

# CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES AO REDOR DE ORIFÍCIOS USANDO O ABAQUS 6.12 STUDENT EDITION

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA:

Quando um corpo elástico que está submetido a um regime de tensões possuir em sua geometria um ponto de irregularidade ou uma mudança brusca, como, por exemplo, um orifício ou um entalhe, aparecerá em sua vizinhança uma variação localizada do regime de tensões. Os níveis das tensões de pico podem ser diversas vezes maiores do que a tensão nominal que ocorreria no corpo caso não houvesse esta irregularidade. A este aumento das tensões causado pela irregularidade da geometria denomina-se concentração de tensões. Podem-se citar algumas referências clássicas de tal assunto é discutido:

- Peterson, R. E. Stress Concentration Factors in Design, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1953;
- Savin, G. N. Stress Concentration Around Holes, Pergamon Press, New York, 1961;

Conta-se hoje com uma ferramenta de otimização da forma para minimizar estes picos de tensões. O uso desta ferramenta não é o objetivo deste curso introdutório.

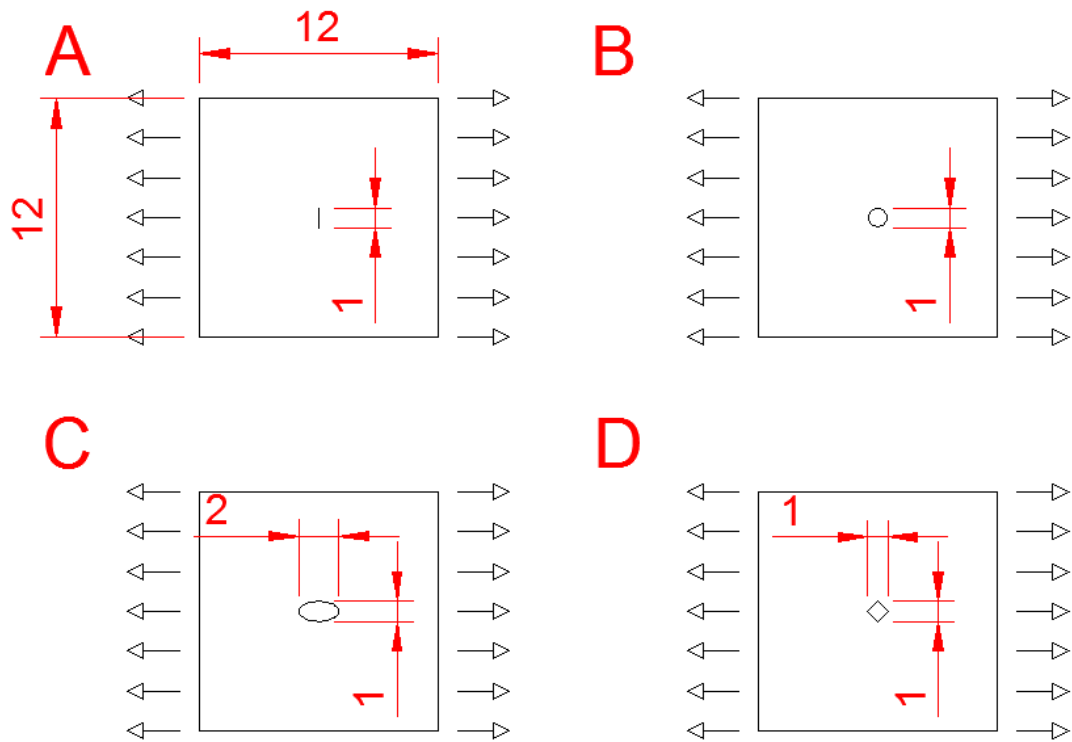


Figura 1 – Esquema das placas a serem analisadas.

É importante se discutir também a estimativa da precisão das soluções aproximadas obtidas numericamente via MEF. Na utilização de cada elemento na Biblioteca de Elementos resulta extremamente importante conhecer o grau de precisão alcançada pela solução, em problemas com resultado conhecido, realizando-se também um estudo da convergência, utilizando-se diversas malhas e subdivisões. Visando a discussão destes dois assuntos propostos, inicia-se o estudo pela análise de uma placa esbelta, quadrada, submetida a um regime de tensões uniformes em uma das direções. A seguir, simular-se-á uma pequena fissura central perpendicular à direção das tensões uniformes, percebendo-se assim a perturbação que ocorre. O estudo da evolução das fissuras pode ser realizado com o auxílio da Mecânica da Fratura, não sendo o seu uso, objetivo de um curso introdutório. Na sequência estudam-se diversas formas de orifícios, analisando-se em especial a perturbação introduzida no regime de tensões da placa, ou seja, a concentração de tensões em torno dos diversos orifícios. Por se conhecer a solução exata de algumas destas soluções, pode-se discutir a convergência das soluções para o estudo de diversas malhas e elementos. A figura 1 mostra um esquema de diversas placas a serem analisadas.

### A) Placa submetida a um regime uniforme de tensões:

Se a solução exata é um campo de tensões uniforme, a solução obtida por Elementos Finitos coincidirá com a solução exata, qualquer que seja a malha. No caso da placa esquematizada na figura 1 (a), ou seja, uma placa fina quadrada e de espessura constante, composta por um material cujo Módulo de Elasticidade  $E = 3E10$  Pa, Coeficiente de Poisson  $\nu = 0.3$ , submetida a um carregamento uniforme em um dos bordos, porém sem considerar a fissura na região central, a solução é um regime uniforme de tensões.

$$\sigma_x = 2000 \text{ Pa};$$

$$\sigma_y = 0;$$

$$\tau_{xy} = 0.$$

### B) Placa submetida ao caso do furo em elipse:

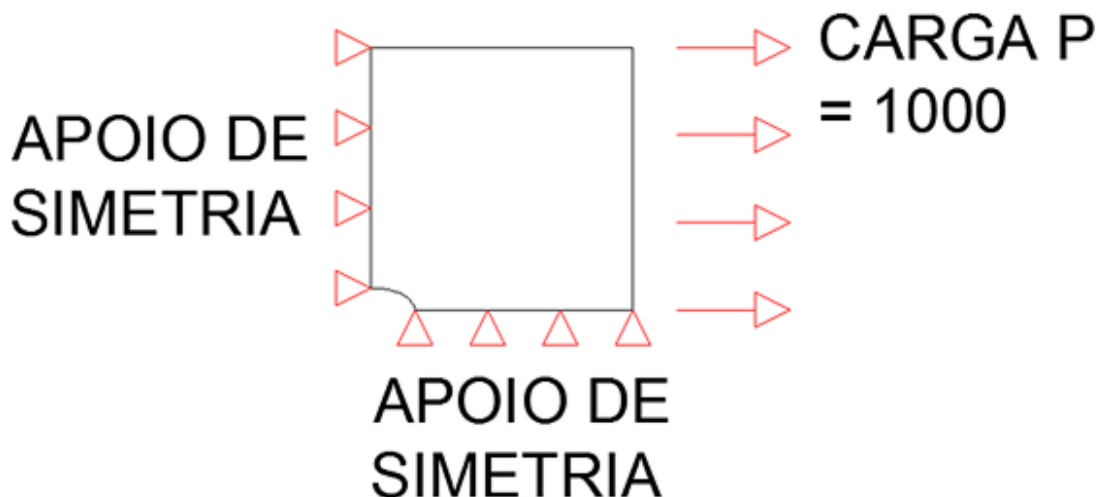


Figura 2 – Esquema de  $\frac{1}{4}$  da placa com a fissura.

Ao se introduzir uma pequena fissura ou furo na placa, como descrita no item anterior, uma grande perturbação aparecerá no campo de tensões e na região próxima a fissura ou furo aparecerá uma concentração de tensões. Visando avaliá-la, gera-se um modelo de elementos finitos, que devido à consideração de simetria, poderá conter apenas um quarto da placa, conforme o esquema apresentado na figura 2, desde que se apliquem as condições cinemáticas de contorno apropriadas nesta simulação.

## 1.2. PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E DO MATERIAL

Modelo bidimensional utilizando o estado plano de tensões

Módulo de Elasticidade longitudinal ou de Young:  $E_x = 3E10 \text{ Pa}$ .

Coefficiente de Poisson = 0.3

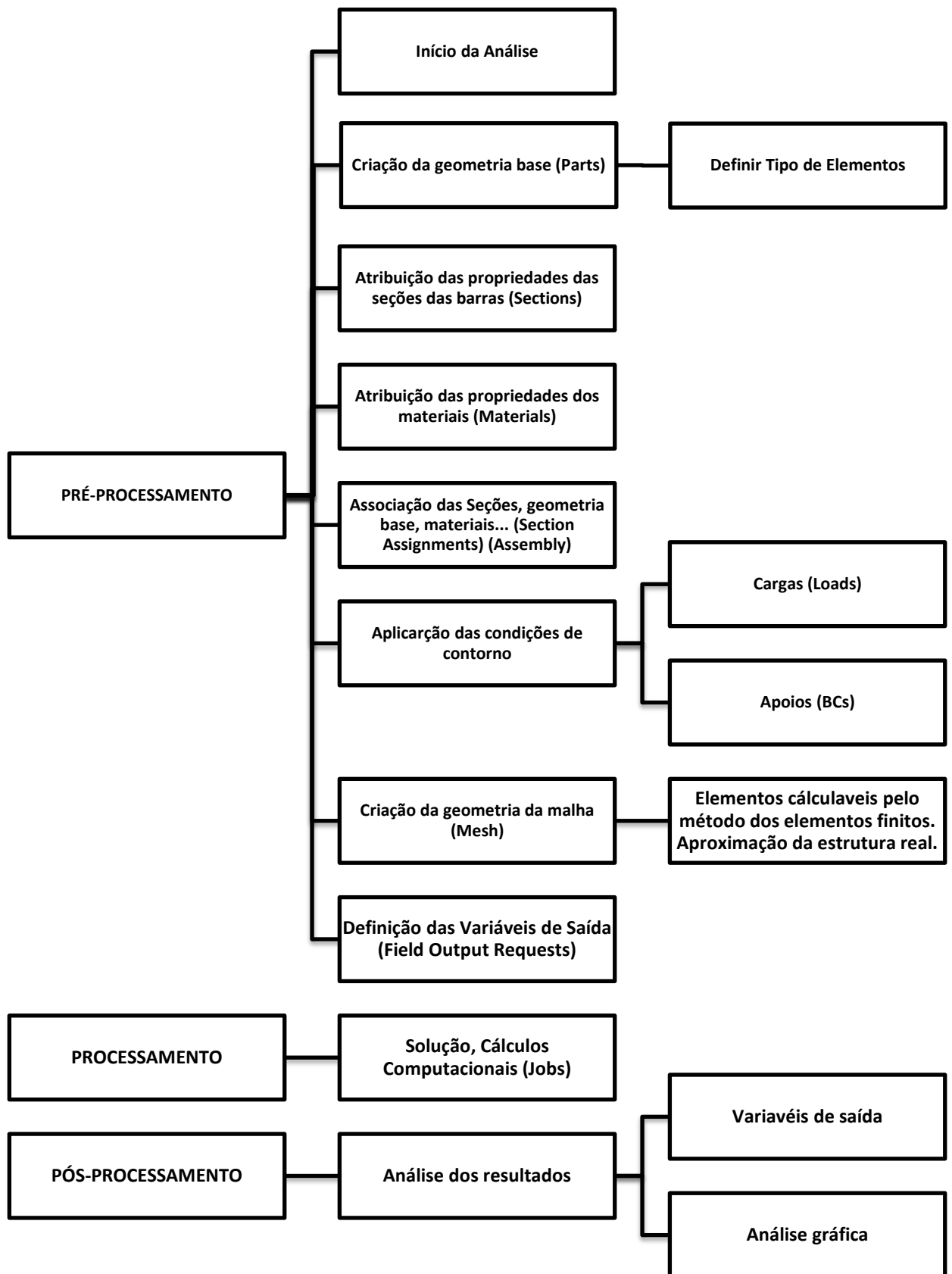
Espessura: 0.5 m

### 1.3. CARGA

Pressão  $P = -2000 \text{ Pa}$

## 2. RESOLUÇÃO

O procedimento de resolução pode ser demonstrado no seguinte fluxograma (a ordem pode eventualmente ser quebrada em pontos específicos por conveniência):

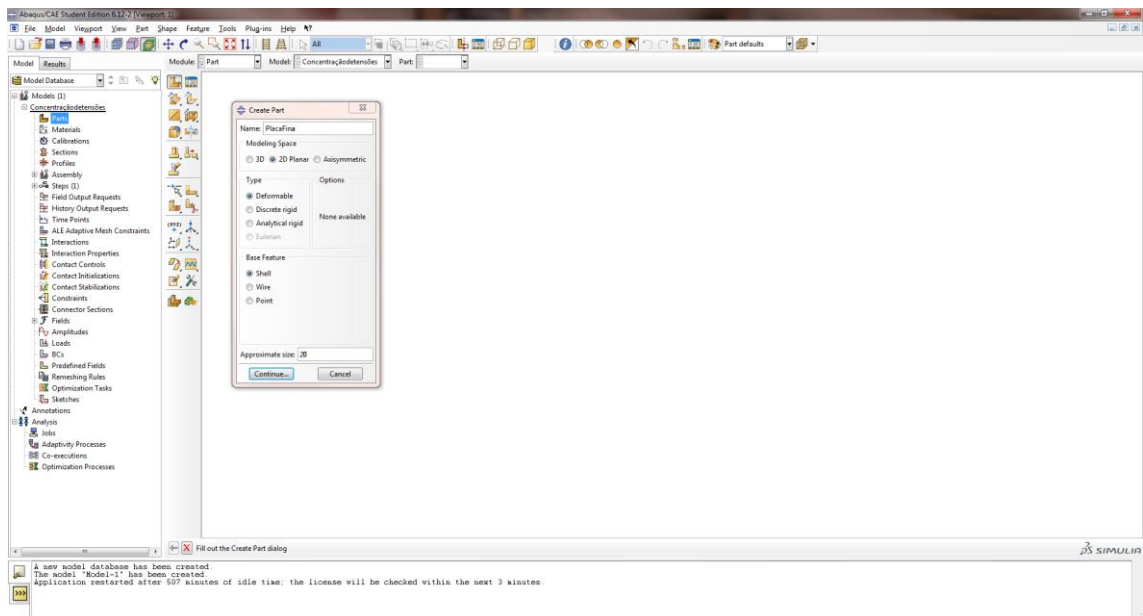


## 2.1. INÍCIO DA ANÁLISE

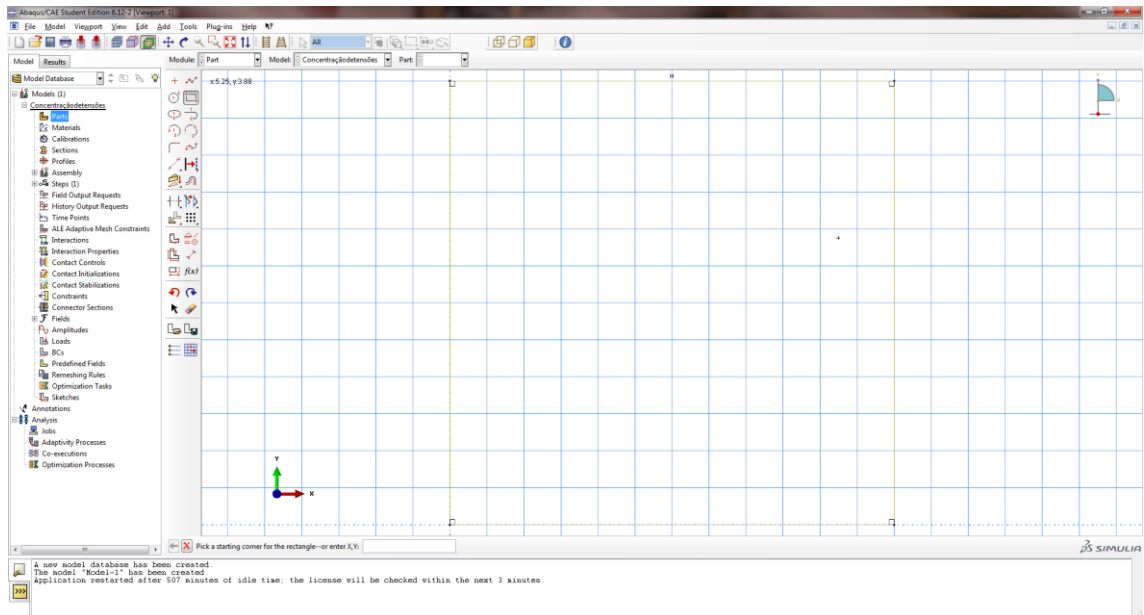
- ✓ Se você ainda não iniciou o programa **Abaqus/CAE**, **digite** *cmd* no **Menu Iniciar** para abrir o **Prompt de Comando** e nele **digite** *abq6122se cae* para executar o Abaqus.
- ✓ Em **Create Model Database** na caixa **Start Session** que aparece, **selecione** **With Standard/Explicit Model**.

## 2.2. PRÉ-PROCESSAMENTO

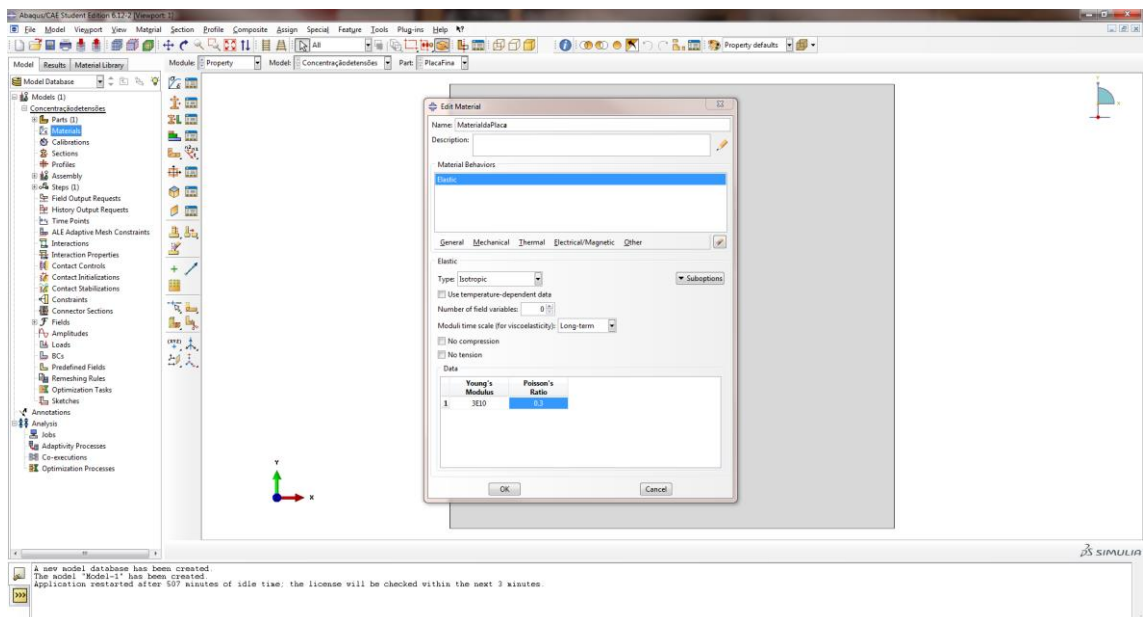
- ✓ No menu **Model** à esquerda, **clique** com o botão direito em **Model-1** e **selecione** **Rename**. **Digite** **Concentraçãodetensões**.
- ✓ No menu **Model** à esquerda, **dê** duplo clique em **Parts**, no campo **Name** **digite** **PlacaFina**, e **selecione** as opções: **2D**, **Deformable**, **Shell**, **Planar**. Em **approximate size** **digite** **20**. **Clique** em **Continue...**



- ✓ **Clique** em **Create Lines: Rectangle (4 lines)** na caixa de ferramentas e **insira** as seguintes coordenadas 0,0 – 6,6. Em seguida, **desative** a função **Create Lines: Rectangle (4 lines)** e **clique** em **Done**.

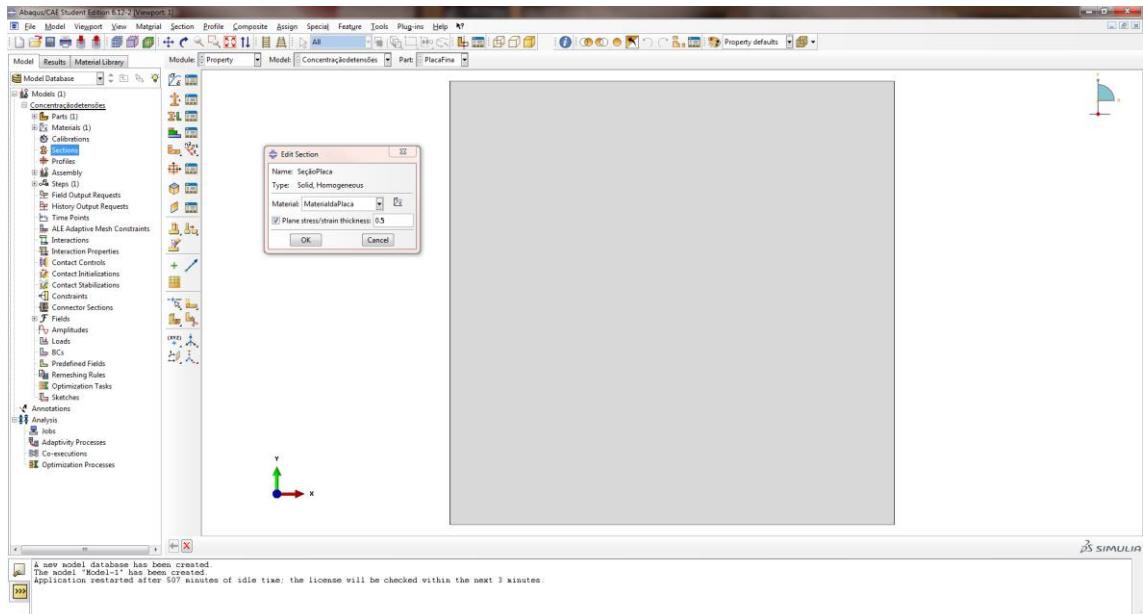


- ✓ No menu **Model** à esquerda, dê duplo clique em **Materials**. Na janela **Edit Material** **Renomeie** o material para **MaterialdaPlaca**, **selecione** **Mechanical>Elasticity>Elastic** e **digite** **3E10** em **Young's Modulus** e **0.3** em **Poisson's Ratio**. **Clique** em **OK**.

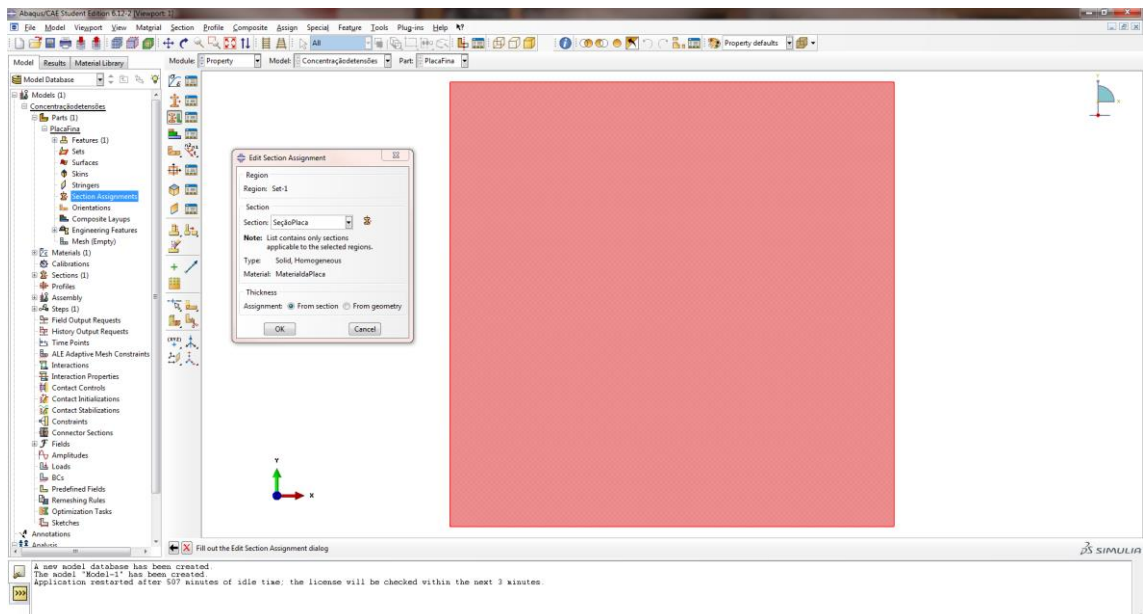


- ✓ No menu **Model** à esquerda, dê duplo clique em **Sections**. No campo **Name**: **digite** **SeçãoPlaca**, em **Category** **selecione** **Solid**, e em **Type** **selecione** **Homogeneous**. **Clique** em **Continue...** Na janela **Edit Section**, **Marque** **Plane Stress/strain thickness:** e **digite** **0.5**.

**Certifique-se** que **MaterialdaPlaca** está selecionado em **Material**: e **clique** em **OK**.

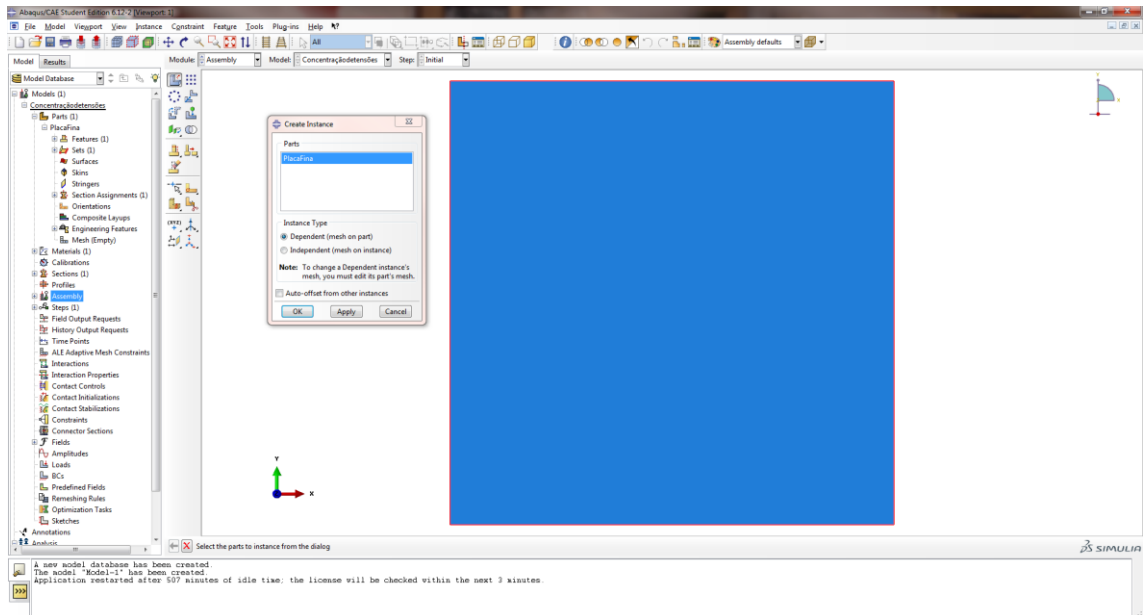


✓ No menu **Model** à esquerda, **abra** **Parts>PlacaFina** e **dê** duplo clique em **Section Assignments**. **Selecione** a placa e **clique** em **Done**. **Selecione** **SeçãoPlaca** e **clique** em **OK**.

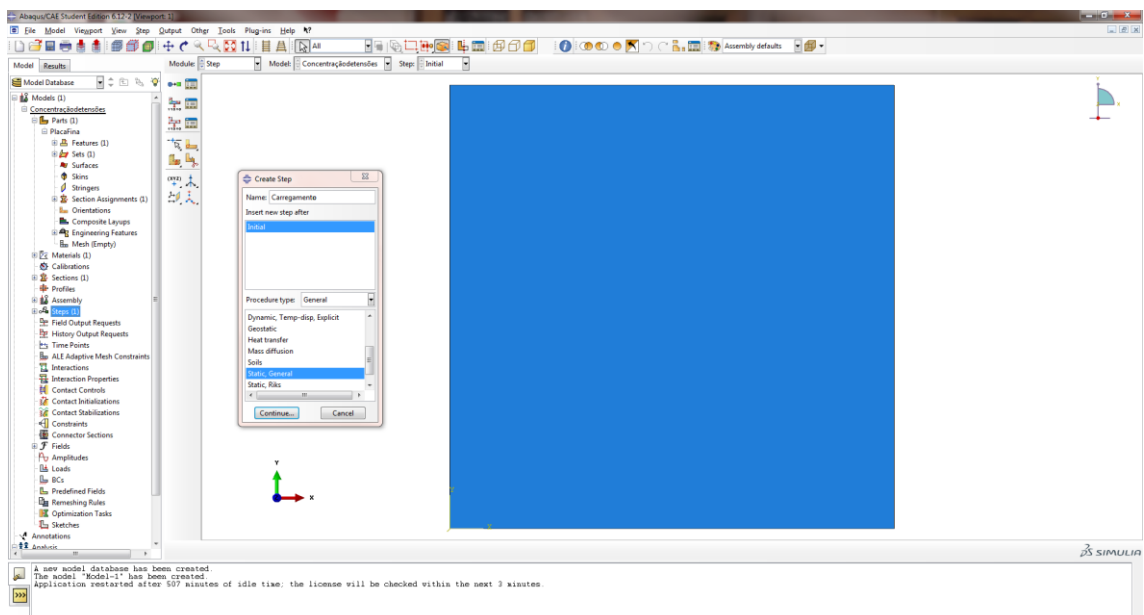


✓ No menu **Model** à esquerda, **abra** **Assembly**, **dê** duplo clique em **Instances** e **clique** em **OK** na janela **Create Instance**.

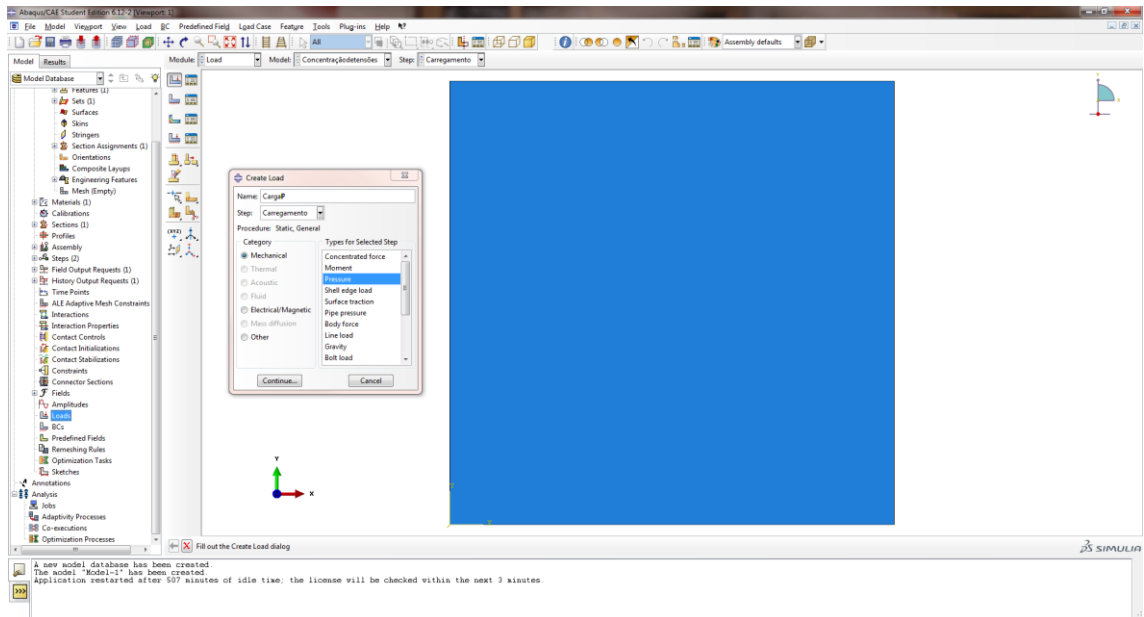




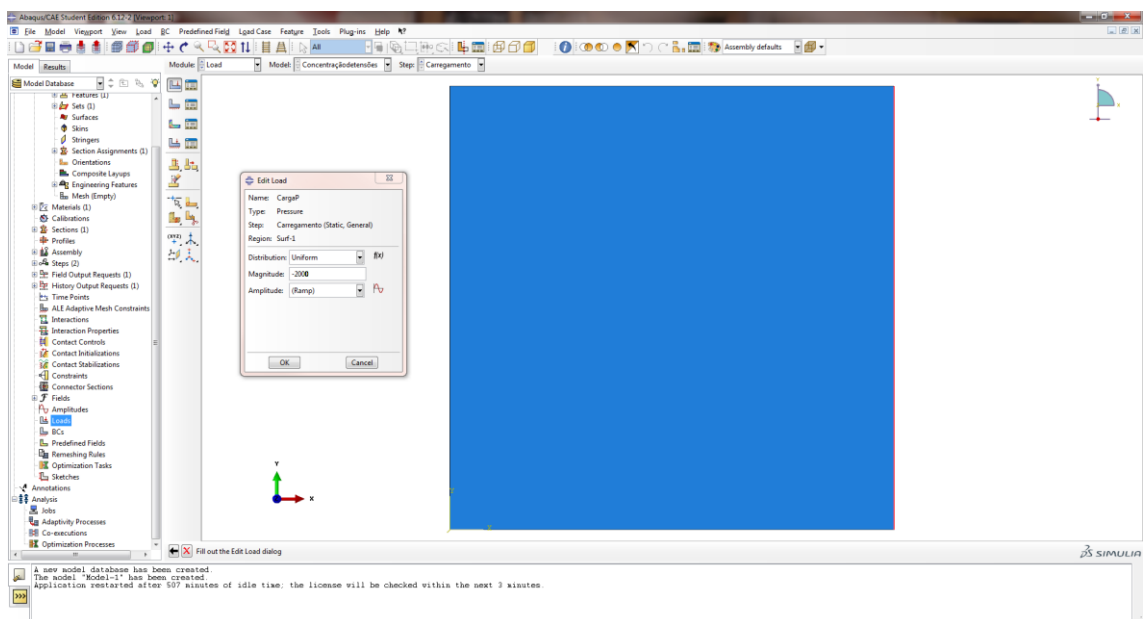
- ✓ No menu **model** à esquerda, **dê** duplo clique em **Steps**. **Digite** Carregamento no campo **Name**: e **Clique** em **Continue...** Então **clique** **OK** na nova janela que se abre.



- ✓ No menu **model** à esquerda, **dê** duplo clique em **Loads**. Na janela **Create Load**, no campo **Name** **digite** **CargaP**, **troque** o **Step** para **Carregamento**, em **Types for Selected Step** **selecione** **Pressure** e **clique** em **Continue....**

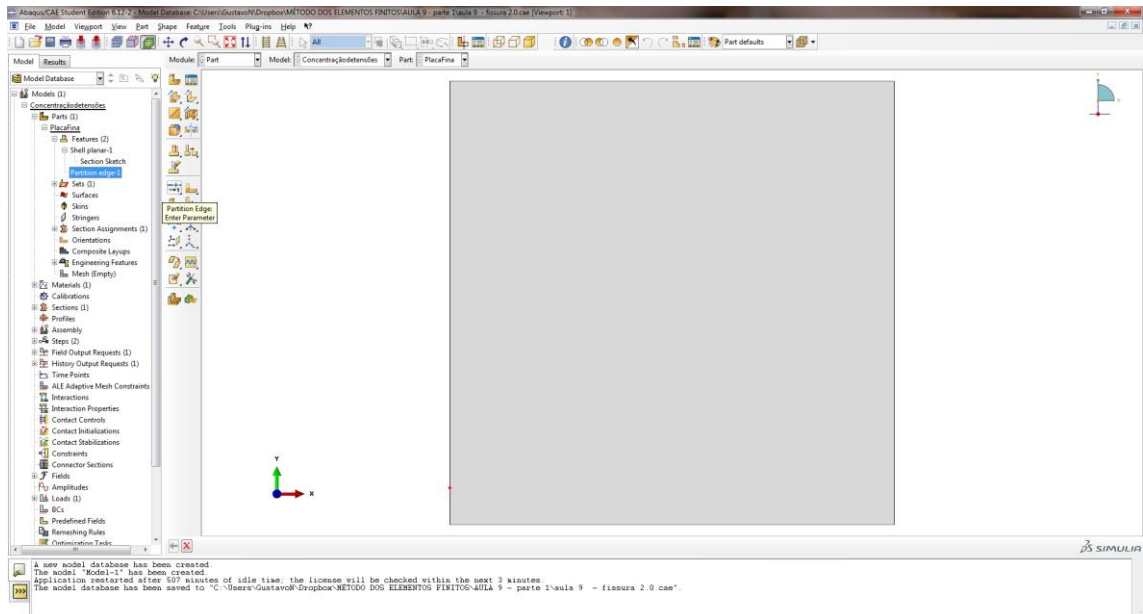


- ✓ **Selecione** a aresta direita da placa e **clique** em Done. Na janela Edit Load, **digite** -2000 no campo Magnitude: e **clique** em OK.

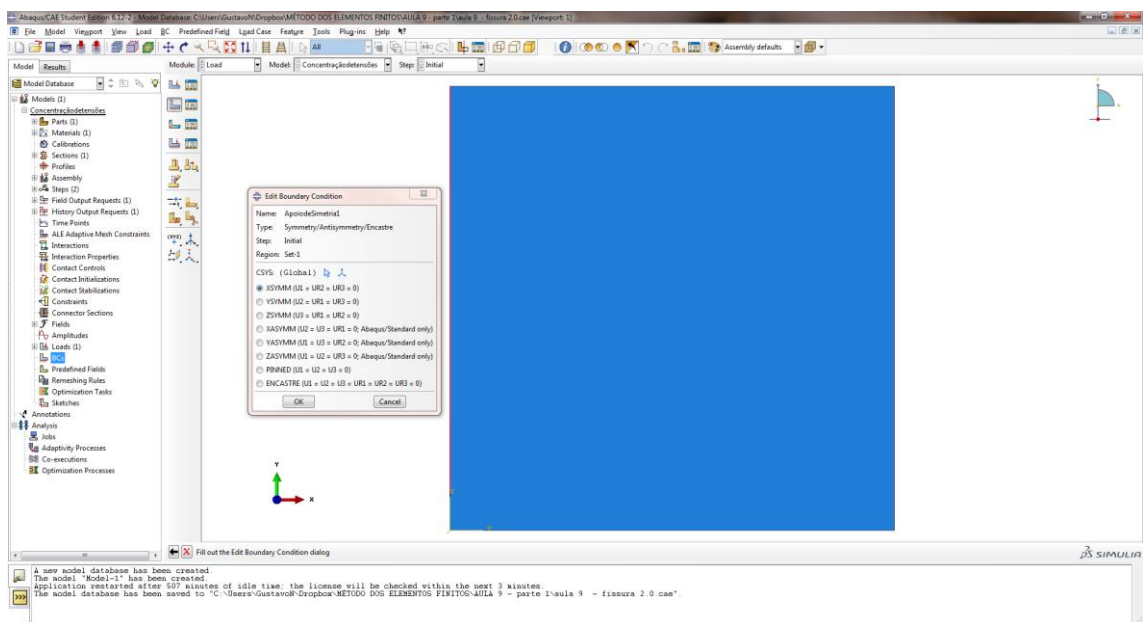


- ✓ Foi criada a placa usada na resolução dos itens a, b, c e d como um caso geral. Agora é preciso criar os concentradores de tensão. **Comece** pelo caso a, da fissura.
- ✓ Na barra de contexto, em Module, **selecione** Part. Na caixa de ferramentas, **clique** e **segure** o botão esquerdo em Partition Edge: Specify Parameter by Location, e **escolha** a opção Partition Edge:

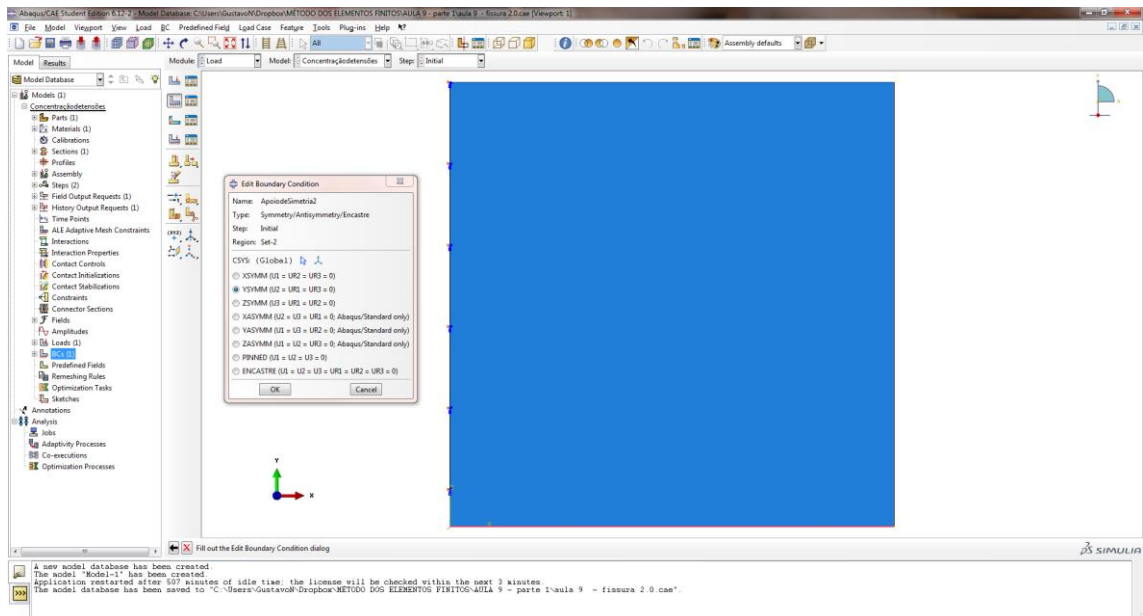
Enter Parameter. **Selecione** a aresta esquerda e **clique** em Done.  
**Digite** 0.083333 e **clique** em Create Partition.



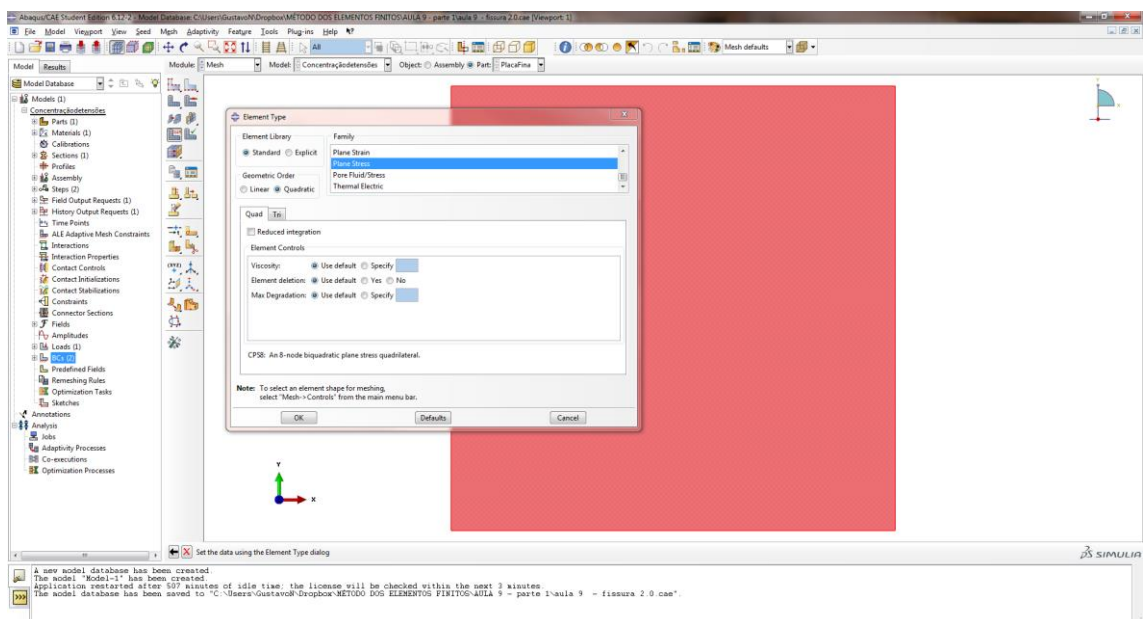
✓ No menu model à esquerda, **dê** duplo clique em BCs. Na janela Create Boundary Condition, **altere** o campo Name para *ApoiodeSimetria1*, Step para Initial e Types for Selected Step para Symetry/antisymetry/Encastre. **Clique** em Continue... **Selecione** a maior parte da aresta esquerda da placa e **clique** em Done. **Marque** XSYMM(U1 = UR2 = UR3 = 0) na janela Edit Boundary Condition e **clique** em OK.



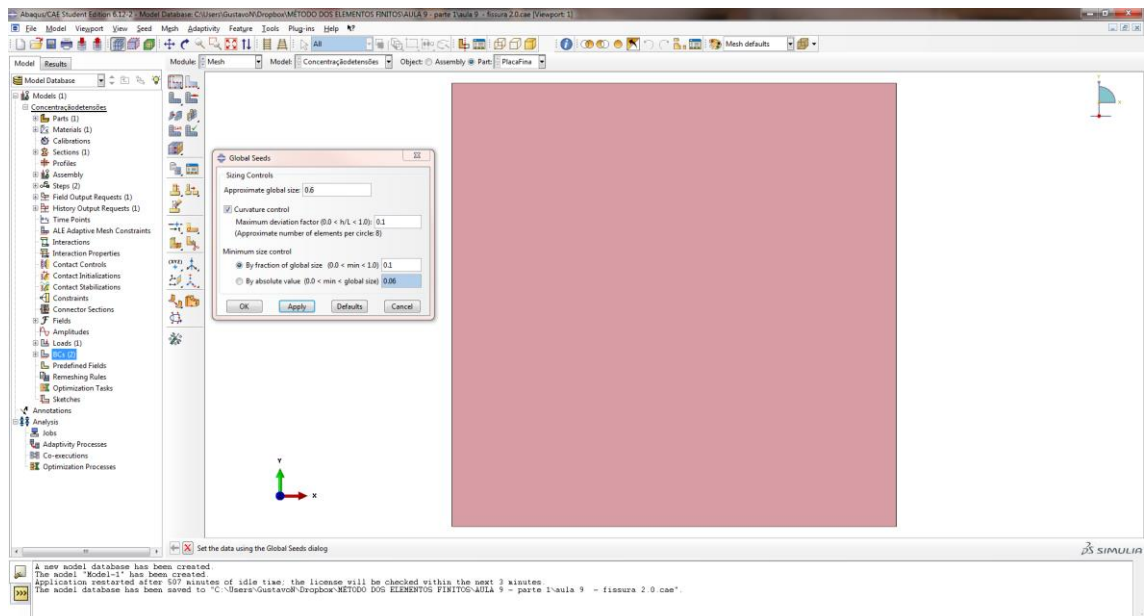
- ✓ **Repita** o procedimento para criar o *ApoiodeSimetria2*, selecionando a aresta de baixo, e selecionando em **Edit Boundary Condition** **YSYMM(U2 = UR1 = UR3 = 0)**.



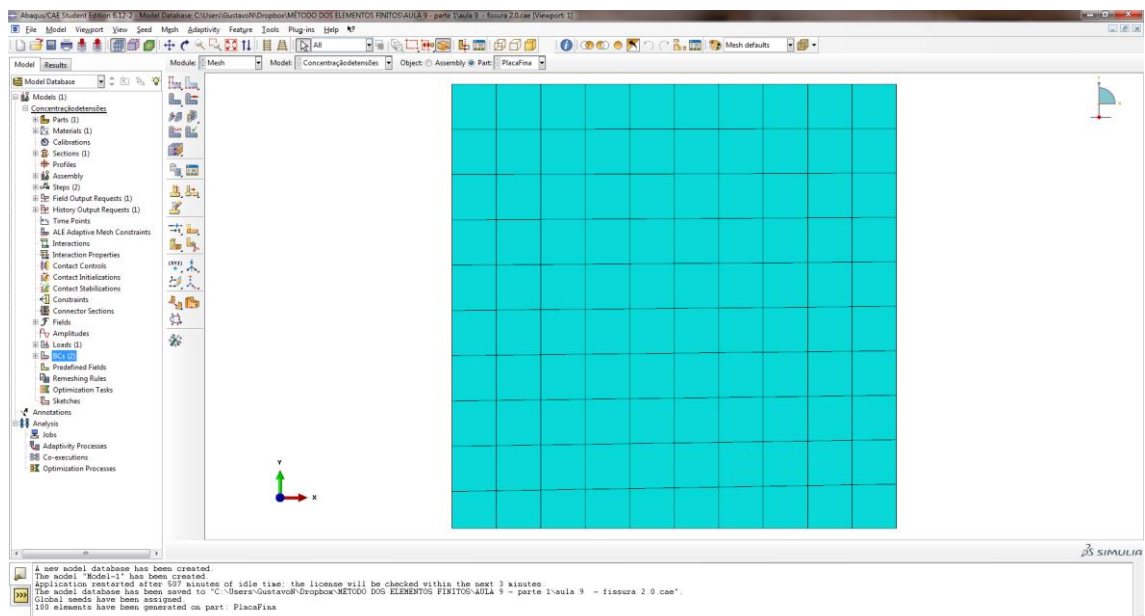
- ✓ Na barra de contexto, em **Module**, **selecione** Mesh, e em **Object**, **selecione** Part. Na barra do menu principal, **clique** em Mesh>Element Type e **selecione** a placa. **Clique** em Done, abrirá a janela Element Type. Em Family, **selecione** Plane Stress, em Geometric Order, **selecione** Quadratic e **desmarque** a opção Reduced Integration. **Clique** em OK.



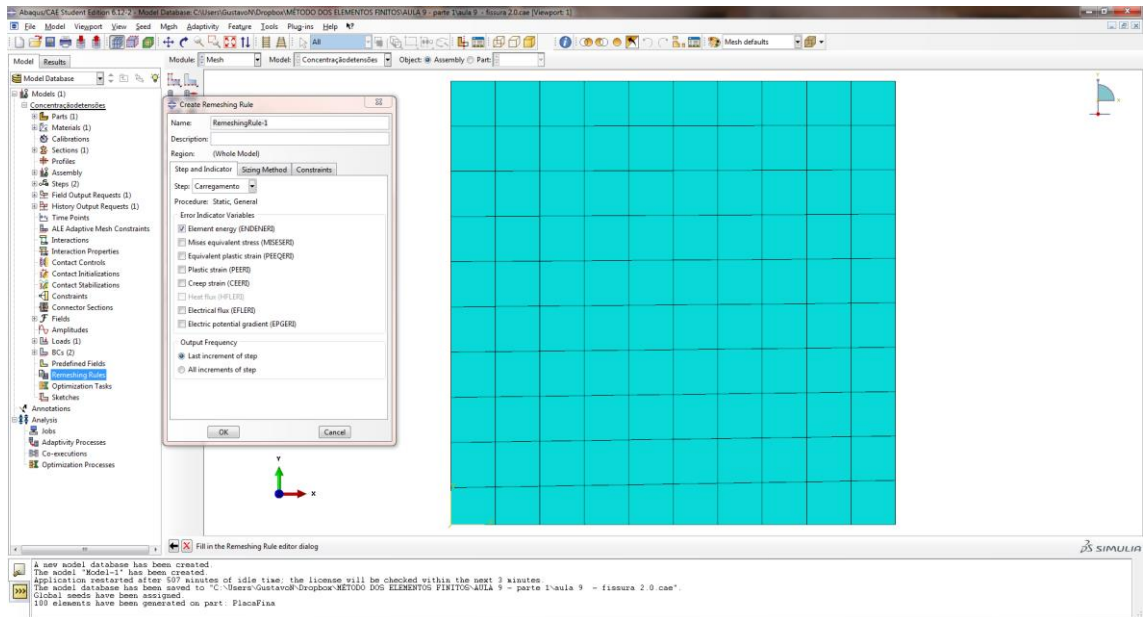
- ✓ Na barra do menu principal, **clique** em **Seed>Part** e **clique** em **OK**.  
**Clique** em **Done**.



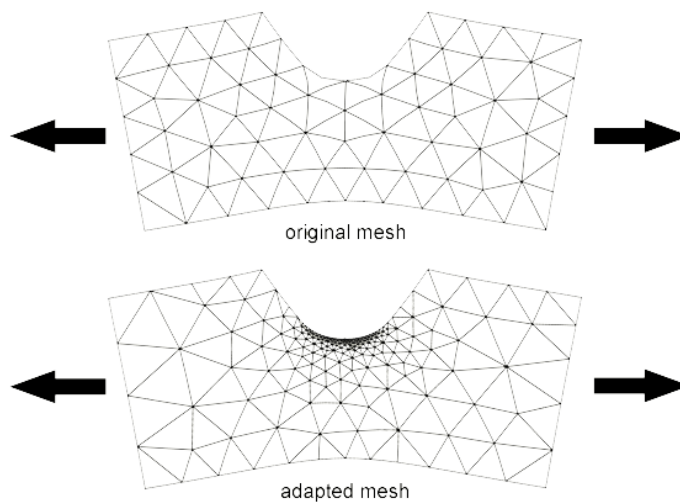
- ✓ Na barra do menu principal, **clique** em **Mesh>Part**. Aparecerá a pergunta “OK to mesh the part?”, **clique** **Yes**. **Perceba** que a placa fica na cor azul.



- ✓ No menu **model** à esquerda, **dê** duplo clique em **Remeshing Rules** e **clique** em **Done**. Na janela que se abre, **mantenha** as configurações padrão e **clique** em **OK**.



- ✓ **Adaptive remeshing** pode melhorar a qualidade das simulações refinando a malha de acordo com a necessidade de cada região da peça em análise. Funciona através de iterações sucessivas, até que um determinado critério seja atendido ou o número máximo de iterações seja alcançado.



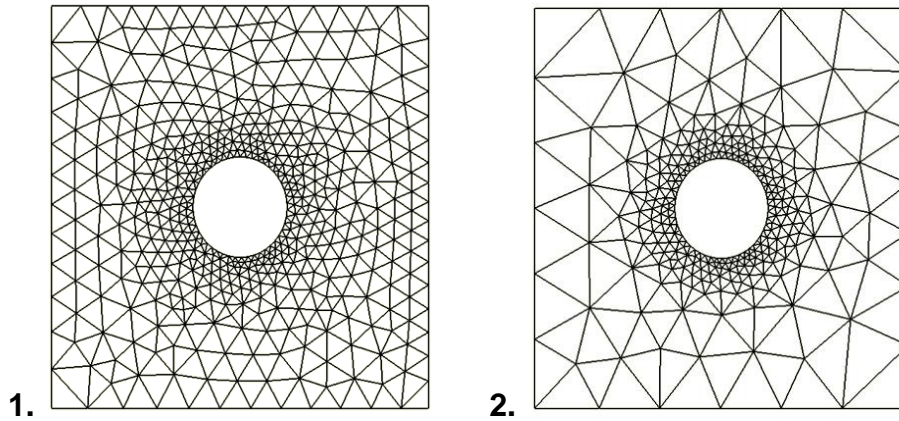
- ✓ Ao manter a Regra de redefinição da malha em sua opção Padrão (**Default sizing methods and parameters**) o programa automaticamente seleciona o método melhor aplicado a redução do indicador de erro.

CRITÉRIO	VARIÁVEL INDICADORA DE ERRO	DEFAULT SIZING METHOD
----------	-----------------------------	-----------------------



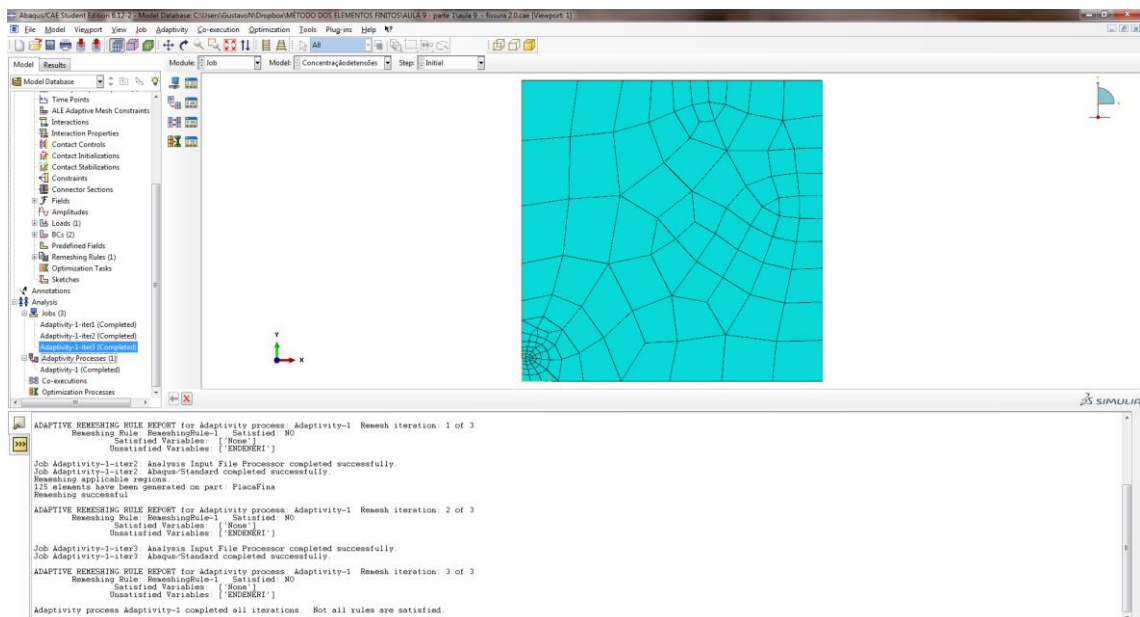
ELEMENT ENERGY DENSITY	ENDENERGI	UNIFORM ERROR DISTRIBUTION
------------------------	-----------	----------------------------

- ✓ **1.Uniform error distribution sizing method X 2.Minimum/maximum control sizing method** (exemplificado pela análise de distribuições de tensões numa placa com furo circular)



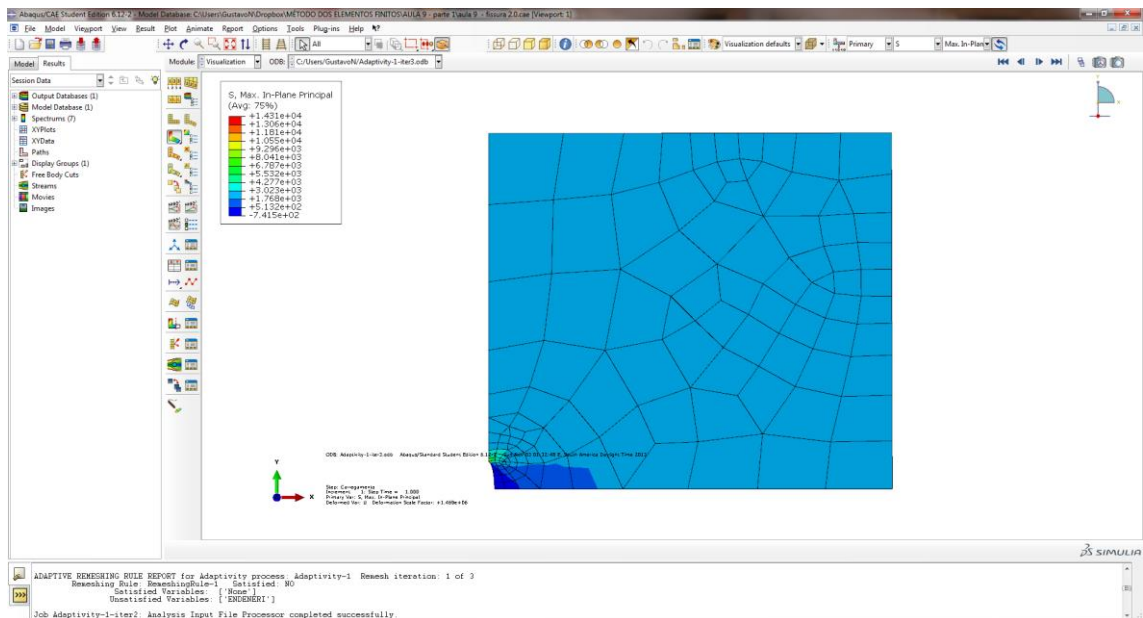
### 2.3.PROCESSAMENTO

- ✓ No menu model à esquerda, **dê** duplo clique em **Adaptivity Processes** e **clique** em **OK**.
- ✓ **Abra** **Adaptivity Processes** e **clique** com o botão direito em **Adaptivity-1** e **clique** em **Submit** . Na janela que se abre, **clique** em **OK** e **aguarde**.



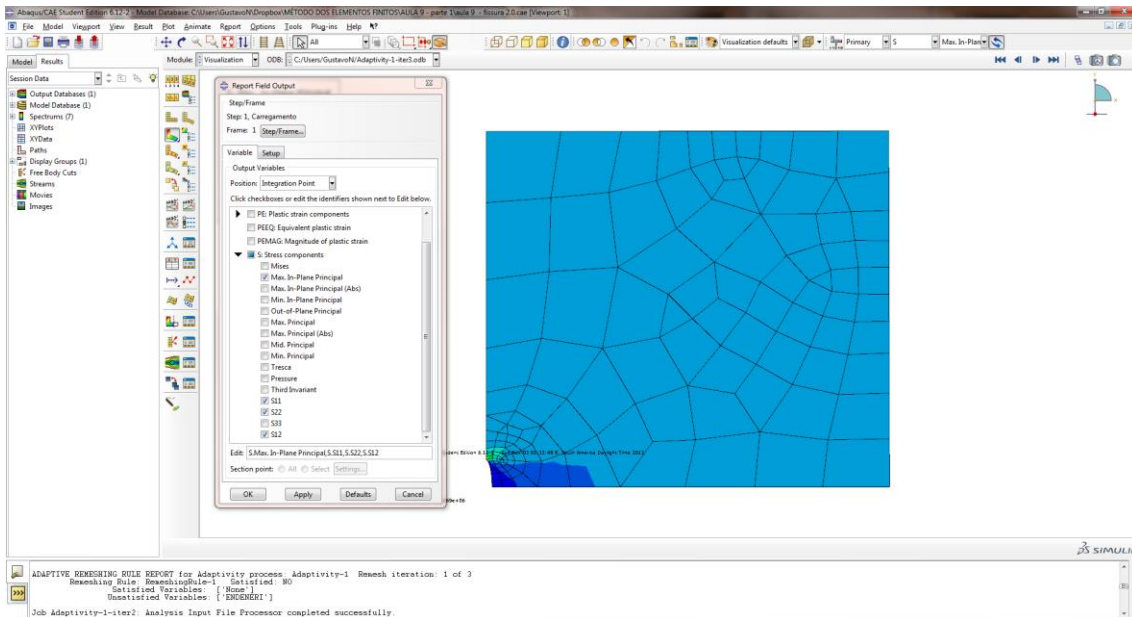
## 2.4. PÓS-PROCESSAMENTO

- ✓ No menu **model** à esquerda, **clique** com o botão direito em **Jobs(3)>Adaptivity-1-iter3(Completed)>Results**. A tela de análise de dados se abrirá. Na caixa de ferramentas, **clique** em **Plot Contours on Deformed Shape**.
- ✓ Na barra de ferramentas no canto superior à direita, **selecione S>Max. In-Plane Principal**. Na barra de menus principal, **clique** em **Viewport>Viewport Annotation Options....** Na janela aberta, **selecione** a aba **Legend**. **Clique** em **Set Font**. Na nova janela, **altere** **Size** para **14**. **Clique** **OK** nas duas janelas abertas.

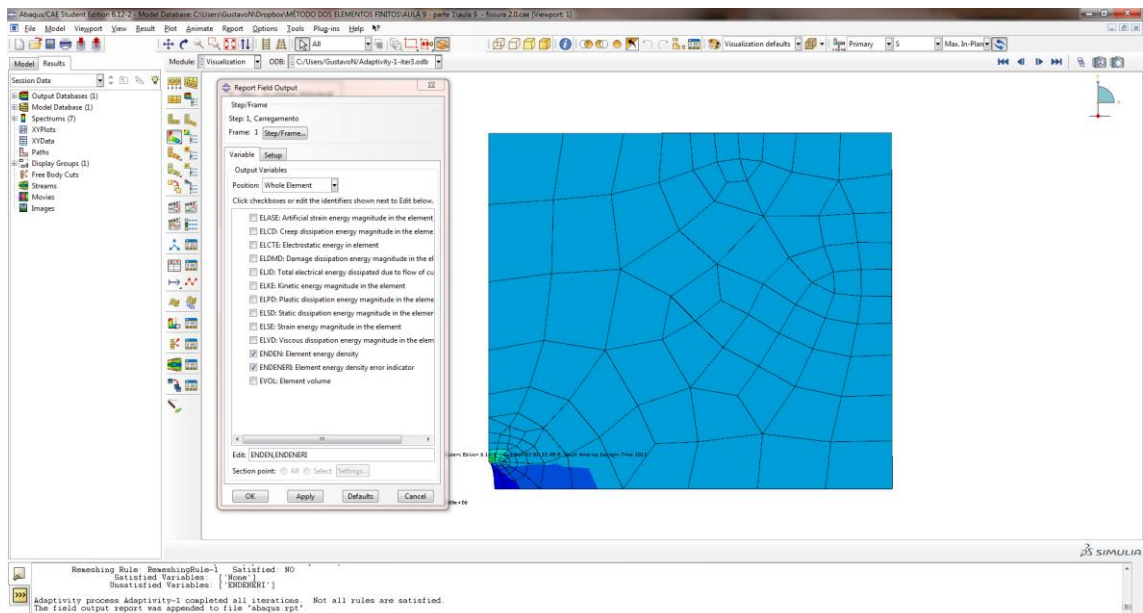


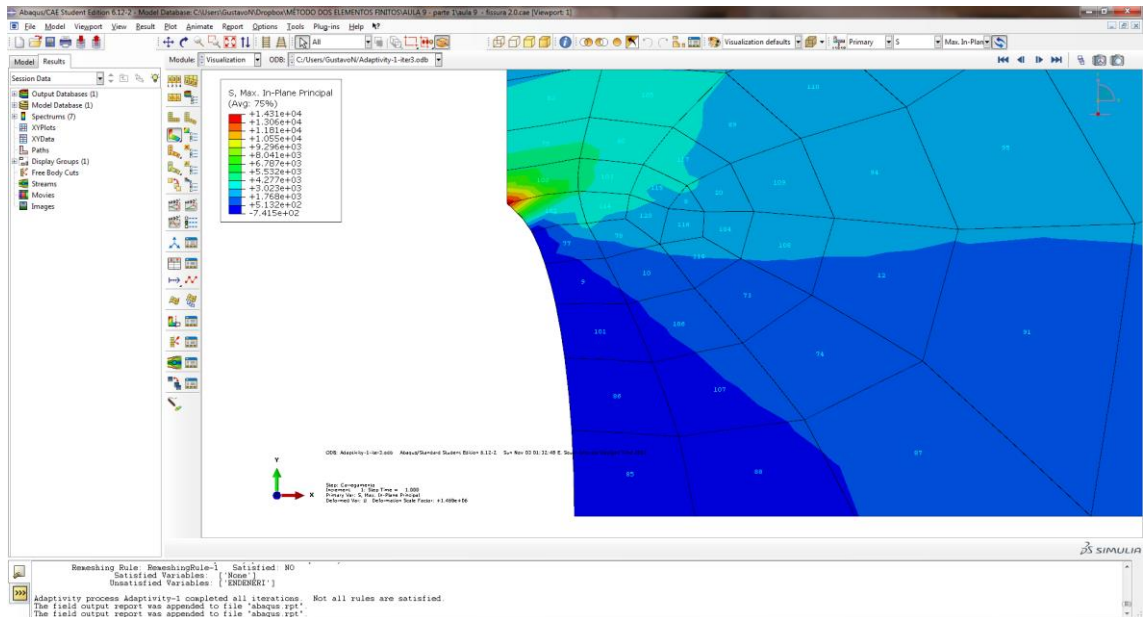
- ✓ Na barra de menu principal, **clique** em **Report>Field Output**. Na janela **Report Field Output**, **clique** em **S: Stress Components > Max. In-Plane Principal, S11, S22, S12** e **clique** em **OK**. A mensagem aparecerá: "The field output report was appended to file "abaqus.rpt". O arquivo **abaqus.rpt** pode ser encontrado em **C:\Users\Nome do Usuário\abaqus.rpt**. O arquivo exibirá as tensões máximas no plano.





- ✓ Para o caso da fissura foi obtido: S.Max. In-Plane =  $11.2054E+03$  no elemento 102, ponto de integração 7. (ponta da fissura)
- ✓ Na barra do menu principal, **clique** em Report Field Output. Na janela Report Field Output, **desmarque** Stress Components e no campo Position **selecione** Whole Element. Então **marque** ENDEN: Element energy density e ENDENERI: Element energy density error indicator e **clique** OK.

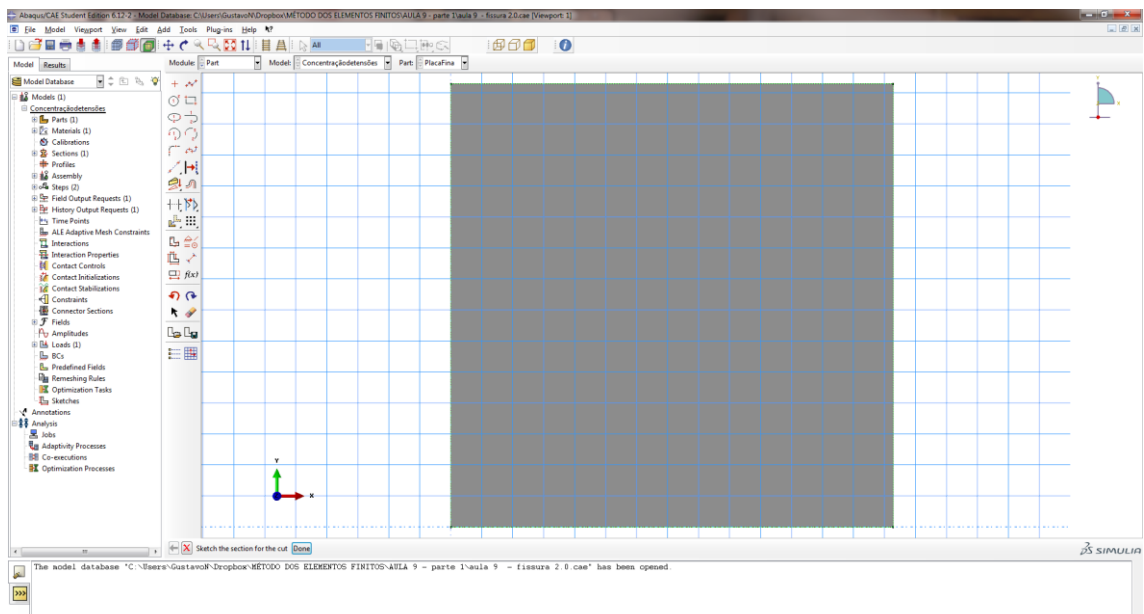




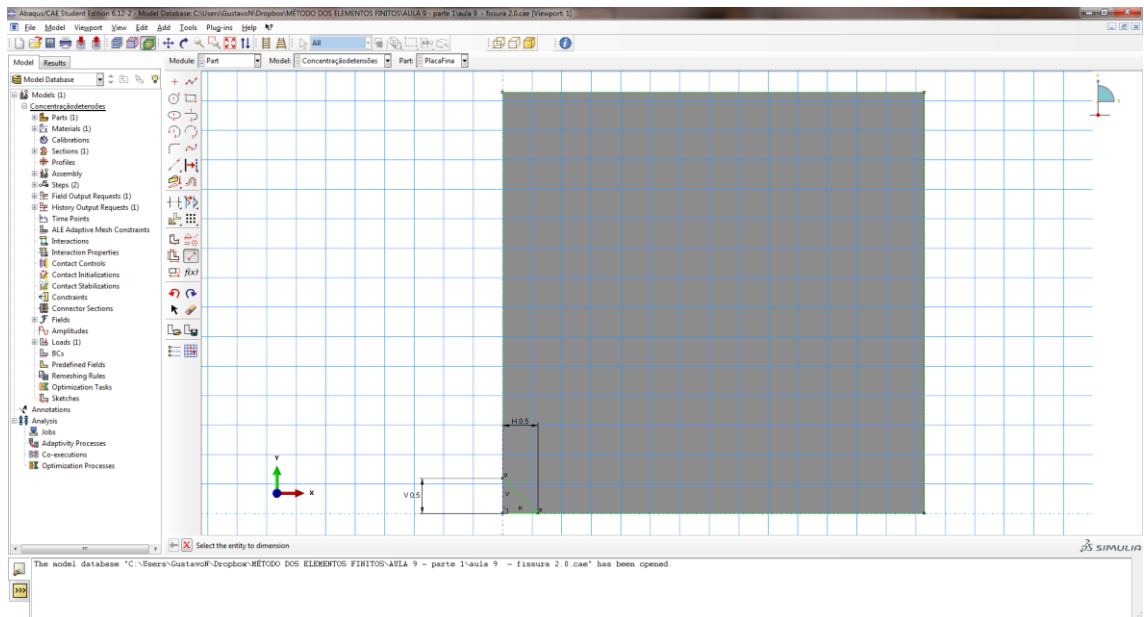
- ✓ Na barra do menu principal, **clique** em **File>Save As...** **Dê** um nome ao arquivo e **clique** em **OK** (É possível também salvar o arquivo com os resultados já calculados - **job-1.odb**).

## 2.5. DEMAIS CASOS:

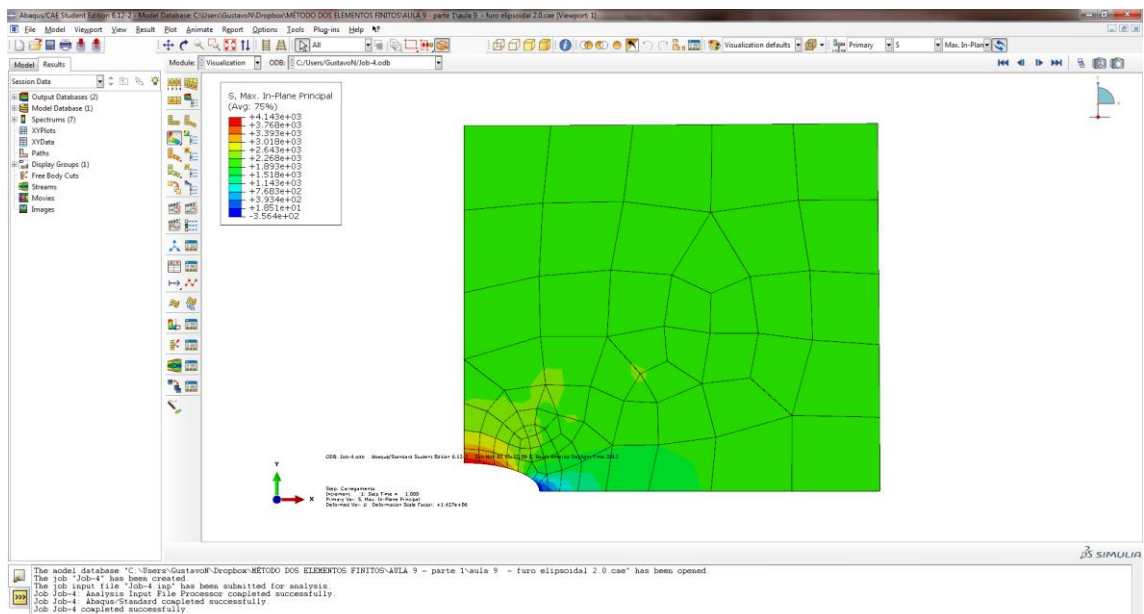
- ✓ Para a resolução dos outros itens, o você pode utilizar da ferramenta de corte na parte seguindo os mesmos passos desse guia até aplicação da carga:
- ✓ Na barra de contexto, em **Module**, **selecione** **Part**. Na caixa de ferramentas, **clique** em **Create Cut: Extrude**. O modo sketch abrirá.



- ✓ Na caixa de ferramentas **utilize** a ferramenta **Create Lines: Connected** para criar o caso do losango, a ferramenta **Create Circle: Center and Perimeter** para o caso do furo circular, ou a ferramenta **Create Ellipse: Center and Perimeter** para criar o furo em forma de elipse. **Clique** em **Done** ao final da edição.



- ✓ **Repita** os procedimentos do caso A, para resolver os demais casos, colocando apoios de simetria e criando a malha. Exemplo:



## 2.6. RESULTADOS NA PONTA DA FISSURA:

TENSÕES				
CASO A	FISSURA		S. MAX IN-PLANE	S11
		MAXIMO	11.2054E+03	9.9092E+03
		ELEMENTO	102*	100*
		PONTO DE INTEGRAÇÃO	7*	3*
CASO B	CIRCULO		S. MAX IN-PLANE	S11
		MAXIMO	6.0157E+03	6.01539E+03
		ELEMENTO	112*	112*
		PONTO DE INTEGRAÇÃO	3*	3*
CASO C	ELIPSE		S. MAX IN-PLANE	S11
		MAXIMO	4.00291E+03	4.00244E+03
		ELEMENTO	57*	57*
		PONTO DE INTEGRAÇÃO	7*	7*
CASO D	LOSANGO		S. MAX IN-PLANE	S11
		MAXIMO	14.5545E+03	13.0893E+03
		ELEMENTO	103*	103*
		PONTO DE INTEGRAÇÃO	7*	7*

\*Elementos e pontos de integração que fazem referência à ponta da fissura ou furo, onde há concentração de tensões em cada caso.

## 2.7. ERRO:

ERRO				
CASO A	FISSURA	ENDEN	ENDENERI	ESTIMATIVA DE ERRO
		0,021360400	0,011939600	55,8960%
		102	102	102

CASO B	CIRCULO	ENDEN	ENDENERI	ESTIMATIVA DE ERRO
		0,022359500	0,000262119	1,1723%
		112	112	112
CASO C	ELIPSE	ENDEN	ENDENERI	ESTIMATIVA DE ERRO
		0,014565500	0,000133117	0,9139%
		57	57	57
CASO D	LOSANGO	ENDEN	ENDENERI	ESTIMATIVA DE ERRO
		0,033099600	0,013607700	41,1114%

- ✓ Variáveis de estimativa de erro representam o erro na solução e têm a unidade da mesma.
- ✓ Estimativas de erro são aproximações e **não** representam uma estimativa precisa e conservadora do erro da solução. A qualidade do indicador de erro pode ser muito ruim no caso de uma malha grosseira, entretanto ela vai melhorando à medida que a malha é refinada.
- ✓ O Abaqus/CAE fornece variáveis indicadoras de erros locais para a malha gerada

CRITÉRIO	VARIÁVEL INDICADORA DE ERRO	VARIÁVEL DA SOLUÇÃO BASE
ELEMENT ENERGY DENSITY	ENDENERI	ENDEN

- ✓ Os Algoritmos de solução do abaqus usados na mudança da malha (Adaptive remeshing) consideram o valor do indicador de erro e a solução base simultaneamente.

- ✓ A estimativa do erro ultrapassando aproximadamente 10% da solução base representa: Alta probabilidade do valor da solução ser imprecisa e inapropriada na região, a malha pode ser muito grosseira para a análise ou talvez exista singularidade de tensão no elemento.
- ✓ **ERRO [%] = (ENDENERI/ENDEN)\*100**