 com diversos raios de arredondamento e sob carregamento remoto de flexão pura ou sob tração.

Com base nos resultados ilustrados na Figura 5.4, para raios de arredondamento pequenos, a magnitude do ΔK_I na quina é maior. Nesses casos, a região de singularidade é concentrada em um comprimento pequeno da frente da trinca. À medida que se aumenta o raio de arredondamento, ΔK_I na quina diminui. Entretanto, a magnitude de ΔK_I é influenciada em um comprimento maior da frente da trinca.

Como o ΔK_I depende da magnitude $\Delta\sigma$, foram feitas análises complementares aplicando remotamente um carregamento de tração. Desta forma, pode-se verificar que o pico ΔK_I ocorre por causa da quina na frente da trinca.

Como houve diferenças na reprodução do comportamento experimental e predição numérica, na próxima seção são propostas três metodologias para adequar os resultados da predição numérica com o comportamento físico observado durante os experimentos.

5.3. Metodologias usadas para tratar a quina

Nesta seção são apresentadas três metodologias para melhorar os resultados numéricos. Essas metodologias tratam as singularidades oriundas da quina na frente da trinca e interseção da frente da trinca com a superfície da placa. Elas são chamadas de: (i) suavização da frente da trinca; (ii) extrapolação dos incrementos Δa na frente da trinca curva; (iii) extrapolação de ΔK_I obtido na trinca curva até as regiões de singularidades.

5.3.1. Suavização da frente da trinca

A metodologia de suavização da frente da trinca foi implementada no programa FRANC3D para propagar a trinca, a partir da distribuição do FIT em um defeito inicial. Adicionalmente, o usuário fornece a taxa de propagação da trinca, $da/dN - \Delta K$, o incremento máximo da trinca, $\Delta a_{máx}$ e o critério de direção de propagação da trinca. O crescimento da trinca é feito incrementalmente com pequenas magnitudes de $\Delta a_{máx}$.

Para obter a geometria da trinca subsequente, interpolam-se pontos representativos na frente da trinca por uma curva de *Bézier* cúbica. Os pontos representativos são as extremidades dos vetores de comprimento Δa_i , onde Δa_i é obtido com a equação (3.16), ΔK , $\Delta a_{máx}$ e $da/dN - \Delta K$. Os vetores dependem

do critério de direção adotado. Para cada nova geometria da frente de trinca, esse processo é repetido até alcançar o comprimento final da trinca.

Um fluxograma com essa metodologia do crescimento da trinca por fadiga é ilustrado na Figura 5.5. Usualmente, cada nova frente de trinca é chamada de passo. Normalmente, podem-se fazer diversos passos automaticamente no FRANC3D. Entretanto, essa frente de trinca tem uma geometria mais complexa, que exigiu um acompanhamento pelo usuário em todos os incrementos de trinca.

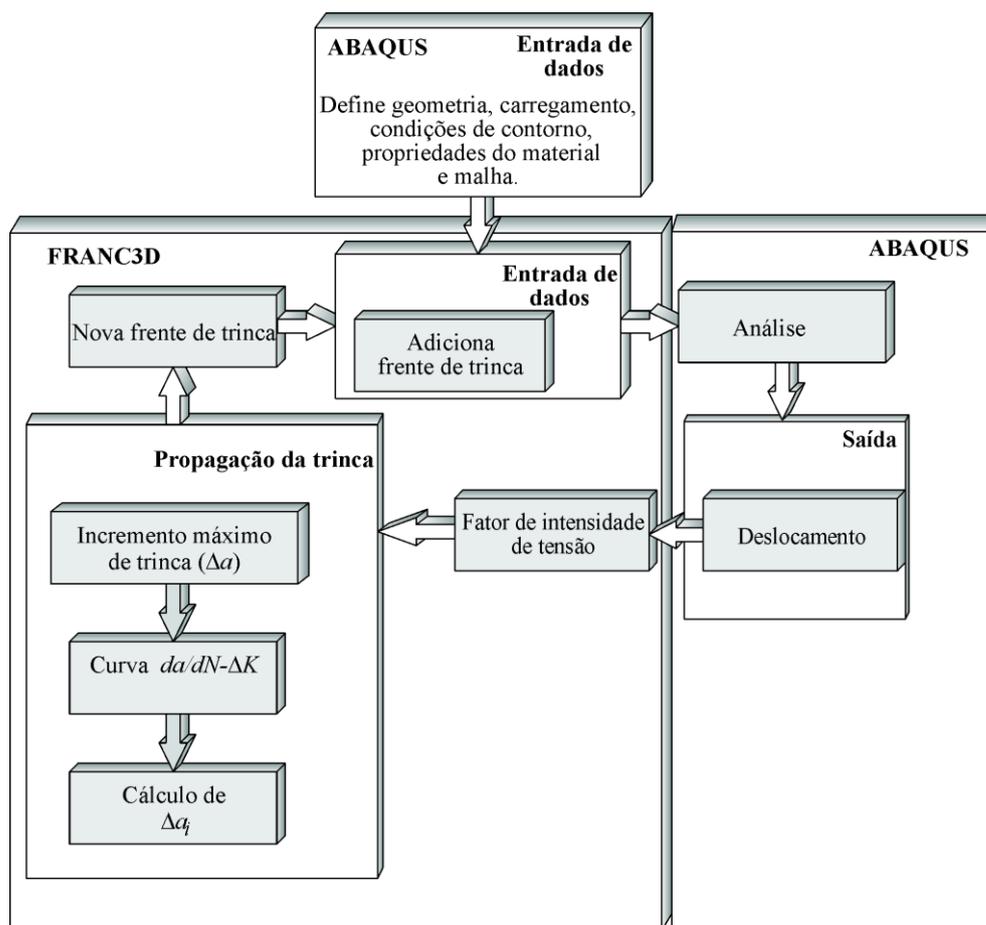


Figura 5.5 – Fluxograma das etapas da simulação do crescimento da trinca incorporado ao programa FRANC3D.

A vantagem desta metodologia é que a curva de *Bézier* cúbica suaviza a frente da trinca. Essa suavização facilita a geração da malha e elimina os picos na distribuição do ΔK_I . Por outro lado, ocasiona incertezas na geometria da frente da trinca. Note que essa geometria é acoplada com a curva de propagação da trinca ($da/dN - \Delta K$) e sua influência na distribuição do FIT é discutida no Capítulo 6.

Mais detalhes sobre o FRANC3D são encontrados, por exemplo, em Carter et al. (2000).

5.3.2.

Extrapolação de Δa

Para melhorar a coerência da geometria da trinca subsequente na predição numérica com a geometria obtida nos corpos-de-prova, é proposta a metodologia de extrapolção de Δa . Assim, obtém-se a distribuição do FIT em uma frente de trinca com quina que tem um trecho de trinca reto (trecho estacionário) e outro trecho de trinca de canto (trecho que cresce). A distribuição do FIT no trecho reto é desprezada. Por outro lado, a distribuição de FIT da trinca de canto é discretizada em nós e em cada nó é calculado um incremento (Δa_i), de acordo com $\Delta a_{máx}$ e a curva $da/dN-\Delta K$, assumindo que a direção de propagação é perpendicular à trinca de canto atual. Em cada nó da geometria atual da frente de trinca de canto é associado um vetor com comprimento Δa_i , conforme é ilustrado na Figura 5.6. Esses dados são denominados nesta figura por incrementos Δa_i .

Essa distribuição de nós é ajustada por uma curva polinomial de grau 4, que é extrapolada até as extremidades do trecho da trinca de canto, descartando-se os valores Δa_i obtidos na quina e superfície inferior da placa (indicado por curva de extrapolção na Figura 5.6). Essa solução de extrapolção de Δa foi usada por Joseph & Erdogan (1989).

Como pode ser visualizado na Figura 5.6, mesmo com o uso de um raio de arredondamento na quina, quando se extrapola as extremidades da curva polinomial de grau 4, elimina-se a interferência desse raio de arredondamento na frente de trinca subsequente.

Complementarmente, na Figura 5.7 é ilustrada uma geometria da trinca em uma frente de trinca atual e a geometria da trinca subsequente obtida por extrapolção de Δa .

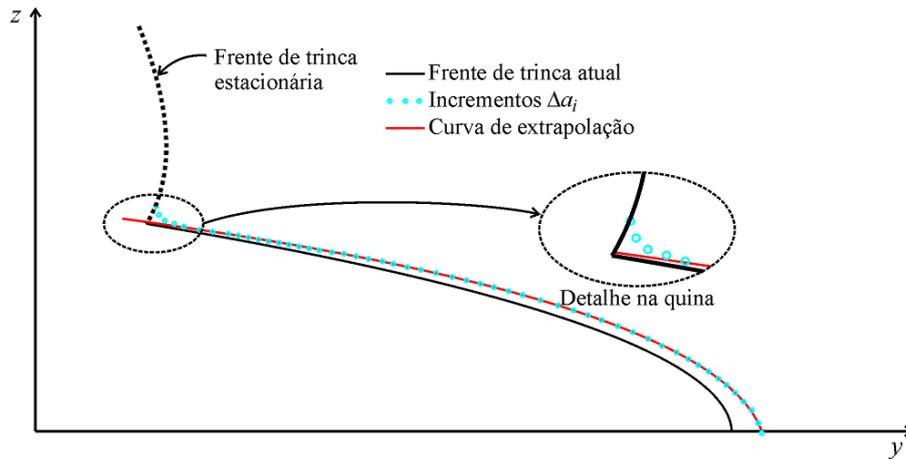


Figura 5.6 – Esquema da geometria da frente de trinca atual e curva obtida pela metodologia de extrapolação de Δa_i , preservando a quina na geometria da trinca subsequente.

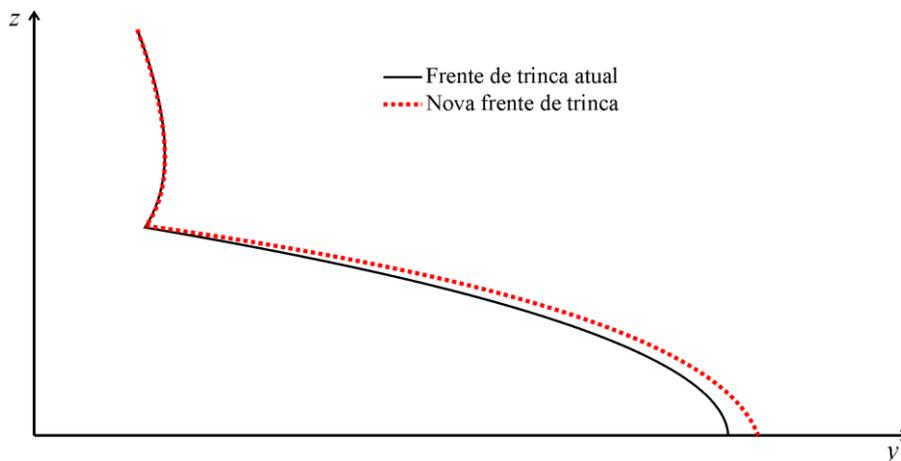


Figura 5.7 – Geometrias das frentes da trinca atual e trinca subsequente usando a metodologia de extrapolação de Δa_i .

5.3.3. Extrapolação de ΔK_I

Similarmente a metodologia de extrapolação de Δa , a metodologia de extrapolação de ΔK_I elimina as singularidades numéricas oriundas da quina na frente da trinca. A aplicação desta metodologia é diretamente na distribuição de ΔK_I usando a geometria das marcas experimentais feitas nos corpos-de-prova, pois essa distribuição é utilizada para a expressão de ajuste do ΔK_I .

Como discutido na Seção 5.2, existem duas singularidades nessa frente de trinca: (i) interseção da trinca com a superfície inferior da placa e; (ii) quina. Assim, os valores de ΔK_I são extrapolados na região da trinca de canto, localizada entre a quina e a superfície inferior da placa. Os valores de ΔK_I devem ser determinados distantes dessas regiões de singularidade, definindo-se assim uma região de valores confiáveis de ΔK_I na trinca de canto.

Para exemplificar essa metodologia, é ilustrada na Figura 5.8 a distribuição de ΔK_I em uma frente de trinca obtida no ensaio de flexão, visualizando-se quatro trechos importantes. Para facilitar a discussão dos resultados, são definidos pontos nas extremidades desses trechos, que são denominados de trecho *AB*, trecho *BC*, trecho *CD* e trecho superior a *D*.

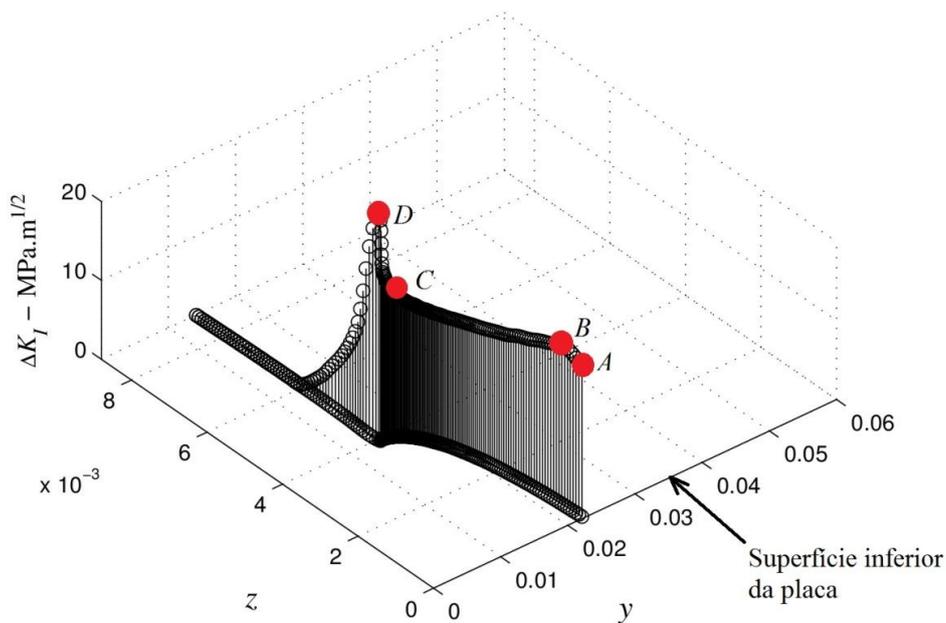


Figura 5.8 – Identificação dos trechos importantes na distribuição do FIT usando marcas de frente da trinca obtidas nos corpos-de-prova ensaiados.

O trecho *AB* é localizado próximo a superfície inferior da placa, onde atuam remotamente o carregamento de tração máxima ($\phi = 0^\circ$). Neste trecho, foram obtidas perturbações por causa da interseção da trinca com a superfície inferior da placa. A inclinação na distribuição de ΔK_I oscila em valores crescentes e decrescentes entre uma análise e outra, alternando a geometria da trinca nessa interseção. Por essa alternância da geometria, pode-se dizer que a região *AB* é uma

região de oscilação do ΔK_I . Isso implica que essa singularidade não interfere drasticamente na geometria da trinca. Entretanto, para melhorar os resultados, podem-se extrapolar os valores de ΔK_I até a superfície inferior da placa.

Ao contrário do trecho AB , a magnitude de ΔK_I no trecho CD tem que ser tratada. Este trecho corresponde à quina que apareceu durante a aplicação do carregamento de flexão. O valor de ΔK_I obtido na análise de elementos finitos é máximo nessa quina. Se os incrementos da profundidade Δa e comprimento Δc dependem das magnitudes de ΔK_I e curva da taxa de propagação $da/dN - \Delta K_I$, para mesmas magnitudes de ΔK_I ou superiores magnitudes de ΔK_I , resultariam em $\Delta a \geq \Delta c$. Conseqüentemente, a razão a/c seria crescente.

Entretanto, a razão a/c diminuiu durante o ensaio de crescimento da trinca, isto é, o crescimento da trinca na superfície inferior da placa c é maior que o crescimento da trinca ao longo da profundidade a ($\Delta c > \Delta a$). Portanto, sem esse tratamento, a geometria da trinca na predição numérica tem um comportamento durante seu crescimento diferente do comportamento físico observado nos experimentos. Desta forma, ΔK_I tem que ser descartado nesse trecho.

A distribuição de ΔK_I ao longo da região BC varia gradativamente sem picos ou oscilações de ΔK_I . A frente da trinca próxima a superfície inferior da placa tem valores de ΔK_I máximos, decrescendo suavemente conforme a frente de trinca se aproxima do ponto C . A distribuição de FIT é coerente ao comportamento físico observado nos experimentos. Desta forma, esse trecho é chamado de distribuição confiável de ΔK_I .

No trecho superior a D , também chamado de trinca reta, é observado o decréscimo de ΔK_I até atingir valores nulos, que ocorrem nesse trecho remanescente da pré-trinca. Essa distribuição é coerente, mas é difícil estimar exatamente a posição em que ΔK_I começa a ser influenciado pela quina. De qualquer forma, descartar essa região não implica em qualquer perda na precisão da geometria da frente de trinca. Esse assunto é explicado na Seção 5.4.

Finalmente, o procedimento para se desprezar as regiões de singularidade utiliza o ângulo ϕ , definido no Capítulo 4. Este ângulo é novamente ilustrado na Figura 5.9.

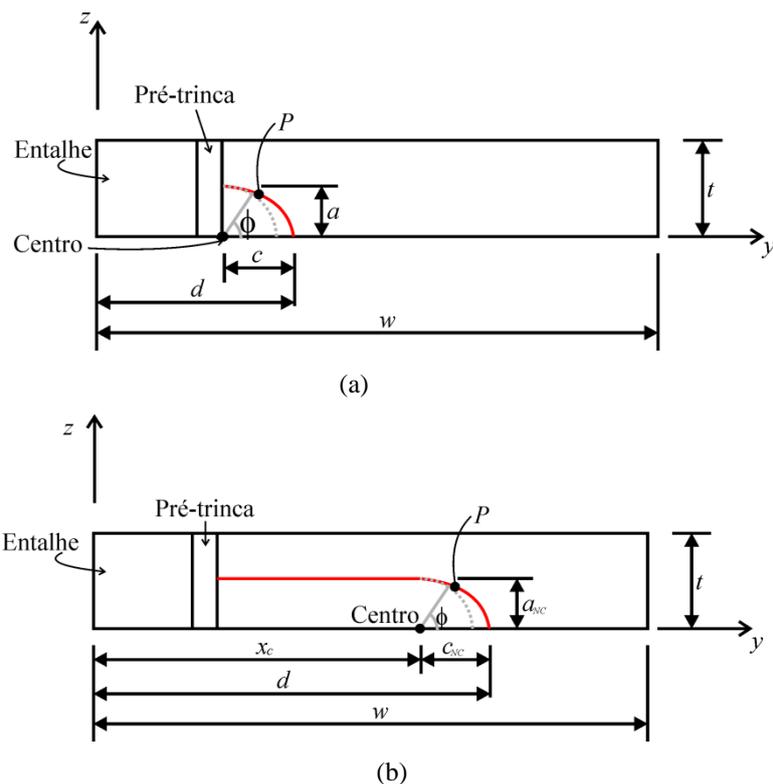


Figura 5.9 – Coordenadas na frente da trinca usando geometria simplificada: (a) em trinca curta e (b) em trinca longa.

Esse procedimento é: (i) a normalização de ΔK_I , determinando-se o fator de geometria F em relação ao ângulo ϕ ; (ii) extrapolação dos valores de F por uma curva polinomial até a superfície inferior da placa (correspondente ao ângulo $\phi = 0^\circ$); (iii) na região próxima à quina, assume-se que o menor valor de F obtido na frente de trinca de canto alcança o ângulo $\phi = 90^\circ$ com mesma magnitude. Quando a trinca é longa, F obtido em $\phi = 90^\circ$ é assumido constante no trecho da trinca de canto com profundidade constante e igual ao semi-eixo da curva quarto-elíptica não concêntrica, caracterizando uma distribuição constante de F e, conseqüentemente, uma distribuição constante do FIT.

5.4. Direção do crescimento da trinca

Neste trabalho, foi usada a hipótese de extensão plana para propagar a trinca no FRANC3D. O critério de extensão plana considera um plano de propagação da

trinca. É assumida que a direção de propagação da nova frente de trinca é um vetor normal a frente de trinca atual. Esta hipótese também é utilizada em Wu (2006), por exemplo.

Para um caso de uma trinca passante sob carregamento de tração, pode-se assumir que a trinca se propaga em um plano e a nova frente de trinca é perpendicular à frente de trinca atual (Figura 5.10 (a)). A mesma hipótese também é adequada para uma trinca de superfície que foi nucleada com carregamento de flexão pura e/ou tração e se propaga ainda sob o mesmo carregamento (Figura 5.10 (b)).

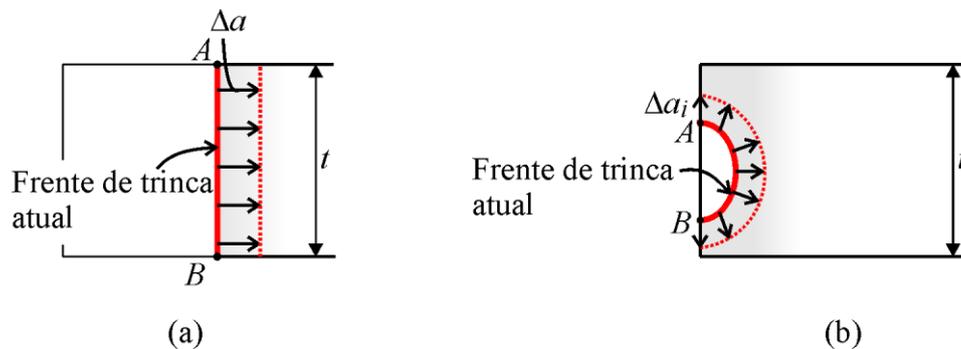


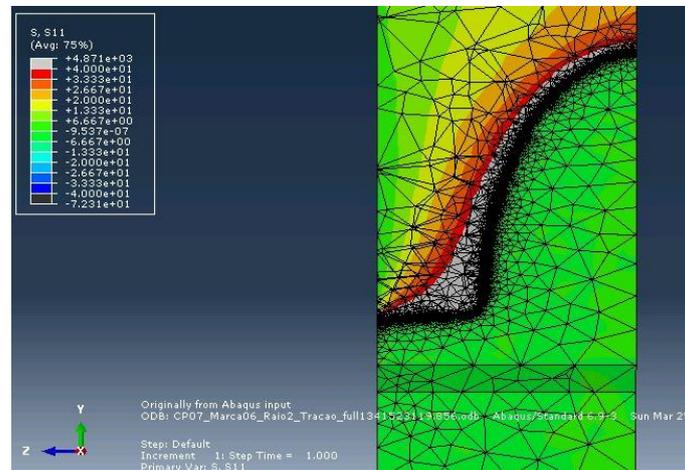
Figura 5.10 – Hipótese da direção de crescimento com vetor normal no plano da seção de ligamento: (a) em uma trinca reta passante sob tração remota e (b) em uma trinca de superfície sob tração e/ou flexão remota.

Entretanto, a propagação de trinca estudada neste trabalho é mais complexa do que os casos exemplificados acima. Uma trinca inicialmente reta, obtida por um ensaio de tração simples de fadiga, é submetida a um carregamento de flexão pura. A aplicação desse carregamento de flexão induz ao fechamento das faces da trinca, provocando contato nessa região de fechamento.

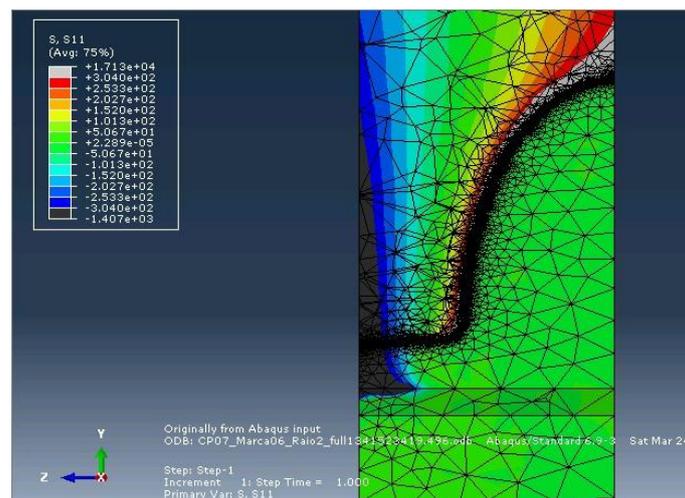
A direção do gradiente de tensão depende do tipo de carregamento. Para a mesma geometria de trinca, essa distribuição do gradiente de tensões para carregamento de flexão é diferente da distribuição do gradiente de tensões para carregamento de tração.

Para exemplificar o gradiente de tensão ao longo da espessura da placa, adotou-se uma marca de trinca com geometria obtida no ensaio e fez-se duas análises no programa FRANC3D. Em cada análise foi aplicado um carregamento remoto diferente. Na Figura 5.11 (a) e Figura 5.11 (b) são apresentadas as

distribuições das tensões normais na seção de ligamento da placa próximas a frente da trinca sob condições de carregamentos de tração simples e flexão pura induzindo o fechamento parcial da frente da trinca, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 5.11 – Distribuição das tensões normais obtida no ABAQUS na seção de ligamento usando uma geometria de trinca usando uma geometria de trinca extraída dos corpos-de-prova ensaiados: (a) sob carregamento remoto de tração simples e (b) sob carregamento remoto de flexão pura.

Com base na Figura 5.11, pode-se observar que essas distribuições são bem diferentes. Na análise sob carregamento remoto de tração (ver Figura 5.11 (a)), as faixas de tensões de tração atravessam toda a espessura da placa. Essa distribuição de tensão é bem conhecida, tendendo a tornar a trinca passante e com um valor de ΔK_I constante em toda a espessura da frente da trinca. Neste caso, parece ser uma hipótese adequada assumir que a direção de crescimento da trinca é

perpendicular à frente de trinca atual. Com esta hipótese, ocorre sobreposição dos incrementos de trinca calculados na quina. O esboço desta direção de propagação é encontrado na Figura 5.12.

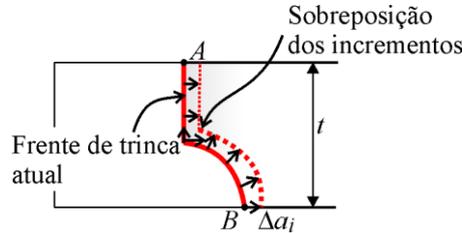


Figura 5.12 – Esquema da direção de crescimento na frente de trinca usando a geometria dos corpos-de-prova ensaiados sob carregamento remoto de tração simples.

Contudo sob carregamento de flexão pura, as faixas de tensões no CP não atravessam toda a espessura da placa (Figura 5.11 (b)). Elas são paralelas às superfícies da placa. Mesmo com perturbação no gradiente de tensões próxima a trinca, as faixas de tensões não tendem a atravessar a espessura da placa e cruzam o trecho de trinca reto (trecho estacionário remanescente da pré-trinca).

Por este motivo, a trinca tende a crescer apenas no trecho curvo da trinca sob carregamento de flexão pura. Uma hipótese mais adequada para direção de crescimento da trinca é que a trinca cresce apenas perpendicular à região da trinca de canto. Esta direção de propagação é indicada na Figura 5.13.

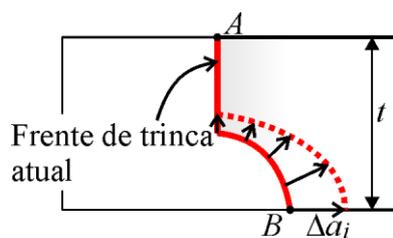


Figura 5.13 – Esquema de uma hipótese mais geral da direção de crescimento na frente de trinca usando a geometria dos corpos-de-prova ensaiados sob carregamento remoto de flexão pura.

Adicionalmente, na Figura 5.8 existe uma região de ΔK_I positiva localizada no trecho reto (entre a superfície superior da placa e ponto D). A magnitude de ΔK_I nesta região pode ser desconsiderada, pois o incremento de trinca é na direção paralela a esse trecho (direção paralela ao trecho reto).

Portanto, o incremento de trinca em determinado com $\Delta K_{I,a}$, é suficiente para prever o incremento de trinca na quina.

5.5.

Sensibilidade da geometria da trinca a $da/dN-\Delta K$ e a $\Delta K_{máx}$

A trinca estudada nesta tese tem uma distribuição de ΔK_I , em todos os passos, partindo de valores nulos a valores positivos. Essa distribuição pode exigir uma lei de propagação que descreva as duas regiões iniciais da curva $da/dN-\Delta K$ (região I e região II). Adicionalmente, em uma propagação incremental, o usuário deve fornecer um incremento máximo de trinca $\Delta a_{máx}$, que deve ser pequeno.

Os incrementos Δa_i são determinados a partir de $\Delta a_{máx}$ e da curva $da/dN-\Delta K$. Para um incremento $\Delta a_{máx}$ pequeno, podem ocorrer incrementos Δa_i desprezíveis ou nulos em uma posição da frente da trinca com ΔK_I na região I (limiar de propagação). Nestas condições, todos os incrementos Δa_i ocorrem na região II da $da/dN-\Delta K$. Isso implica que eles terão mesma proporção para qualquer magnitude de $\Delta K_{máx}$, pois a inclinação da curva $da/dN-\Delta K$ é constante na região II. Entretanto, caso ΔK_I esteja na região I e superior ao limiar de propagação, pode-se ter influência de incrementos diferentes nesta região. Desta forma, são importantes análises para se conhecer a influência das leis de propagação na geometria da trinca, pois muitas vezes apenas se utiliza a lei de Paris para se executar as previsões de vida e de geometria.

Desta forma, adotou-se uma frente de trinca com a geometria dos experimentos e, a partir dessa frente de trinca, foi realizado o crescimento da trinca com dois ajustes de $da/dN-\Delta K$. O primeiro ajuste dos dados é feito com a lei de Hall que descreve a região I e a região II da curva $da/dN-\Delta K$, com a expressão (4. 2) previamente apresentada, com

$$\frac{da}{dN} = 9.702 \times 10^{-13} \Delta K^{2.975} \left(\frac{\Delta K - \Delta K_{th} (1 + 0.42R)}{(1 - R)} \right)^{0.683}, \quad (5. 1)$$

onde ΔK_{th} é $8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ e $R=0.1$. Complementarmente, o segundo ajuste com mesmos dados é

$$\frac{da}{dN} = 3.029 \times 10^{-3} \Delta K^{3.955}, \quad (5.2)$$

usando a lei de Paris.

Em uma primeira simulação de crescimento incremental, adota-se o fator de intensidade de tensão máximo $\Delta K_{I,máx}$, localizado próximo a superfície inferior da placa, com $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. A metodologia usada para prever a frente de trinca subsequente é extrapolação de Δa , conforme Seção 5.3.2. O incremento usado é $\Delta a_{máx} = 0.25 \text{ mm}$. Quando se usou ajuste de Paris e ajuste de Hall, não houve alteração na geometria da trinca. Isso implica que todos os incrementos Δa_i não desprezíveis estão contidos na região II da curva $da/dN - \Delta K$. Na Figura 5.14 são apresentadas as geometrias da frente da trinca obtidas por esses dois ajustes.

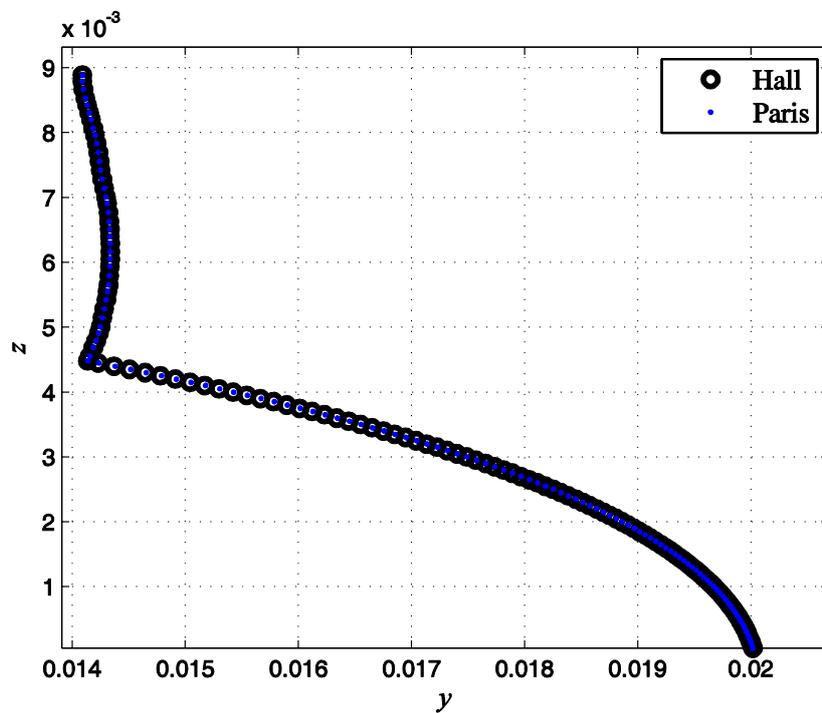


Figura 5.14 – Comparação da geometria da frente de trinca subsequente determinada com lei de propagação ajustada por Hall e lei de Paris.

Adicionalmente, foram comparadas as geometrias da trinca usando esses dois ajustes para incrementos máximos, Δa_{\max} , entre $t/88$ e $t/9$. Como os menores incrementos de trinca ocorrem na quina da trinca, apenas esses incrementos são apresentados na Figura 5.15.

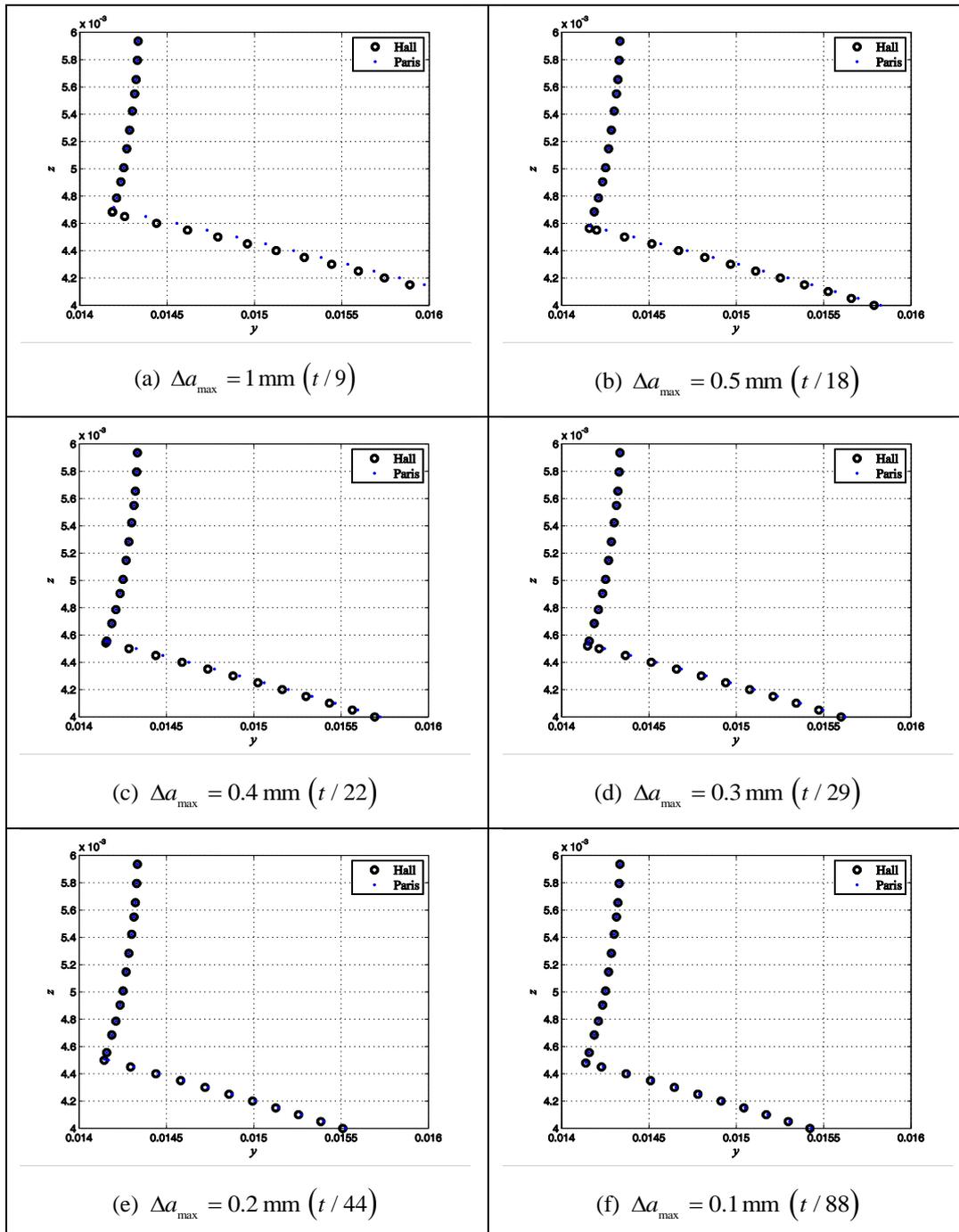


Figura 5.15 – Comparação da geometria da frente de trinca subsequente na quina usando ajustes da lei de propagação com Lei de Paris e com ajuste de Hall para diversos incrementos máximos de trinca.

Com base nessas frentes de trincas, aplicou-se o método incremental para calcular as novas frentes de trincas, que são coincidentes para o ajuste de Paris e ajuste de Hall desde que o $\Delta a_{m\acute{a}x}$ não seja superior a 0.5 mm ($t/88$).

Portanto, para incrementos iguais ou inferiores a 0.5 mm, utiliza-se apenas a região II da curva $da/dN - \Delta K$. A vantagem de se trabalhar apenas na região II é que não ocorrem incertezas provenientes da região I (Lawson et al., 1999). A magnitude de $\Delta K_{I,m\acute{a}x}$ não altera a previsão da geometria da trinca, pois a derivada da da/dN é constante nessa região II. Desta forma, como ΔK_I estão na região II, não é necessário aplicar o carregamento ΔP igual ao carregamento atuante. Pode-se fazer uma previsão da geometria satisfatória com um carregamento constante no programa FRANC3D, usando $\Delta a_{m\acute{a}x} \leq 0.5$ mm. Contudo, para prever a vida, o carregamento atuante deve ser considerado.

5.6.

Simplificação da geometria da trinca como quarto-elipses

No Capítulo 4 foram apresentadas novas simplificações para geometria de trinca de canto, pois a geometria das curvas quarto-elípticas concêntricas não ajustam satisfatoriamente as geometrias de frente de trinca obtidas nos corpos-de-prova ensaiados, quando o comprimento da trinca é longo. Nesta seção, três resultados de distribuição de ΔK_I obtidos com geometria de trinca simplificada por quarto-elipses concêntricas são discutidos. Com essas distribuições de $\Delta K_I / \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$ pode-se exemplificar a influência da geometria da trinca sob a distribuição de ΔK_I .

Entre as marcas 02 e 03 feitas no CP01 foram ajustadas três geometrias de frente de trinca por curvas quarto-elípticas concêntricas, note que o centro usado é $X = 11.89$ mm. Na Figura 5.16 são ilustradas essas geometrias. Complementarmente, na Figura 5.17 é mostrada a legenda de cores usadas para cada geometria. Essas cores são relacionadas com a Figura 5.18 para identificar os resultados discretos F obtidos com $\Delta K_I / \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$ em cada geometria da trinca. Adicionalmente, as dimensões da placa usadas nas análises numéricas são as

dimensões obtidas no CP01 e as hipóteses simplificadoras consideradas foram descritas na Seção 5.1.

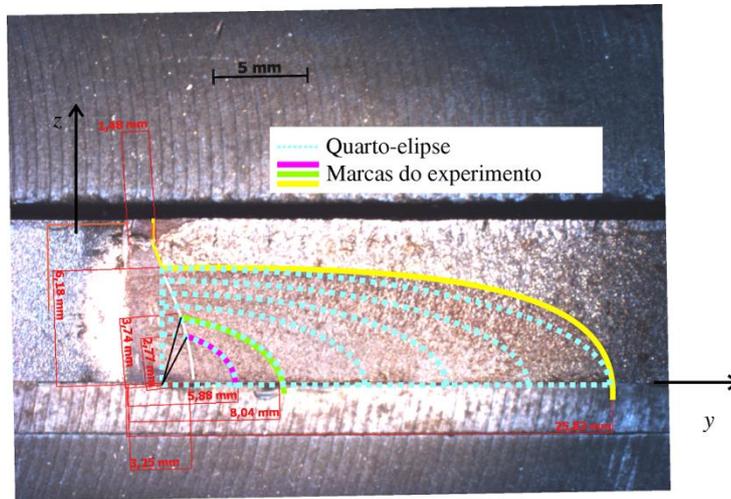


Figura 5.16 – Aproximação das frentes de trinca intermediárias entre Marca 02 e Marca 03 do CP01 por curvas quarto-elípticas concêntricas.

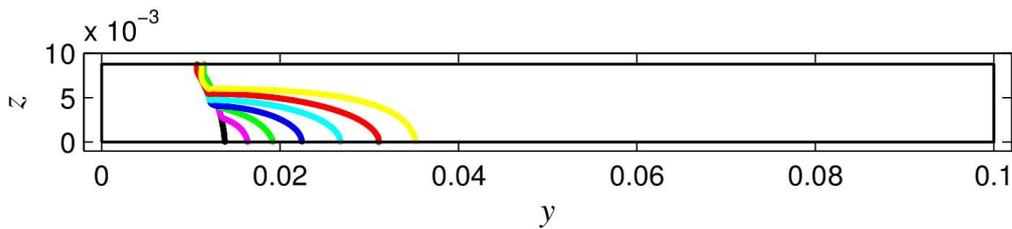


Figura 5.17 – Legenda usada nas frentes de trinca analisadas no FRANC3D.

Na Figura 5.18 são apresentadas as distribuições de $\Delta K_I / \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$ na frente da trinca para as geometrias de marcas experimentais e trinca quarto-elípticas concêntricas. A distribuição $\Delta K_I / \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$ na frente da trinca tende a valores máximos quando $\phi = 0$. Entretanto, para geometrias de trinca quarto-elípticas, $\Delta K_I / \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$ é aproximadamente constante ao longo de toda a frente da trinca com valores ligeiramente mais altos na região $0.2 \leq 2\phi/\pi \leq 0.6$, provocando incrementos de trincas maiores nesta região do que nas extremidades ($\phi = 0$ e $\phi = \pi/2$). Isto é decorrência da geometria de trinca inferior a geometria que esse carregamento de flexão ocasiona.

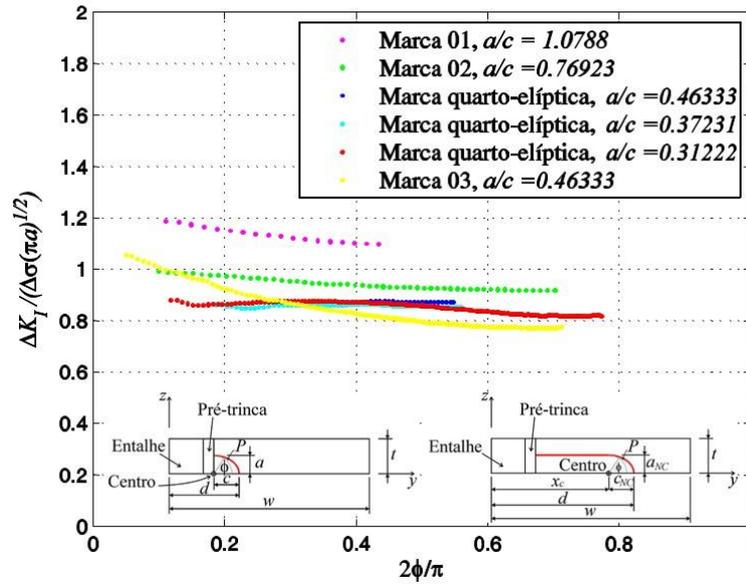


Figura 5.18 – Distribuição do FIT normalizado determinado no FRANC3D, usando geometrias obtidas no corpo-de-prova CP01 e geometrias simplificadas por curvas quarto-elípticas concêntricas.

Com esse resultado, pode-se observar a influência da geometria da frente da trinca na distribuição da função de geometria e, conseqüentemente, em ΔK_I . Caso sejam feitas algumas análises incrementais da trinca a partir dessa geometria quarto-elíptica concêntrica, com uma estimativa precisa de $da/dN - \Delta K$, a geometria da trinca deve se estabilizar em uma geometria que difere dessa aproximação de curva quarto-elipse concêntrica. Com a geometria estabilizada, pode-se obter claramente a tendência de crescimento da trinca por causa do carregamento aplicado, ao contrário de se ter uma distribuição de ΔK_I decorrente de má estimativa da geometria da trinca.