

6 Avaliação e Comparação dos Resultados com um Modelo Numérico

6.1. Introdução

Na Figura 6.1 se mostra um mosaico de 45 fotos tomadas com uma lente 5x (aumento de 50 vezes) no corpo de prova C2D-11. Foi feito o seguimento das marcas de praia principais de fadiga mostradas no capítulo 5 com o intuito de conhecer realmente como a transição da trinca bidimensional para unidimensional acontece. Perceba-se que para $a/t < 1$ a propagação é muito simétrica nos semi – eixos a e c , a taxa c/a aumenta vertiginosamente depois de $a=7$ mm as quarto – elipses são mais alongadas no semi – eixo c . Depois, para $a/t > 1$, na transição de trinca bidimensional para unidimensional, as linhas que chegam ao campo q propagam com uma taxa menor dc/dN enquanto a taxa dc'/dN controlado por $\Delta K_I(c')$ avança comprimentos maiores no mesmo numero de ciclos. Observe-se que o comprimento do campo de linhas de fadiga p percorrido pelas taxas de propagação dc'/dN são aproximadamente três vezes maior que o comprimento total percorrido por o campo de linhas de fadiga q percorrido por as taxa dc/dN .

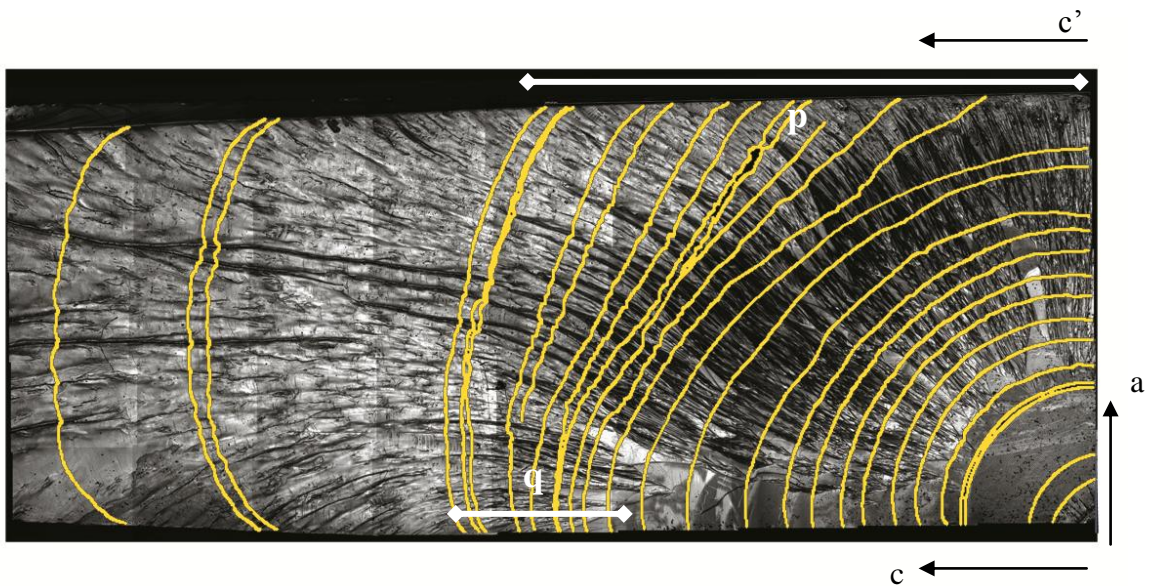


Figura 6.1– Mosaico de 45 fotografias, Transição trinca Bidimensional para Unidimensional, C2D-11, Lab. Materiais PUC-Rio

Observem-se no semi-eixo c os lugares onde a propagação é muito pequena, quer dizer nestes lugares aparentemente a taxa dc/dN é pequena enquanto dc'/dN aproveita de crescer mudando mais rapidamente na outra frente, no semi-eixo c' .

Esse tipo de aumento rápido de dc'/dN pode produzir instabilidade e até iniciar a fratura rápida.

6.2. Software para Simulação

Fatores de intensidade de tensão para trincas em corpos tridimensionais são muito difíceis de obter analiticamente, vários métodos numéricos são usados para determinar K . O método dos elementos finitos (FEM), método de elementos de contorno (BEM) e da função do peso são amplamente utilizados. O software FRANC3D desenvolvido pela Universidade de Cornell é usado no presente trabalho através da análise de elementos finitos para encontrar resultados dos diferentes fatores de intensidade de tensões ao longo da frente da trinca, desejamos avaliar diferentes estágios da propagação tanto para valores $a/t \leq 1$ quanto para $a/t > 1$ onde a transição de trinca bidimensional para unidimensional acontece, como foi mostrado nos exemplos do Capítulo 3.

O objetivo desta análise é conhecer como os valores dos fatores de intensidade de tensão $\Delta K_I(a)$, $\Delta K_I(c)$ e $\Delta K_I(c')$ mudam e principalmente comparar com os valores experimentais, sendo que $\Delta K_I(c')$ aumenta seu valor na transição da trinca bidimensional para unidimensional.

Efeitos ambientais e micro estruturais podem também ser significativos nestes avaliações dos fatores de intensidade, mas são consideradas parte da dispersão experimental, e não são considerados diretamente. Os testes foram projetados de tal forma que só o modo I de carga fosse aplicado, resultando em um crescimento de trinca planar. Porém o FRANC3D pode calcular automaticamente fatores em modo II e III, K_{II} e K_{III} respectivamente.

6.3. Modelagem Numérico da Transição Bidimensional para Unidimensional

O cálculo de fatores de intensidade de tensão $K_I(a), K_I(c)$ são conhecidos na literatura através de expressões analíticas para trincas de canto para $a/t \leq 1$. Como foi mencionado no Capítulo 3 alguns autores como Newman & Raju e Kobayashi mostram a validade da propagação mas com certos limitantes. Não entanto as expressões geradas por Castro & Meggiolaro ajudam a conhecer valores $K_I(a')$ tanto para o comprimento imaginário em a' quanto para $K_I(c)$ para $a/t > 1$ mas não para o $K_I(c')$. Tendo estas limitações de expressões e já que nosso objetivo é conhecer $K_I(c')$ que modifica seu valor na transição bidimensional para unidimensional, usamos o FRANC3D. Com o critério da profundidade imaginaria a' usamos os valores experimentais de c, c' e a para inserir diferentes tamanhos de trincas quarto - elípticas dentro de um modelo virtual com geometria igual ao dos corpos de prova C2D . Também são usadas as propriedades mecânicas do policarbonato, carregamento e restrições

Uma vez desenhado o modelo e malha com ajuda do pré-processador ABAQUS 6.9.3 ele é exportado ao FRANC3D, Figura 6.2, onde se insere uma trinca com uma determinada geometria, uma vez inserida a trinca, se procede a refazer uma nova malha de elementos finitos (FE) através de elementos de contorno. Finalmente são computados os fatores de intensidade de tensão ao longo da trinca. Para melhorar a visualização e manipulação de dados a informação gerada pelo FRANC3D pode ser mais uma vez exportada ao ABAQUS.

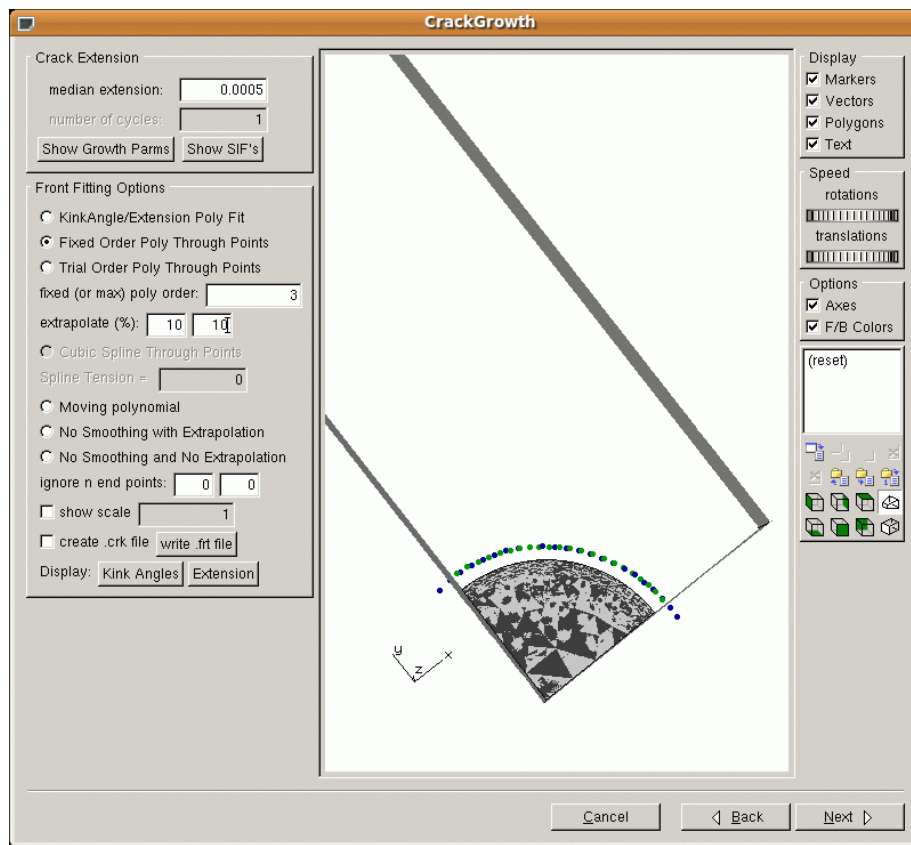


Figura 6.2– Ambiente FRANC3D para modelagem de trincas, Cornell University

A Figura 6.3 mostra a inserção da trinca virtual no FRANC3D com ajuda dos valores experimentais de comprimento c , a , c' , para trincas $a/t > 1$ foi usada uma profundidade imaginária a' a qual possibilita gerar uma interseção na face traseira do modelo simulando o comprimento c' , e, de esta maneira, calcular o fator de intensidade predominante $K_I(c')$ que controla esse ponto.

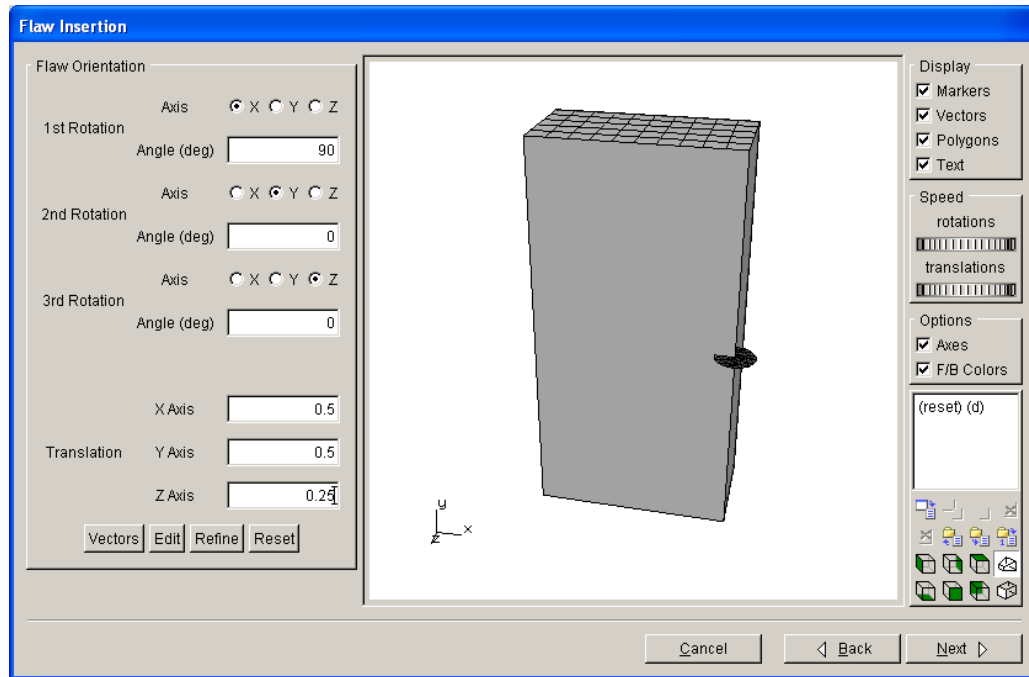
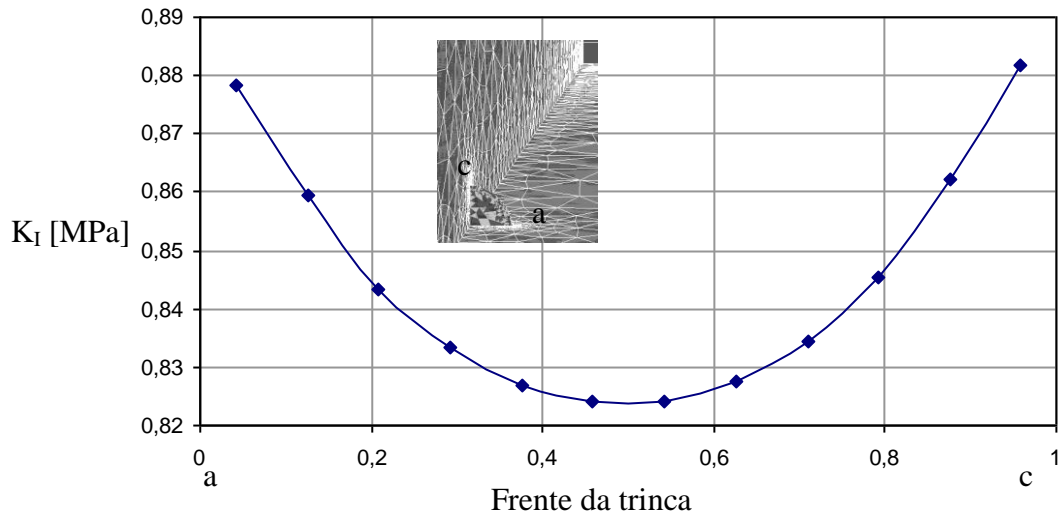


Figura 6.3– Inserção de trinca num modelo com uso do FRANC3D
(Gentileza Universidade de Cornell)

A Figura 6.4 mostra o início da propagação da trinca depois de a trinca ter alcançado um comprimento em $a = 2.49$ mm e $c = 2.5$ mm. Deve-se lembrar que os dados foram tomadas cada 0.5 mm. Os fatores nos extremos da curva mostram $\Delta K_I(a)$ na origem dos eixos e $\Delta K_I(c')$ ao final. Os valores entre 0 e 1 mostram uma diminuição do valor do K_I nos extremos da trinca até chegar um mínimo para depois subir de valor uma outra vez.



. Figura 6.4– Fator de intensidade de tensões ao longo da frente da trinca bidimensional, C2D-13, $a=2.49\text{mm}$, $c=2.5\text{mm}$, usando FRANC3D

A figura 6.5 mostra a simulação da trinca bidimensional para o mesmo estágio, observa-se as deformações, na trinca esta ao redor de $6.79\text{E}-04$ mm, os valores máximos das tensões na frente da trinca segundo o critério de Von Mises estão ao redor de 56 MPa e se localiza num extremo onde o $K_I(c)$ é máximo. Observe-se a zona plástica ao redor das pontas da trinca com a típica forma de borboleta.

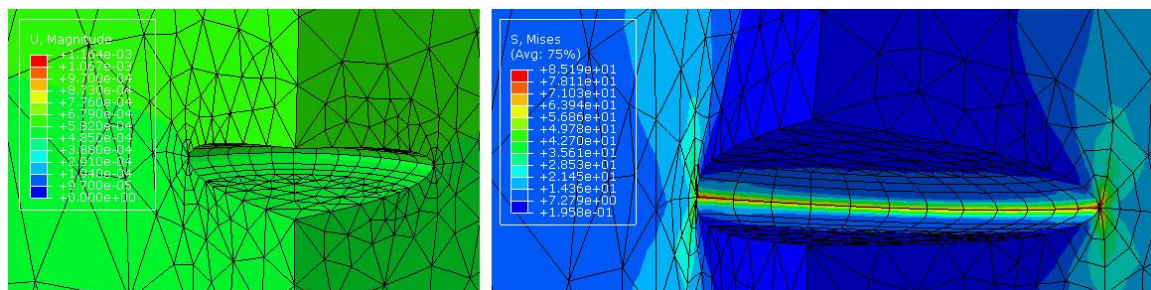


Figura 6.5– Deformações e Tensões de Mises ao redor da trinca bidimensional, C2D-13, $a=2.49\text{mm}$, $c=2.5\text{mm}$, $\sigma_{\max}=12.857$ MPa usando ABAQUS

A Figura 6.6 mostra a trinca bidimensional depois de ter alcançado um comprimento de $a=4.99\text{mm}$ e $c=5.1\text{mm}$, os K nos extremos da curva mostram que o $K_I(a)$ diminuiu de 0.878 MPa- $\text{m}^{1/2}$ para 0.79 MPa- $\text{m}^{1/2}$ enquanto $K_I(c)$ diminuiu de

0.883 MPa·m^{1/2} para 0.813 MPa·m^{1/2} devido a que houve uma diminuição do carregamento aplicado.

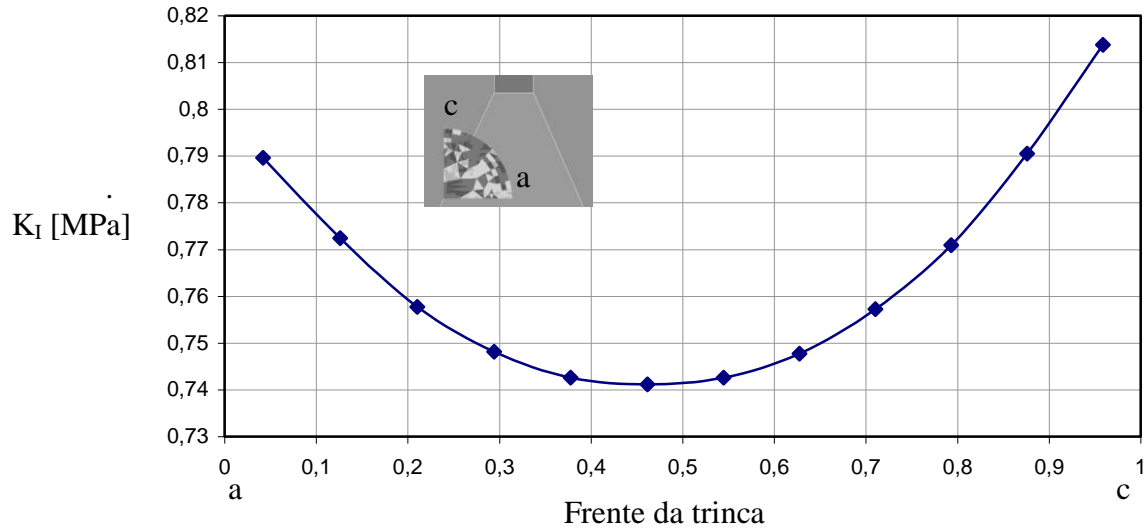


Figura 6.6– Fator de intensidade de tensões ao longo da frente da trinca ,C2D-13, a=4.99mm,c=5.1mm, $\sigma_{\max}= 7.592$ MPa, usando FRANC3D

A Figura 6.7 mostra a simulação da trinca bidimensional para o mesmo estágio, observa-se as deformações, na trinca esta ao redor de 4.653E-4 mm, os valores máximos das tensões na frente da trinca segundo o critério de Mises estão entre 37 MPa ao longo da frente da trinca e de 41 MPa nos extremos.

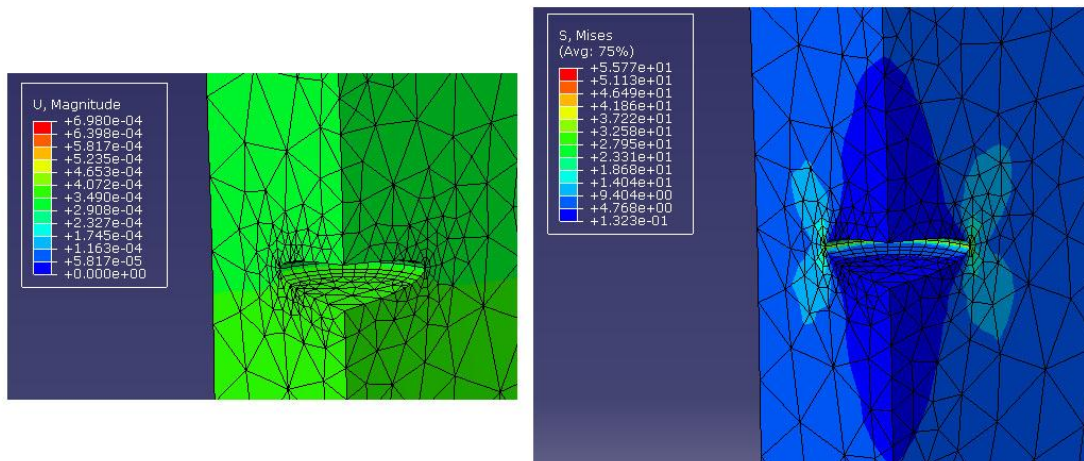


Figura 6.7– Deformações e Tensões de Mises ao redor da trinca bidimensional, C2D-13, a=4.99mm,c=5.1mm, $\sigma_{\max}= 7.592$ MPa, usando ABAQUS

A Figura 6.8 é o resultado substancial dos diferentes fatores de intensidade de tensão para os dados registrados experimentalmente na transição da trinca bidimensional para unidimensional, na figura também foi inserido o comportamento da trinca bidimensional em $a=10\text{mm}$, $c=10\text{mm}$ com a finalidade de comparar os subsequentes estágios. $K_I(c') > K_I(c)$ durante a transição bidimensional para unidimensional, $\Delta K_I(c')$ ajuda a dc'/dN se incrementar mais rapidamente que dc/dN mudando rapidamente algumas micras em cada ciclo de carga.

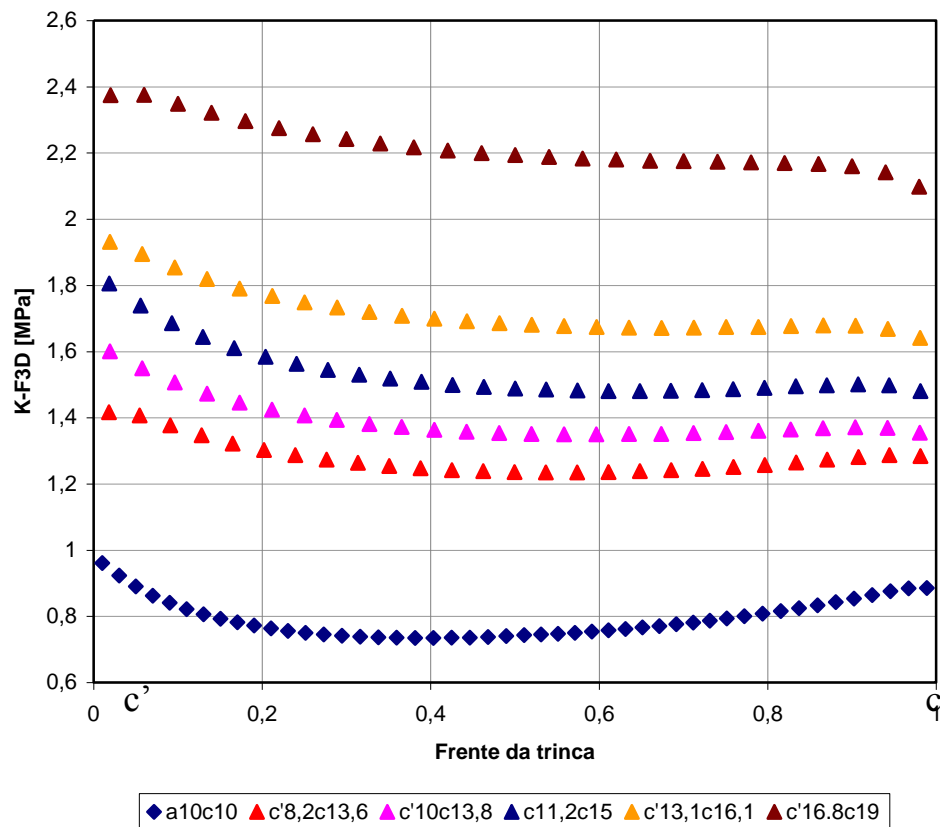


Figura 6.8– Fator de intensidade de tensões ao longo da frente da trinca na transição bidimensional para unidimensional, C2D-13, $\sigma_{\max} = 4.483 \text{ MPa}$, usando FRANC3D

A Figura 6.9 mostra o comportamento dos fatores $K_I(c)$, $K_I(a)$ e $K_I(c')$ segundo os valores obtidos com a modelagem versus os valores $K_I(c)$, $K_I(a)$ e $K_I(c')$ obtidos

experimentalmente. Note - se os valores de $K_I(a)$ e $K_I(c)$ são muito parecidos com $a/t < 1$ ($t = 10\text{mm}$). A partir desse ponto $K_I(c)$ diminui, porém e devido a que $K_I(c')$ começa a se propagar em $c'=0$ $K_I(c') > K_I(c)$. A partir daquele ponto a taxa dc'/dN começa a acelerar aumentando os deslocamentos no semi-eixo c' enquanto $K_I(c)$ aumenta pouco a pouco diminuindo seu avanço até que os dois extremos conseguem propagar com o mesmo K_I . O comportamento das curvas tanto da modelagem quanto a experimental não estão muito distantes, além do erro experimental e computacional podemos supor que o erro também se deve a que as trincas virtuais estão baseadas no conceito de profundidade imaginária a' . Também devemos considerar mesmo que estamos tomando como hipótese que as propriedades de fadiga do material servem totalmente para descrever a tanto a propagação bidimensional quanto a transição. A modelagem se aproxima bastante a realidade e ajuda a compreender a evolução dos fatores de intensidade de tensão que controlam a propagação 2D para 1D.

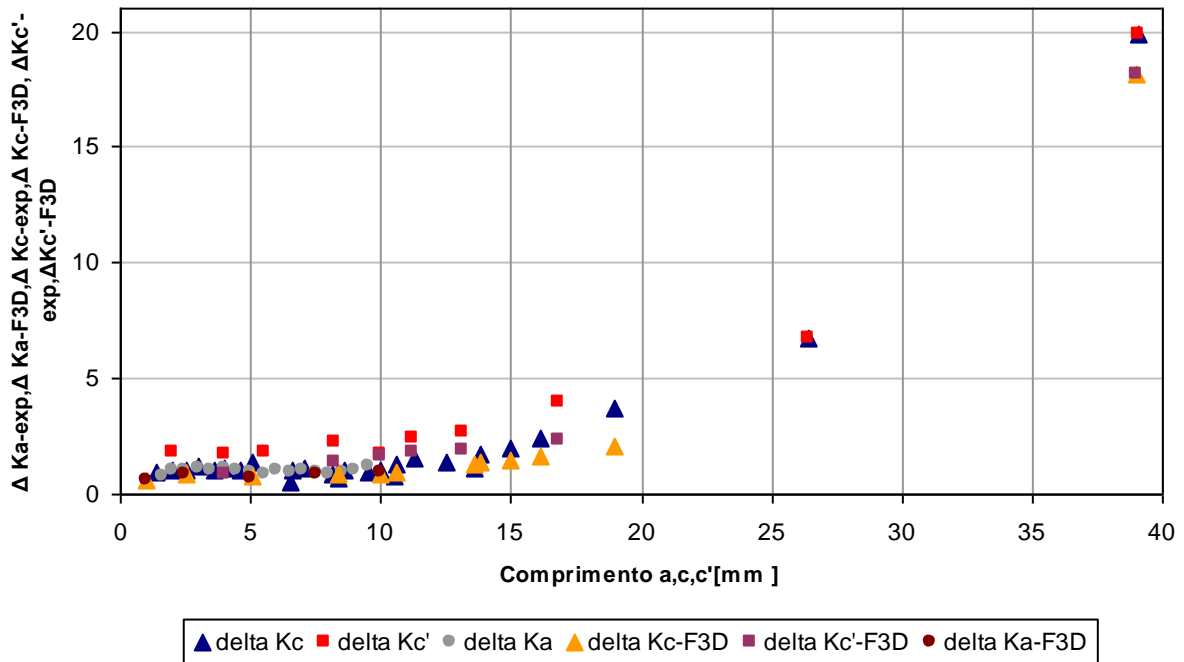


Figura 6.9– Fator de intensidade de tensões ao longo dos semi – eixos a, c e c' . Modelagem versus Experimental. Início, transição 2D para 1D, C2D-13

A Figura 6.10 mostra os dados obtidos da fractografia feita no corpo de prova C2D-13 para algumas marcas de praia, elas se ajustam perfeitamente a geometria mostrada no corpo de prova tanto no início da propagação bidimensional quanto ao longo da transição 2D para 1D, elas estão perfeitamente tabeladas e poderiam ser usadas como dados de entrada para calcular os fatores de intensidade de tensão das frentes da trinca num outro programa de simulação de trincas já que o FRANC3D não e capaz de gerar valores de fator de intensidade de tensão para trincas virtuais com tanta complexidade.

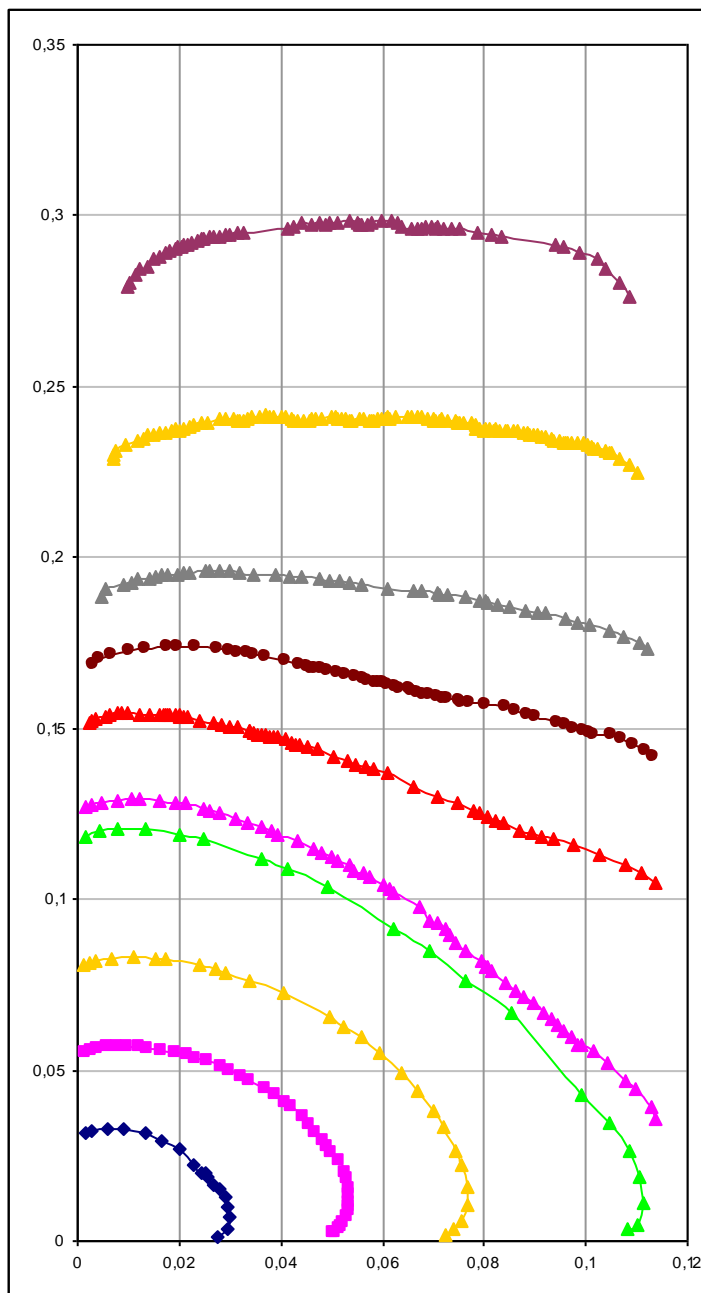


Figura 6.10– Dados tabelados baseados na fractografia do C2D-13