



**Simpósio de Métodos  
Numéricos em Engenharia**

**25 a 27 de outubro, 2017**

# *Modelagem Tridimensional do Ensaio de Tenacidade à Fratura com o Software Abaqus*

Dalton Riva de Paula  
PPGMNE

Universidade Federal de Paraná  
Curitiba, Brasil

Lucas Máximo Alves  
UEPG-PR

Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Ponta Grossa, Brasil

Luiz Alkimin de Lacerda  
PPGMNE

Institutos LACTEC  
Departamento de Engenharia Civil  
Universidade Federal de Paraná  
Curitiba, Brasil

**Resumo**—Este trabalho apresenta um breve relato sobre a teoria clássica da Mecânica da Fratura, a metodologia de modelagem 3D de um corpo de prova tipo (CT) e a simulação computacional do ensaio de tenacidade à fratura no software Abaqus, conforme Norma ASTM D5045-99. Ao fim mostra uma avaliação dos resultados obtidos na simulação com os dados da literatura e os analíticos.

**Palavras-chave**—Abaqus; Metodologia; Fratura; Avaliação;

## I. INTRODUÇÃO

Para melhorar o desempenho e a durabilidade de uma peça ou produto é vital ter um bom projeto, deve-se estudar a geometria e as propriedades do material desse objeto, pois as falhas nas peças está diretamente relacionada com a intensidade de tensão crítica do material. Isso faz que a disciplina da Mecânica de Fratura seja essencial para esse desenvolvimento.

Boa parte da teoria clássica da mecânica da fratura se desenvolveu no século 20, por ser uma disciplina recente tem muito a evoluir. Conhecer a história e seus personagens, faz ter uma melhor compreensão desta área tão importante para a engenharia.

Como alguns dos problemas de análise em fratura tem grande complexidade e uma grande ferramenta para solucionar esses problemas é a utilização de simulações computacionais em elementos finitos, onde a Mecânica da Fratura tem garantindo grandes progressos.

Entre muitos softwares de análises existentes no mercado, foi

escolhido o Software *Abaqus* para apresentar a metodologia de modelagem 3D, simulação do ensaio de fratura e avaliação dos resultados obtidos.

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1) *Mecânica da Fratura*: É a ciência que “*Estuda o aparecimento de falhas e defeitos e a sua influência sobre as propriedades mecânicas dos materiais.*” [4]. E conseqüentemente “*Este entendimento permite compreender as propriedades mecânicas dos materiais e os processos de dissipação de energia durante o crescimento e a propagação das trincas.*”. [4]

Griffith apud Alves, em 1920, observando o crescimento de trincas em cilindros de vidro, desenvolveu a teoria que estima a resistência teórica de sólidos frágeis e uma relação entre o tamanho do defeito com a resistência à fratura [3]. A resistência à fratura está relacionada com o **fator de intensidade de tensão**,  $K$ , onde esse é dividido em três modos fundamentais de solitação de carga ou de carregamento, o  $K_I$ : tração,  $K_{II}$ : cisalhamento e  $K_{III}$ : rasgamento, todos definidos pela Equação (1): [4]

$$K_{I,II,III} = Y\sigma\sqrt{\Pi a} \quad (1)$$

Onde :

$K$  – Intensidade de tensão

$Y$  – Função que relaciona o comprimento do corpo com a da trinca

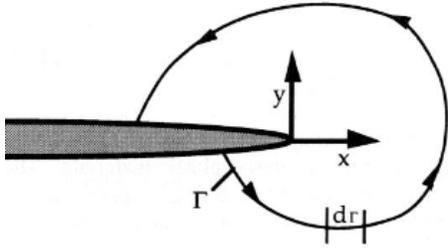


Figura 1: Contorno arbitrário em torno da ponta de uma trinca [8]

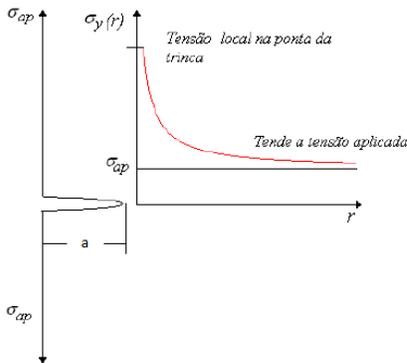


Figura 2: Perfil de tensão na ponta da trinca [4]

$\sigma$  – Tensão, carregamento por área  
 $a$  – Comprimento da trinca

Zener e Hollman apud Alves, 1944, relacionaram a fratura frágil de materiais metálicos, pois a teoria de Griffith em metais falhou. [3] Logo após Irwin propôs a “**taxa de energia elástica liberada**” ou “**força promotora do trincamento frágil**” que é a energia total absorvida durante a propagação da trinca, por aumento na unidade de comprimento e por unidade de espessura, conhecida com a propriedade  $G$  do material.

Irwin apud Alves, na década de 50, mostrou que existe uma equivalência entre energia do valor crítico de  $G_c$  e com intensidade de tensão crítica,  $K_c$ , momento em que o material rompe, conceito muito importante para a disciplina da Mecânica da Fratura Elástica Linear, MFEL [3].

Eshelby e Rice apud Alves introduziram o conceito Integral-J, uma extensão não-linear da taxa de energia elástica liberada,  $G$ . [4] “**No caso da MFEL, a integral J é numericamente igual a taxa de alívio G**” [7], portanto, se relaciona com  $K$ . [4]. A Integral-J é uma linha, ou contorno, que tem origem na face inferior da ponta da trinca e a contorna até a face superior como mostra a Figura 1. [8]

A taxa de alívio,  $G$ , também depende de algumas propriedades do material como o Módulo de Elasticidade: parâmetro que proporciona a medida de rigidez do material; Módulo Cisalhamento: parâmetro que relaciona uma força aplicada paralelamente a uma superfície,

com o deslizamento de planos paralelos uns em relação aos outros; Coeficiente de Poisson: parâmetro que relaciona a deformação transversal, em relação à direção longitudinal de aplicação da carga, de um material homogêneo [11]. A taxa de alívio  $G$  é regida pela Equação (2): [4]

$$G = \frac{(1 - \nu^2)}{E} \cdot (k_I^2 + k_{III}^2) + \frac{k_{III}^2}{2.C} \quad (2)$$

Onde :

$G$  – Taxa de alívio

$K$  – Intensidade de tensão

$C$  – Módulo de cisalhamento

$\nu$  – Coeficiente de Poisson - quando for tensão plana usar  $\nu = 0$

$E$  – Módulo de Elasticidade

Outro conceito importante é a distribuição das tensões na ponta da trinca que é mostrada na Figura 2, o “ $a$ ” representa o tamanho do defeito e “ $r$ ” a distância da ponta da trinca. Quando “ $r$ ” se aproxima de zero a tensão tende ao infinito, logo está linha de tensão apresenta uma singularidade próximo da ponta da trinca e não podendo ser calculada para  $r=0$ . [4]

Wells apud ALves, em 1961, constatou que os aços estruturais eram muito dúcteis para o uso da MFEL. A partir desta observação ele desenvolveu o conceito da Mecânica da Fratura Elasto-plástica, MFEP, disciplina que segue em desenvolvimento. [4]

2) **Ensaio de Tenacidade à Fratura:** A norma ASTM D5045-99 define métodos de ensaio para caracterizar o fator de intensidade de tensão  $K$  e a taxa de energia elástica liberada,  $G$ , na fratura. E disponibiliza duas geometrias de corpos de provas a de Flexão em três pontos, (SEB), e a compacto de tração, (CT) [1]. As dimensões do corpos de prova (CT) são mostradas na Figura 3.

O Ensaio de Tenacidade à Fratura consiste em aplicar cargas no centro dos furos, do corpo de prova (CT), em sentido opostas como são mostradas na Figura 3 ou uma carga com o outro furo fixado. Essas cargas geraram esforços que conseqüentemente causará uma fratura na ponta da fenda pré-existente, podendo assim medir qual é a tenacidade à Fratura,  $K$ , do material ensaiado. [1]

3) **Flexão composta:** Quando um força aplicada em um corpo for excêntrica, força estiver fora do centro geométrico do corpo, sua resultante das tensões normais pode ser decomposta em uma força normal e momentos fletores. Isso se denomina esforço de flexão composta, a sua tensão é regida pela Equação (3): [5]

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{N.d.e}{b^3.h} \quad (3)$$

Onde :

$\sigma$  – Tensão - Flexão composta

$N$  – Carga aplicada

$A$  – Área da seção transversal

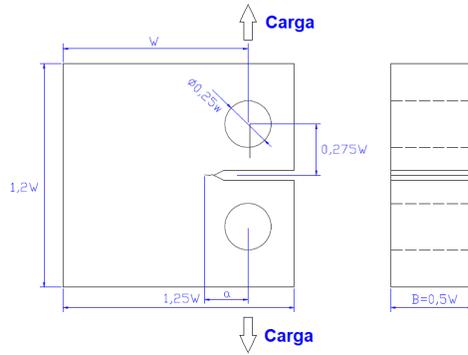


Figura 3: Corpo de prova (CT) e Disposições das cargas do Ensaio de Tenacidade à Fratura [7]

$d$  – Distância da carga até a linha neutra da seção transversal  
 $e$  – Distância ponto da tensão até linha neutra da seção transversal  
 $b$  – comprimento perpendicular ao eixo da linha neutra  
 $h$  – comprimento paralelo ao eixo da linha neutra

4) Erro relativo percentual: É comparação do resultado do valor aproximado com o seu valor de referência, pode-se determinar o erro relativo percentual pela Equação (4): [2]

$$Erro_{Apro-Ref} = \left| \frac{Valor_{Aproximado} - Valor_{Referencia}}{Valor_{Referencia}} \right| * 100 \quad (4)$$

5) *Abaqus/CAE 6.14-5*: *Abaqus/CAE* é um software usado para modelagem e análise de elementos finitos, com o objetivo de resolver problemas de engenharia simples e até sofisticadas com várias aplicações como: engenharia automotiva, vibrações dinâmicas, impacto/colisão, estática não-linear, térmicos, acústicos entre outros. É desenvolvido pela HKS Inc de Rhode Island, Estados Unidos, e agora comercializado como marca SIMULIA da Dassault Systemes S.A.. [12]

Um dos métodos de elementos finitos, FEM, utilizados pelo *Abaqus* é o "Método de elementos finitos estendidos" conhecido como XFEM. É uma técnica numérica baseada no método de elementos finitos generalizados e no método de partição de unidade. [12]

### III. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo apresentar a metodologia de modelagem 3D de um corpo de prova (CT) e simular computacionalmente um ensaio de tenacidade à fratura no software *Abaqus*, conforme a Norma ASTM D5045-99. E avaliar as características e os resultados obtidos na simulação do software *Abaqus*.

### IV. METODOLOGIA

A modelagem e simulação computacional seguiu o fluxograma, mostrado na Figura 4. Inicialmente foi feito a revisão todos os

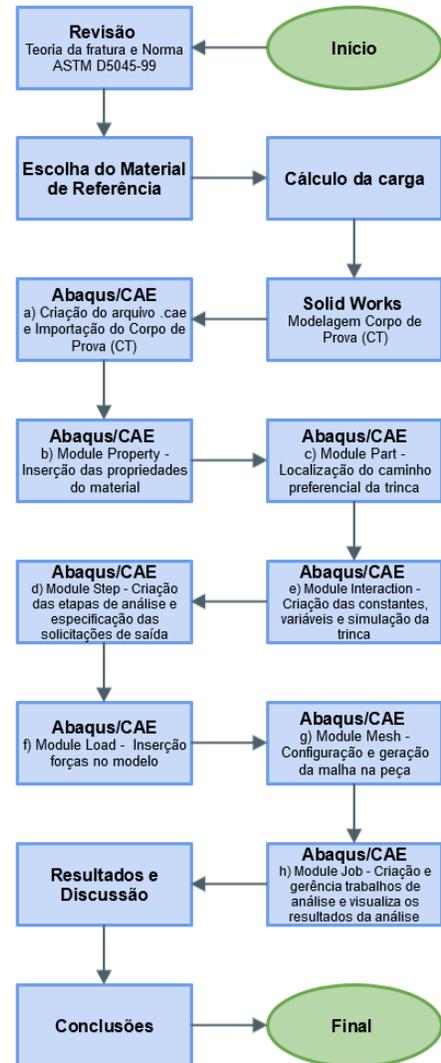


Figura 4: Fluxograma da simulação [Autor]

critérios e definições dispostos na Norma ASTM D5045-99, afim de modelar o Ensaio de Tenacidade à Fratura fosse o mais próximo da realidade. Como dimensões do corpo de prova, dados necessários como o material a ser testado e disposição e intensidade da carga do ensaio.

Com todos os dados e critérios definidos necessários para se realizar o ensaio, se iniciou a modelagem do corpo de prova tipo (CT) e a configuração da simulação computacional do Ensaio de Tenacidade à Fratura. As configurações e dados adotados utilizados para fazer a simulação são mostrados a seguir, as configurações que não constam nesse detalhamento são configurações padrão do software:

1) *Material de Referência*: O material escolhido para o corpo de prova para simular o Ensaio de Tenacidade à Fratura foi o Aço Maraging-350, suas propriedades foram retiradas do site AZOM

MATERIAL [10], propriedades foram: *Módulo de Elasticidade* =  $200000 \text{ N/mm}^2$ ; *Módulo de Cisalhamento* =  $70000 \text{ N/mm}^2$ ; *Coefficiente de Poisson* = 0,3. O  $K$  Crítico de  $55 \text{ N/mm}^{3/2}$  foi retirado do livro "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials" [6]

2) *Cálculo da Carga*: Para calcular a carga e analisar dos resultados obtidos na simulação adotou a referência da Intensidade de tensão  $K$  Crítico de  $55 \text{ N/mm}^{3/2}$  do Aço Maraging-350 denominando como  $K_{Ref.}$ . Para encontrar a carga para um tamanho de defeito de 26 mm no corpo de provas (CT), utilizou a Equação (1) - Intensidade de tensão, entrando com os dados:  $K_{Ref.} = 55 \text{ N/mm}^{3/2}$ ;  $Y$  para trinca de aresta = 1,12;  $a = 26 \text{ mm}$ . Resultou numa tensão  $\sigma = 5,4335 \text{ N/mm}^2$ . Para encontrar a carga aplicada no corpo de prova (CT) para provocar uma tensão  $\sigma = 5,4335 \text{ N/mm}^2$  na ponta da trinca, utilizou a Equação (3) – Flexão composta, utilizando os dados:  $\sigma = 5,4335 \text{ N/mm}^2$ ;  $A = 3700 \text{ mm}^2$ ;  $d = 63 \text{ mm}$ ;  $e = 34 \text{ mm}$ ;  $b = 74 \text{ mm}$ ;  $h = 50 \text{ mm}$ ; , resultou numa carga  $N = 3291,35 \text{ N}$ ;

3) *SOLIDWORKS*: Modelagem tridimensional do corpo de prova (CT).

Para a criação do modelo do corpo de prova foi utilizado o software *SOLIDWORKS* versão 2016 x64 Edition e seguindo a Norma ASTM D5045-99 foi criado uma peça em 3D do corpo de prova tipo (CT), adotado  $w=100 \text{ mm}$ ,  $a=25 \text{ mm}$  e salvando o arquivo do desenho em 3D com extensão IGS.

4) *Abaqus/CAE 6.14-5*: Metodologia utilizou a versão 6.14-5 do *Abaqus/CAE*, o programa é dividido em módulos, "module", a modelagem e configuração seguem os passos a seguir:

a) *Criação do arquivo.cae*: no *Abaqus/CAE* pelo caminho *File* –  $\rightarrow$  *New Model Database* e importação do arquivo criado no *SOLIDWORKS* do modelo 3D do corpo de prova(CT) com extensão IGS pelo caminho *File* –  $\rightarrow$  *Import* –  $\rightarrow$  *Sketch*.

b) *Module Part*: Cria e edita peças. Conforme o item 11.4.2 do manual do *Abaqus/CAE* [9], o software exige especificar a frente e a direção da extensão de trinca virtual com um plano, com o objetivo de localizar o caminho preferencial da trinca, então foi criado um plano de  $1 \times 50 \text{ mm}$ , retângulo de cor magenta mostrado na Figura 5, tornando o  $a = 26 \text{ mm}$ , pelo icone *Create Part*.

c) *Module Assembly*: Insere as peças na simulação através do icone *Create Instance*, foi inserido o corpo de de prova (CT) e o caminho preferencial da trinca.

d) *Module Property*: Define quais são as características dos materiais das peças a serem analisadas. Conforme o item 11.4.2 do manual do *Abaqus/CAE* para realizar o cálculo do  $J$ - integral o software precisa das propriedades do material e para o corpo de provas (CT) foi adotado as propriedades do Aço Maraging-350 usando o icone *Create Material*: *Young's Modulos* =  $200000 \text{ N/mm}^2$ ; *Poisson's Ratio*: 0,3; [10]; Adotados: *Max-Principal Strain*:  $120 \text{ N/mm}^2$ ; *Displacement at Failure* : 02, e pelo icone *Section Manager* adicionado o material na peça.

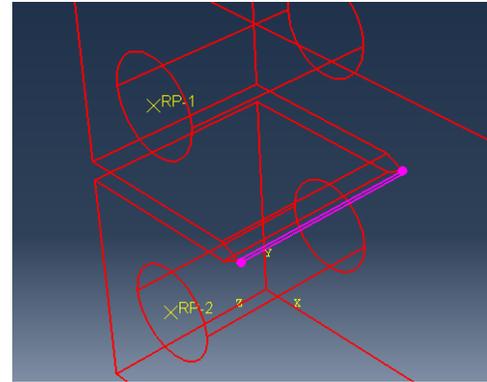


Figura 5: Plano preferencial da trinca [Autor]

e) *Module Step*: Cria etapas de análise e especifica solicitações de saída e controles de análise. Conforme o item 11.4.2 do manual do *Abaqus/CAE* [9], deve-se criar um *Step Static Geral*, icone *Create Step*, e configurar os passos de análise, como: tipo; incremento inicial, mínimo e máximo, as configurações adotadas foram: *Basic: Automatic stabilization* –  $\rightarrow$  *Specify dissipated energy fraction*; *Incrementation: Maximum number of incrementes*: 1000000; *Incremente size: initial*: 0.02; *minimum*:  $1E - 009$ ; *Maximum*: 1;

Conforme o item 4.12.1 do manual do *Abaqus/CAE* [9]. deve-se criar solicitações de saída de campo e histórico usando as icone *History Output Manager* localizado na caixa de ferramentas do módulo. Suas configurações adotados foram: *nome*: *H – Output – 1* com *Domain*: *whole model* e habilitar *Failre/Fracture*: *PHILSM*, *Leve set value phi*; *PSILM*, *Level set value psi* e em *State/Field/User/Time*: *STATUS*, *Status (some failure and plasticity models, VUMAT)*; *STATUSXFEM*, *Status of xfem elemento*;

Conforme o item 4.12.1 do manual do *Abaqus/CAE* os blocos do MEF são definidos por contornos, cada contorno é um anel de elementos que circundam completamente a ponta da trinca ou os pontos ao longo de uma face de uma fenda. Estes anéis de elementos são definidos de forma recursiva para cercar todos os contornos anteriores.

O *Abaqus/CAE* encontra automaticamente os elementos que formam cada anel das regiões. Cada contorno fornece uma avaliação da integral do contorno, sendo que o número desses anéis de elementos são o número de avaliações possíveis. [9] Deve-se especificar o número de contornos a serem usados no cálculo de integrais de contorno e a configuração adotada foi: *Nome* : *H – Output – 2* com *Domain*: *Crack*, configurar: *Number of contours*: 8 *Type*: *Stress Intensity critrio* –  $\rightarrow$  *Maximum energy release rate*;

f) *Module Interaction*: Cria constantes, variáveis e simulações. Para simulação vai ser criado duas constantes pelo icone *Create Constraint* que vão auxiliar a simulação do ensaio:

A primeira constante vai representar o eixo que seria fixado

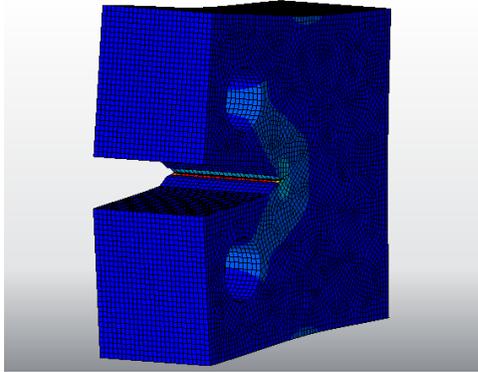


Figura 6: Resultado da simulação do Corpo de Prova no Abaqus [Autor]

no furo superior, onde será aplicado a carga, ficando com as configurações: *Nome: RP – 1*; Constante *type: Coupling* em relação ao furo superior, com restrição dos deslocamentos em  $U1$ ,  $U3$ ,  $UR1$ ,  $UR2$ , mostrado na Figura 5.

A segunda constante vai representar o eixo que seria fixado no furo inferior, eixo sem deslocamentos, ficando com as configurações: *nome: RP – 2*; Constante *type: Coupling* em relação ao furo inferior, com restrições de deslocamentos em  $U1$ ,  $U2$ ,  $U3$ ,  $UR1$ ,  $UR2$ , mostrado na Figura 5.

Simulação da trinca é criada através do caminho "*Mena – > Special – > Crack – > Create*" e sua configuração é: nome *CRACK*; *Type: XFEM* e desabilitar a opção *Allow crack growt*.

g) *Module Load*: Insere forças e pressões nos modelos. FORÇA CONCENTRADA aplicada no eixo superior, RP-1, foi criada pelo ícone *Create – Load* com uma força de 3291,35 N em CF2.

h) *Module Mesh*: Configura e gera as malhas nas peças. Com o *Object*: setado no *Part* e usando o ícone *Seed Part* para configurar as dimensões dos elementos, foi configurado o tamanho de 2 mm no *Approximate global size: 2*. O *Abaqus/CAE* gera a malha automaticamente pelo ícone *Mesh Part*. O formato padrão dos Elementos são quadrilaterais.

i) *Module Job*: Pelo ícone *Job Manager* cria e gerencia os trabalhos de análise e visualiza os resultados da análise.

## V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Software *Abaqus* tem seu menu um pouco extenso em virtude das muitas aplicações disponíveis, mas é organizado e a sequência da modelagem é lógica. O processamento de dados da análise dependem de uma boa capacidade de processamento do processador do computador e é diretamente proporcional a quantidades de pontos na malha, pois quantos mais pontos mais cálculos devem ser executados pelo computador.

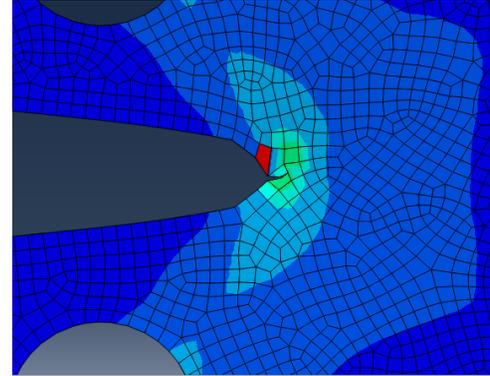


Figura 7: Perfil do Corpo de Prova [Autor]

Os Resultados da análise do software, devem ser habilitados conforme descrito na metodologia, veem em estado bruto e em relação ao tempo ou passos definidos no “module Step”. Os dados resultantes saem nas unidades que foram introduzidas no modelo.

O tipo da simulação “Static Geral” e com a opção desabilitada da “com propagação de trinca”, em inglês “Allow crack growt”, o software só analisa o material no estado elástico linear e não resultando na tensão de fratura do material,  $\sigma_f$ . Com a opção “com propagação de trinca” habilitada o software não forneceu ou não foi encontrado os  $K_{I,II,III}$  e  $J$ , impossibilitando encontrar a curva  $J$ .

Os resultados para analisar foram os das faixas XFEMs 13 e 14 das 28 faixas da malha, na Figura 6 pode ver a distribuição da malha, elas foram selecionadas por estarem no meio da peça e conseqüentemente tiveram os mesmo valores. A simulação descrita nesse artigo, adotou 8 “contours” para os  $K_{I,II,III}$  e  $J$ , como definido no “module Step”. Na Tabela I é mostrado todos os  $K_{I,II,III}$  e  $J$  resultados da simulação e localizadas nos pontos na área vermelha vista na Figura 6.

Para analisar os resultados obtidos utilizou a referência  $K_{Ref}$ . Crítico de  $55 \text{ N/mm}^{3/2}$  do Aço Maraging-350 [10], foi o valor de referência para calcular o erros dos  $K_I$  pela Equação (4), são mostrados na Tabela II.

Considerando que no cálculo analítico não houve deslocamentos e somente houve tração e utilizando o valor de referência de  $K_{Ref} = 55 \text{ N/mm}^{3/2}$ , pode-se calcular o  $J_{Ref}$ . teórico com a Equação (4) do  $G$ , pois “*No caso da MFEL, a integral J é numericamente igual a taxa de alívio G*” [7]. Com o valor do o  $J_{Ref}$ . pode-se calcular o erro do  $J$  encontrado na simulação pela Equação (2), esses erros também são mostrados na Tabela II.

Observa-se que os valores dos contornos 1 e 2 são destoantes dos demais contornos. O próprio manual do *Abaqus* adverte sobre a imprecisão dos primeiros contorno, recomendando no item 4.12.1 que se deve ignorar o primeiro e o segundo contornos por imprecisão. [9]

O erro da intensidade de tensão  $K_I$  com referência no  $K_{Ref}$ . ficou

Tabela I: Resultados obtidos da simulação nas Faixas XFEM 13 e 14 com uma carga de 3291,35N. [Autor]

Contours	1	2	3	4	5	6	7	8
$K_I$	80.44	58.36	45.02	43.21	39.91	41.24	43.20	49.29
$K_{II}$	-1.756	5.511	4.590	-10.50	10.32	10.06	18.10	25.02
$K_{III}$	1.33E-3	1.45E-2	1.21E-2	-4.71E-2	7.87E-4	1.77E-2	1.61E-2	3.78E-3
$J$	2.94E-2	1.56E-2	9.31E-3	8.99E-3	7.73E-3	8.19E-3	9.98E-3	1.39E-2
$K_{I,II,III} = (N/mm^{3/2}); J = (mmN/mm^2)$								

Tabela II: Cálculo do erro dos resultados obtidos na simulação com os valores de referência [Autor]

Contours	1	2	3	4	5	6	7	8
$K_I$	80.44	58.36	45.02	43.21	39.91	41.24	43.20	49.29
$K_{Ref.}$	55							
Erro (%)	46,25	6,11	-18,15	-21,44	-27,44	-25,09	-21,45	-10,38
$J$	2.94E-2	1.56E-2	9.31E-3	8.99E-3	7.73E-3	8.19E-3	9.98E-3	1.39E-2
$J_{Ref.}$	1,51E-02							
Erro (%)	95,24	3,36	-38,39	-40,56	-48,88	-45,79	-34,00	-8,09
$K_{I,Ref.} = (N/mm^{3/2}); J = (mmN/mm^2)$								

entre 10 até 28 % e a taxa de alívio  $J$  com referência no  $J_{Ref.}$  ficou entre 8 até 50 %. Esses erros podem ter ocorrido porque no cálculo analítico da carga considerou apenas tração sem deslocamentos enquanto na simulação considerou pequenos deslocamentos como é mostrado a peça deformada na Figura 6. Essa deformação além de gerar tração,  $K_I$ , também gerou cisalhamento,  $K_{II}$ , e rasgamento,  $K_{III}$ . Com tração, cisalhamento e rasgamento distribuiu a energia da carga aplicada e os deslocamentos também mudou os momentos, isso tudo interferiu na distribuição da intensidade de tensão que ficou diferente da considerada no cálculo analítico da carga.

## VI. CONCLUSÕES

Verificando os resultados da simulação, mostrado na Tabela I e I, observa-se que O erro da intensidade de tensão  $K_I$  com referência no  $K_{Ref.}$  ficou entre 10 até 28 % e a taxa de alívio  $J$  com referência no  $J_{Ref.}$  ficou entre 8 até 50 %. Algumas hipóteses que ter gerado esse erro são:

Ao calcular a carga para atingir o  $K_{Ref.}$  não se considerou deslocamentos e quando essa a mesma carga foi aplicada na simulação do *Abaqus* foi considerado os deslocamentos, mudando os momentos e distribuições de energia dentro da peça.

A singularidade na ponta da trinca gera distorções, o próprio manual recomenda desconsiderar os primeiros dois contornos por imprecisão.

Critério para geração dos contornos, como o *Abaqus* é um software privado e tem seus códigos fechado, não se sabe ao certo quais são

os cálculos e critérios são utilizados na sua simulação, isso deixa obscuro seu funcionamento. Não podendo ser avaliados cálculos.

Por final, conclui-se que para fazer simulações no *Abaqus* precisa ter um bom conhecimento do software e em elementos finitos, pois caso a modelagem do problema não seja similar ao problema real ou haja um erro na configuração do software, isso consequentemente gerará distorção no resultado da simulação.

## REFERÊNCIAS

- [1] ASTM - American Society for Testing and Materials, *ASTM D5045-99 Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials*, Pensilvânia, EUA, 2007
- [2] C. H. DE BRITO CRUZ and H. L. FRAQNITO, *Guia para Física Experimental Caderno de Laboratório, Gráficos e Erros Instituto de Física*, Campinas, Unicamp 1997
- [3] Alves, L. M., *Apostila de Fundamentos matemáticos da teoria elastostática clássica do crescimento estável (ou quase-estático) - mecânica da fratura elástica linear para o caminho liso*, Curitiba.
- [4] Alves, L. M., *Apostila de Fundamentos matemáticos da teoria elastostática clássica do crescimento estável (ou quase-estático) - mecânica da fratura elástica linear clássica para os materiais frágeis mecânica da fratura elástica linear para o caminho liso*, Curitiba.
- [5] Argenta, M. A., *Notas de Aula - Resistência dos Materiais I*, UFPR, Curitiba, 2012.
- [6] Herzberg, R. W., *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 3 ed., Wiley, 1989.
- [7] MEDINA, J. A. HINOSTROZA, *Avaliação de Previsões de Fratura Elastoplástica* Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2014.
- [8] Miranda, A. C. de O., *Propagação de Trincas por Fadiga em Geometrias 2D Complexas sob Cargas Cíclicas Variáveis* Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Área de Concentração: Estruturas., Rio de Janeiro, 2013.
- [9] Abaqus 6.12, *Abaqus/CAE User's Manual* Disponível em: <http://abaqusdoc.ualgarcy.ca/books/usb/default.htm?startat=pt04ch11s04aus66.html>, Acesso em: 11 JUN. 2017.
- [10] AZOM MATERIAL, *Maraging 350 Alloy Steel (UNS S35000)* Disponível em: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6735>, Acesso em: 11 JUN. 2017.
- [11] ATCP, *ATCP, Engenharia Física*. Disponível em: <http://www.atcp.com.br/pt/produtos/caracterizacao-materiais/propriedades-materiais/modulos-elasticos/definicoes.html>, Acesso em: 08 AGOS. 2017.
- [12] DASSAULT SYSTEMES, *Abaqus Unified FEA, Complete solutions for realistic simulation*. Disponível em: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>, Acesso em: 11 JUN. 2017.