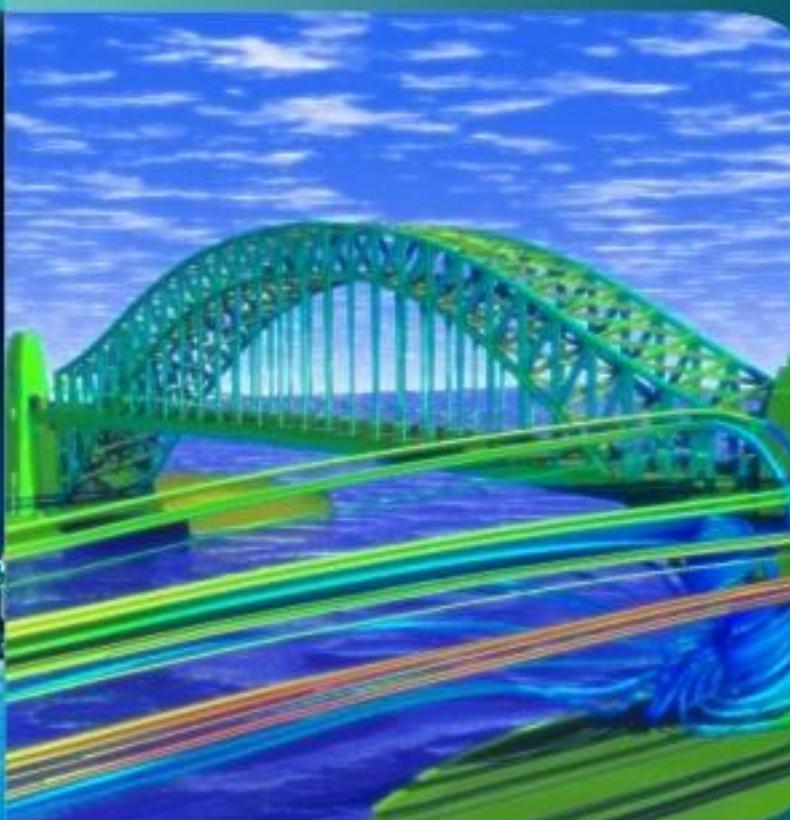




2010

**Método dos
Elementos
Finitos Aplicados à
Engenharia de
Estruturas**



**Prof^a. Mildred B. Hecke
Universidade Federal do Paraná
Versão 1.0.0.0**



**ANÁLISE ESTÁTICA LINEAR
DE UM PUXADOR**

ANÁLISE ESTÁTICA LINEAR DE UM PUXADOR

INTRODUÇÃO

Neste exemplo vamos analisar um puxador, feito de aço, submetido a um carregamento estático. Puxadores de aço são utilizados em uma grande variedade de objetos. Neste exemplo vamos assumir que o puxador em questão é um dos puxadores usados para levantar um vaso de pressão, conforme mostra a figura 8.26. Além disso, assume-se que o puxador está devidamente soldado ao vaso de pressão. De acordo com o American Petroleum Institute Standard 650, puxadores de tanques de petróleo devem ser capazes de resistir a carga, aplicada de uma maneira razoável, de duas vezes o peso do tanque vazio, usando-se o fator de segurança 4. O objetivo da nossa análise é então determinar a máxima carga que pode ser aplicada no puxador para que não ocorra plastificação na peça. Em nossa análise vamos considerar apenas as cargas verticais. Assumindo que a solda deve ser analisada separadamente, pode-se considerar a fixação da solda como engaste perfeito em nosso modelo.

PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E DOS MATERIAIS

- As dimensões do puxador são;
 - $h = 12,7 \text{ cm} = 5 \text{ in}$;
 - $b = 7,71 \text{ cm} = 3 \text{ in}$;
 - $d = 5,08 \text{ cm} = 2 \text{ in}$;
 - $t = 0,254 \text{ cm} = 0,1 \text{ in}$;

Já que a espessura é pequena e o carregamento é vertical, pode-se assumir que se trata de um problema plano de tensões. O material é assumido como elástico linear com Módulo de Young $E=30 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$ com tensão limite de escoamento $S_y = 36.000 \text{ lb/in}^2$ e coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$. Assumindo-se que a carga total de 100 lb está aplicada em uma região, englobando um ângulo de 60° em torno do eixo vertical, pode-se pela consideração de simetria adotar uma carga de $P=50 \text{ lb}$ atuando em metade da peça e aplicada a um segmento de:

$$X = \frac{30\pi R}{180} = 0,52365$$

Ou ainda, em uma área de 0,052365, o que resulta uma pressão (carga distribuída por unidade de área) $50/(0,052) = 955 \text{ lb/in}^2$.

Faremos preliminarmente uma análise utilizando-se o gerador de malhas do programa ANSYS com seus valores default. Após, realizaremos uma nova análise, impondo uma densidade de malha a ser gerada, e finalmente utilizaremos o adaptador automático de malhas.

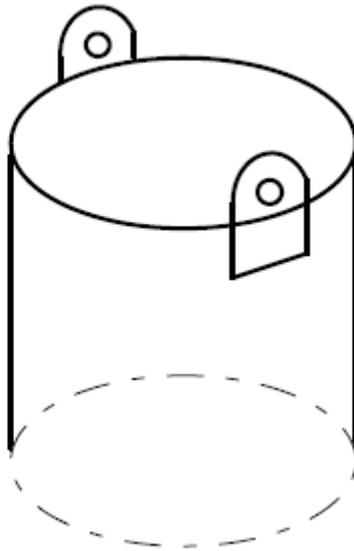


Figura 1 – Esquema do vaso com o puxador.

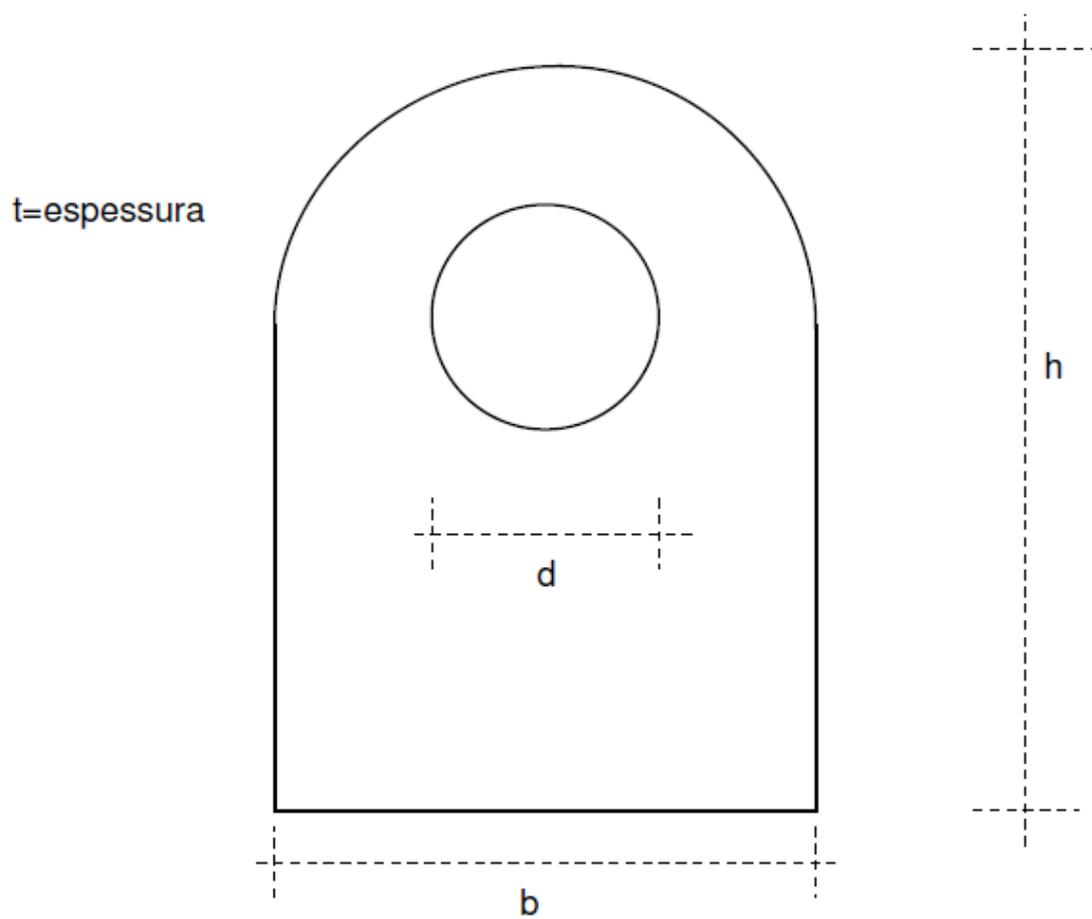
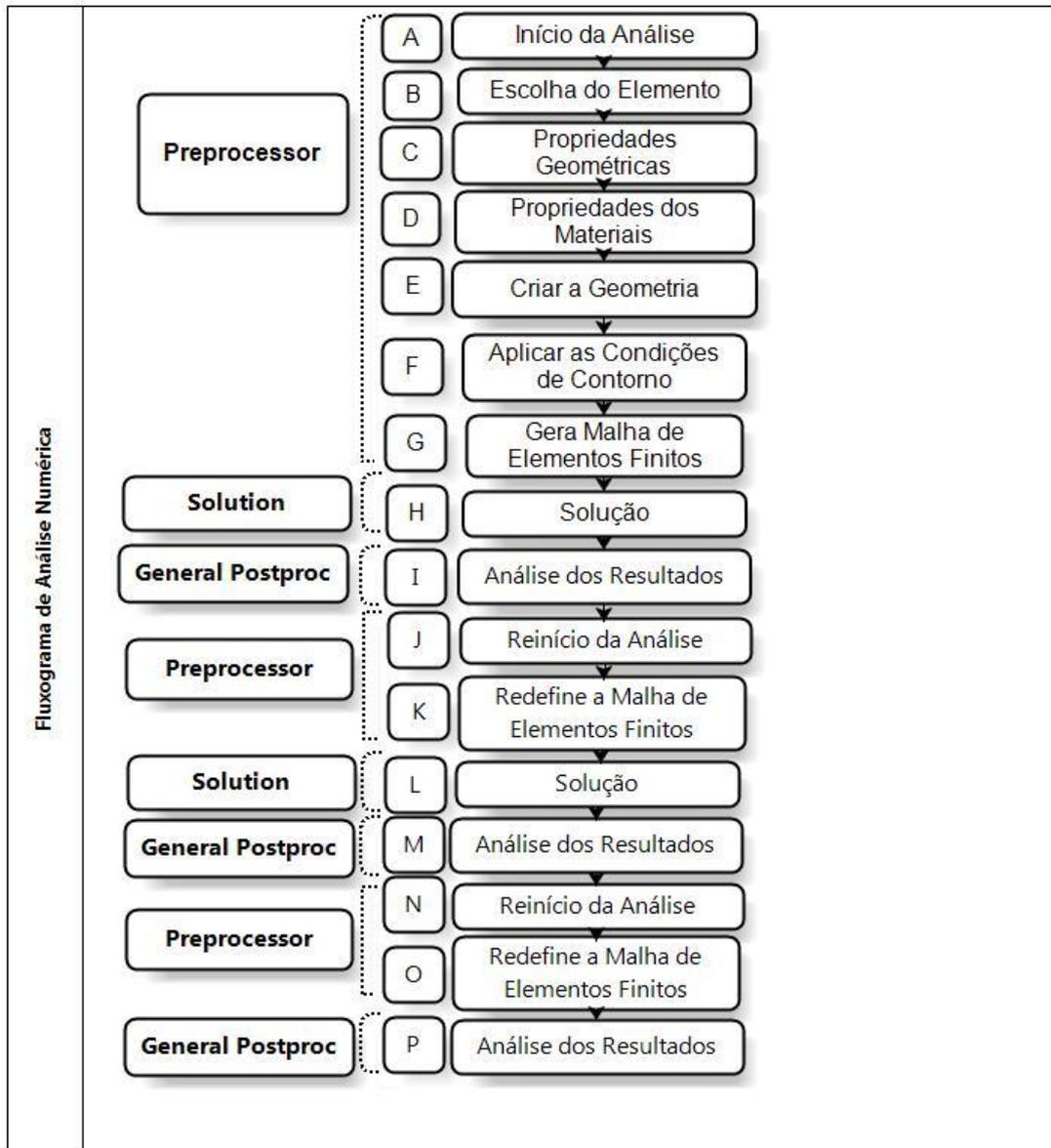


Figura 2 – Esquema do puxador a ser analisado.

RESOLUÇÃO

O procedimento de resolução pode ser demonstrado no seguinte fluxograma:



A) PRIMEIRO ESTUDO:

A

1. INÍCIO DA ANÁLISE

1.1. *Introduz o título do problema a ser resolvido:*

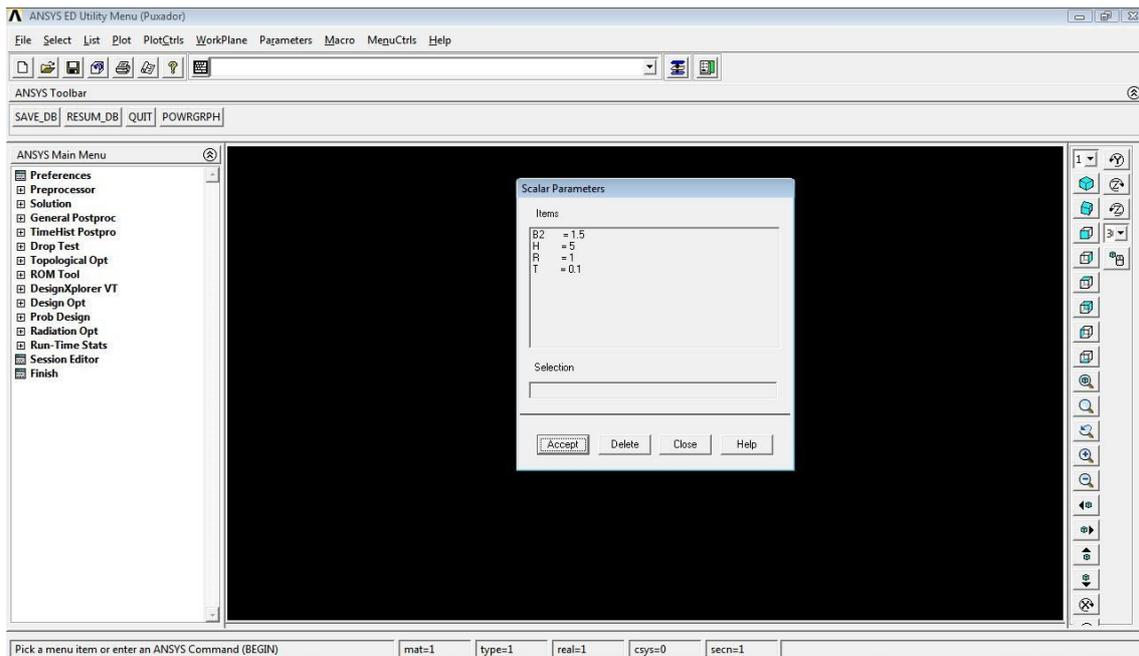
- ✓ No ANSYS Utility Menu clicar em “File” e acessar a opção “Change Title...”;
- ✓ Na nova janela que aparecer, digitar novo título: “**Estado Plano de Tensões - Puxador**”;
- ✓ Clicar em OK.

1.2. *Altera o nome dos arquivos:*

- ✓ No ANSYS Utility Menu clicar em file e acessar a opção “Change Jobname...”;
 - Na nova janela que aparecer, digitar novo nome do arquivo: “**Aula 7**”;
- ✓ Clicar em OK.

1.3. *Introduz os valores para os dados paramétricos (define valor para constantes criadas pelo usuário):*

- ✓ No “ANSYS Utility Menu”, clicar em “Parameters”, “Scalar Parameters”;
- ✓ Na janela “Scalar Parameters”, no campo “Selection” inserir:
 - **b2 = 1.5**;
 - Clicar em “Accept”;
 - **h = 5**;
 - Clicar em “Accept”;
 - **r = 1**;
 - Clicar em “Accept”;
 - **t = 0.1**;
 - Clicar em “Accept”;
- ✓ Clicar em “OK”.



1.4. **Escolhe o tipo de análise que se pretende executar, visando filtrar comandos a serem apresentados na telas de entrada:**

- ✓ No ANSYS Main Menu clicar em “Preferences”;
- ✓ Na nova janela que aparecer, em “Discipline for filtering GUI Topics”, selecionar a opção “Structural”;
- ✓ Clicar em OK.

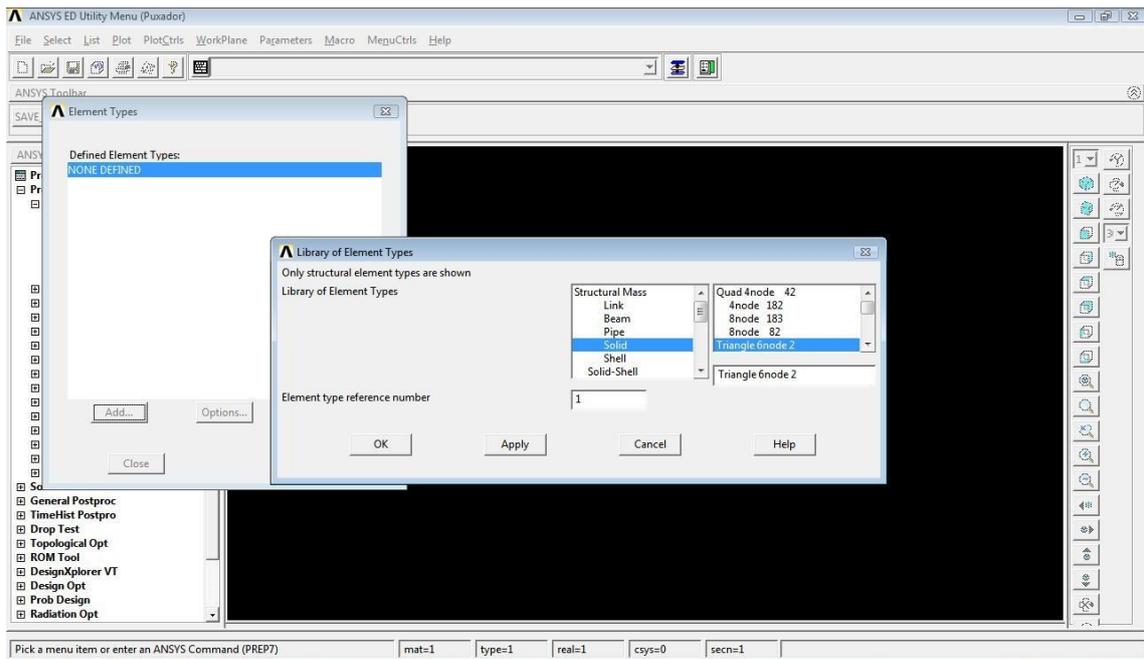
2. ENTRA NA FASE DE PRÉ-PROCESSAMENTO

- ✓ No ANSYS Main Menu, clicar em “Preprocessor”.

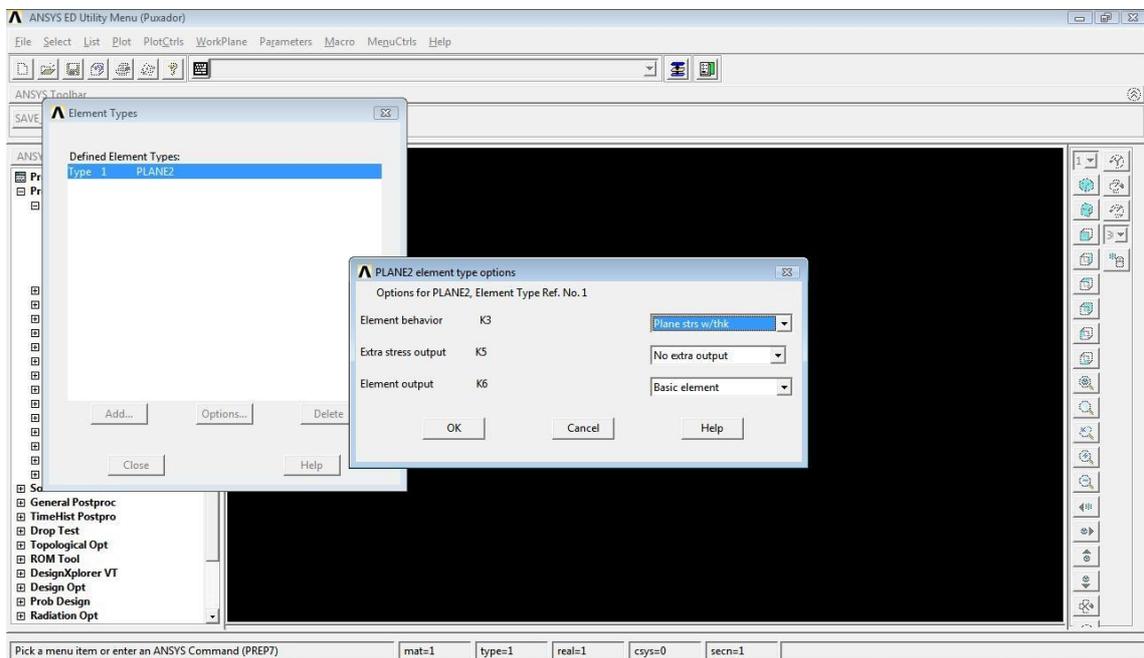
B

2.1. **Escolhe o tipo de elemento finito que será usado:**

- ✓ Dentro do “Preprocessor”, selecionar “Element Type”;
- ✓ Dentro do “Element Type”, selecionar “Add/Edit/Delete”;
- ✓ Na nova janela que abrir, clicar em “Add...” para selecionar um novo elemento.
- ✓ Outra janela se abrirá, então no “Library of Element Types” selecionar o elemento “**Structural SOLID**”, “**Triangle 6node 2**” e clicar em “OK”.
- ✓ Clicar em “OK”;



- ✓ Ainda na janela “Element Types”, clicar em “Options” (para o elemento Triangle 6node 2) e, na nova janela, seleccionar;
 - Element Behavior K3 **Plane strs w/thk**
- ✓ Clicar em “OK”;

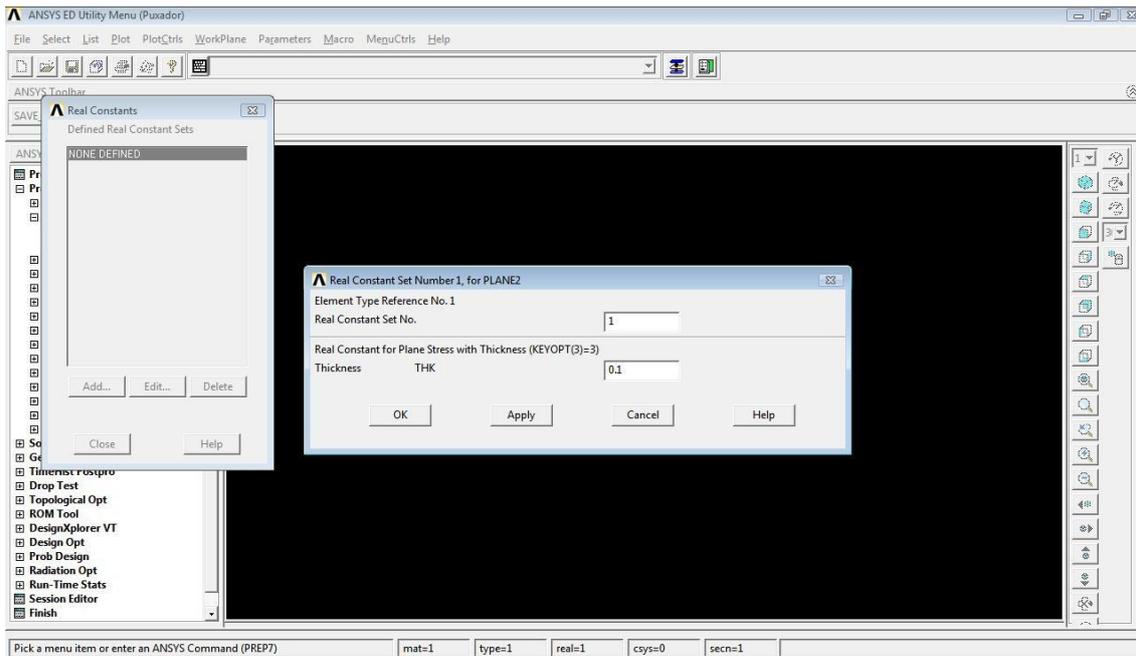


C

2.2. *Define as propriedades geométricas do modelo:*

- ✓ Dentro do “Preprocessor”, seleccionar “Real Constants”;
- ✓ Dentro do “Real Constants”, seleccionar “Add/Edit/Delete”;

- ✓ Na nova janela que abrir, clicar em “Add...” para adicionar novas constantes geométricas;
- ✓ Uma nova janela se abrirá então selecionar o tipo de elemento em “Choose element type” e clicar em OK;
- ✓ A janela “Real Constants Set Number 1, for “PLANE 2” irá aparecer. Deve-se inserir:
 - Real Constant Set No. = 1
 - Thickness THK = 0.1
- ✓ Clicar em “OK”.



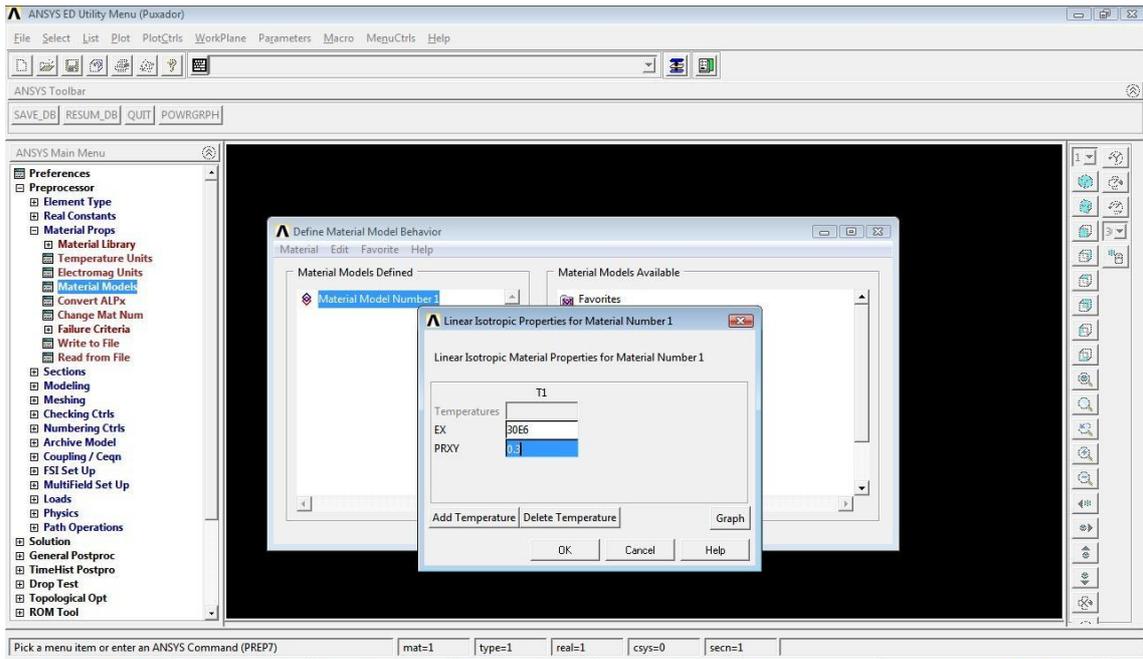
D

2.3. **Define as propriedades do material:**

- ✓ Dentro do “Preprocessor”, selecionar “Material Props”, “Material Models”;
- ✓ Na nova janela que abrir, para o “Material Model Number 1”, no quadro “Material Models Available” selecionar: “Structural>Linear>Elastic>Isotropic”;
- ✓ Dar um duplo clique em “Isotropic”;
- ✓ A janela “Linear Isotropic Material Properties for Material Number 1 irá abrir. Inserir na lacuna “EX” o valor referente ao Módulo de Elasticidade do material e clicar em “OK”:

 - EX = 30E6;
 - PRXY = 0.3;

- ✓ Fechar a janela “Define Material Model Behavior”.

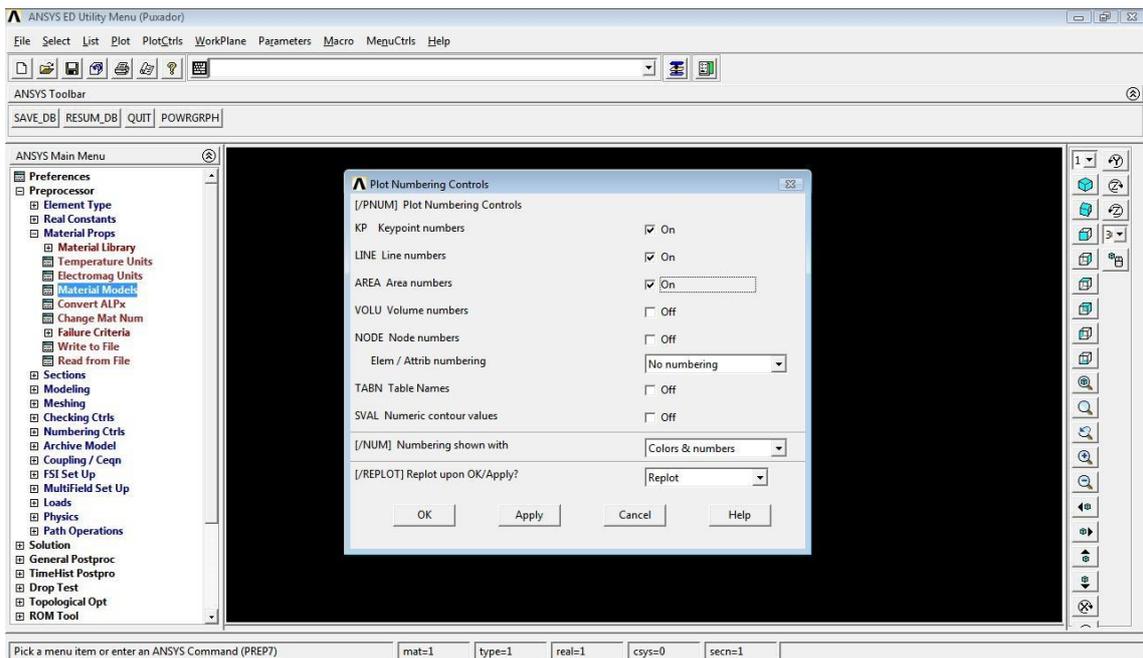


E

2.4. Cria o modelo geométrico:

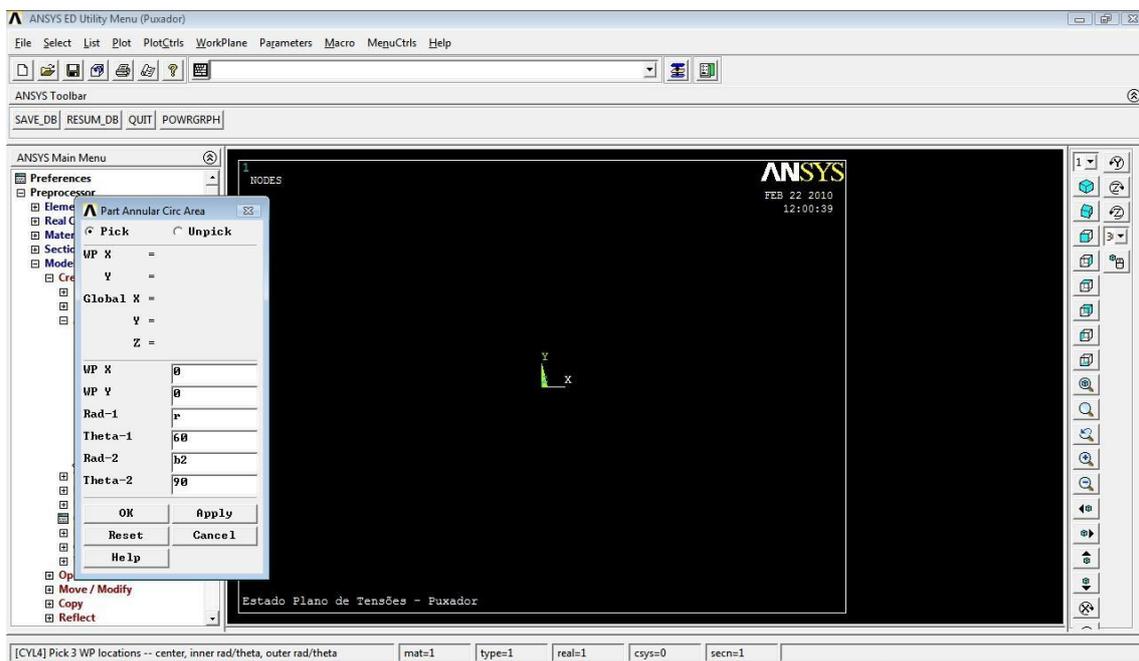
2.4.1. Numera área, lines e keypoints:

- ✓ No ANSYS Utility Menu clicar em “PlotCtrls” e acessar a opção “Numbering”;
- ✓ Na nova janela que aparecer, selecionar:
 - Keypoints **ON**
 - Lines **ON**
 - AREA **ON**
- ✓ Clicar em “OK”.

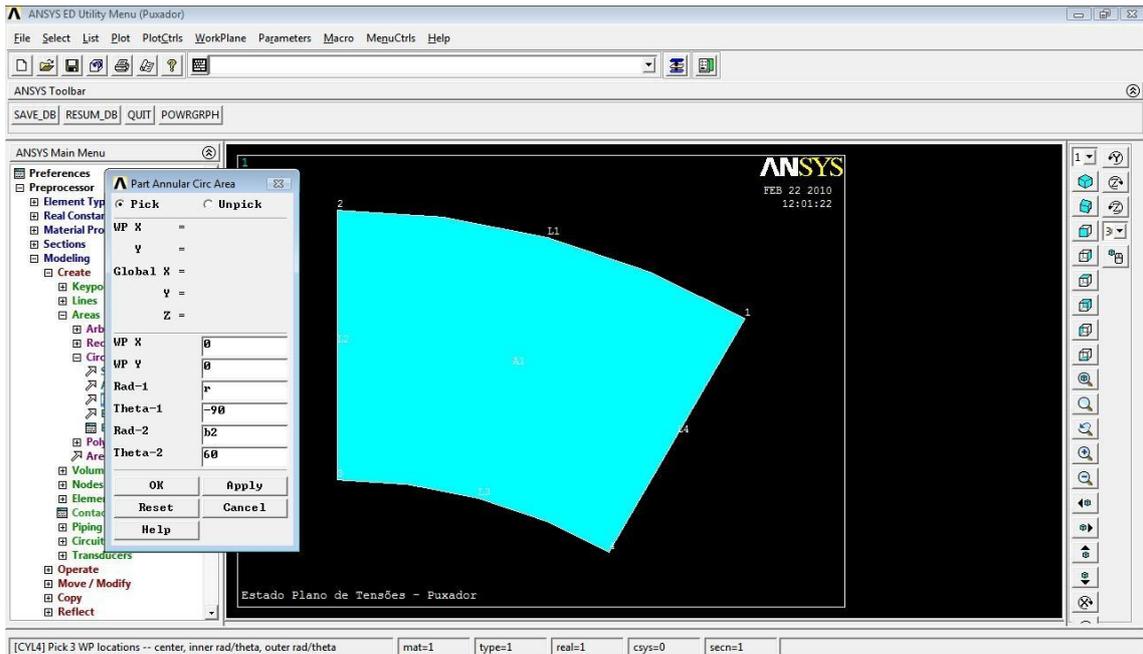


2.4.2. Cria o modelo geométrico:

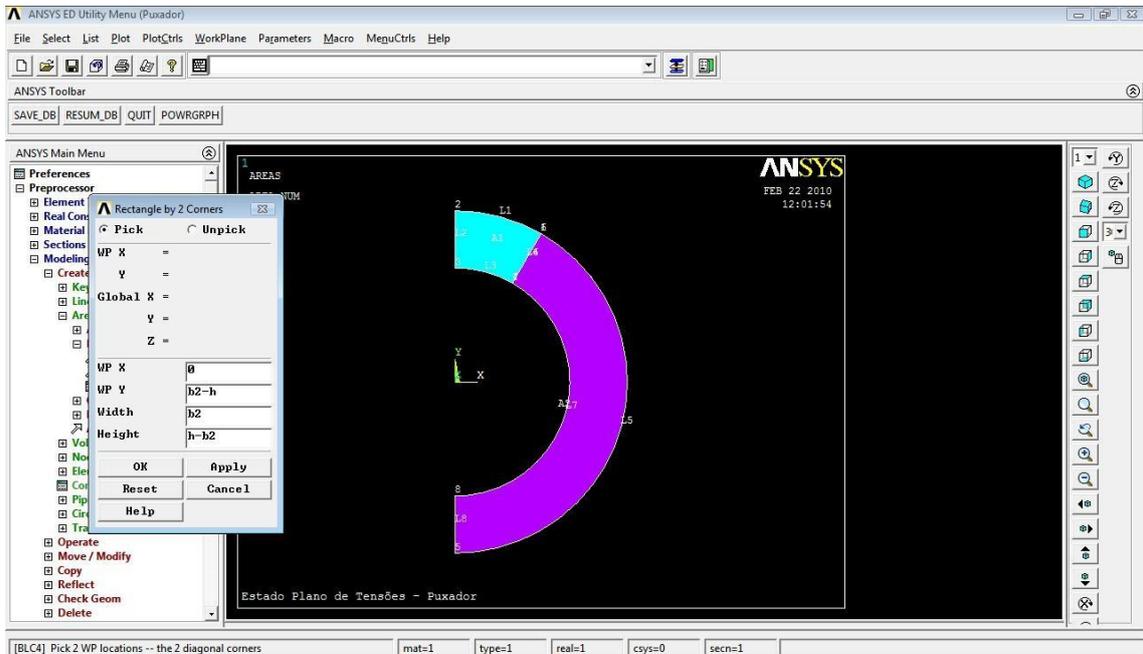
- ✓ Dentro do “Preprocessor” seleccionar “Modeling”, “Create”, “Area”, “Circle”, “Partial Annulus +”;
- ✓ Na nova janela que abrir, inserir:
 - WPX = 0;
 - WPY = 0;
 - Rad-1 = r;
 - Theta-1 = 60;
 - Rad-2 = b2;
 - Theta-2 = 90.
- ✓ Clicar em “APPLY”;



- ✓ Na nova janela que abrir, inserir:
 - WPX = 0;
 - WPY = 0;
 - Rad-1 = r;
 - Theta-1 = -90;
 - Rad-2 = b2;
 - Theta-2 = 60.
- ✓ Clicar em “OK”.

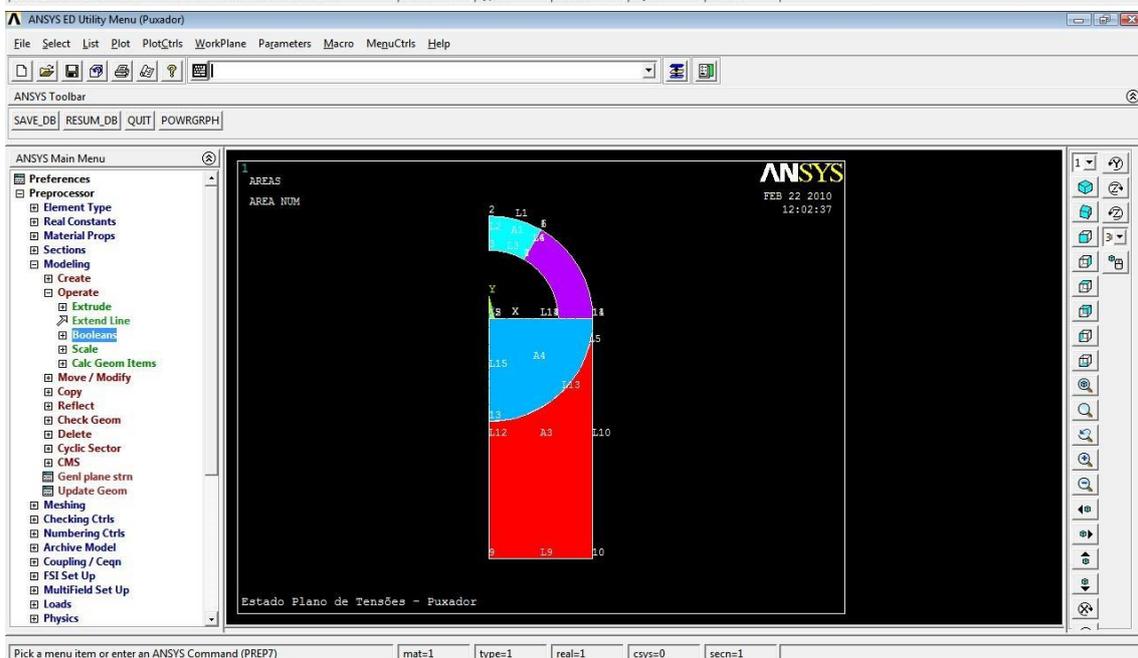
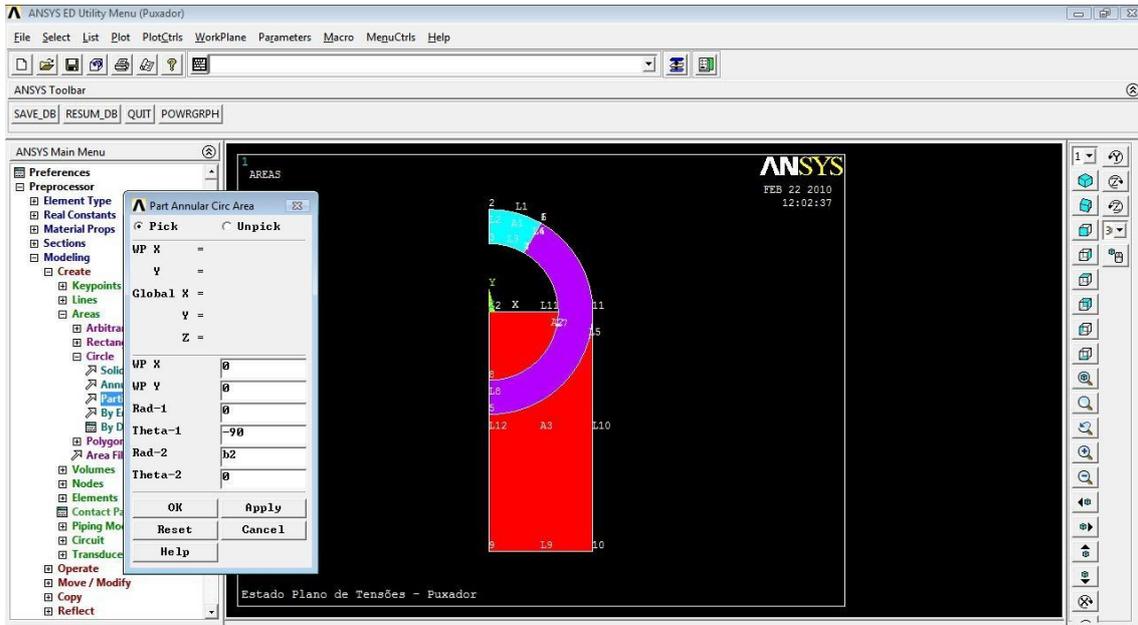


- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Create”, “Area”, “Rectangle”, “By 2 Corners +”;
- ✓ Na nova janela que abrir, inserir:
 - WPX = 0;
 - WPY = b2-h;
 - Width = b2;
 - Height = h-b2;
- ✓ Clicar em “OK”



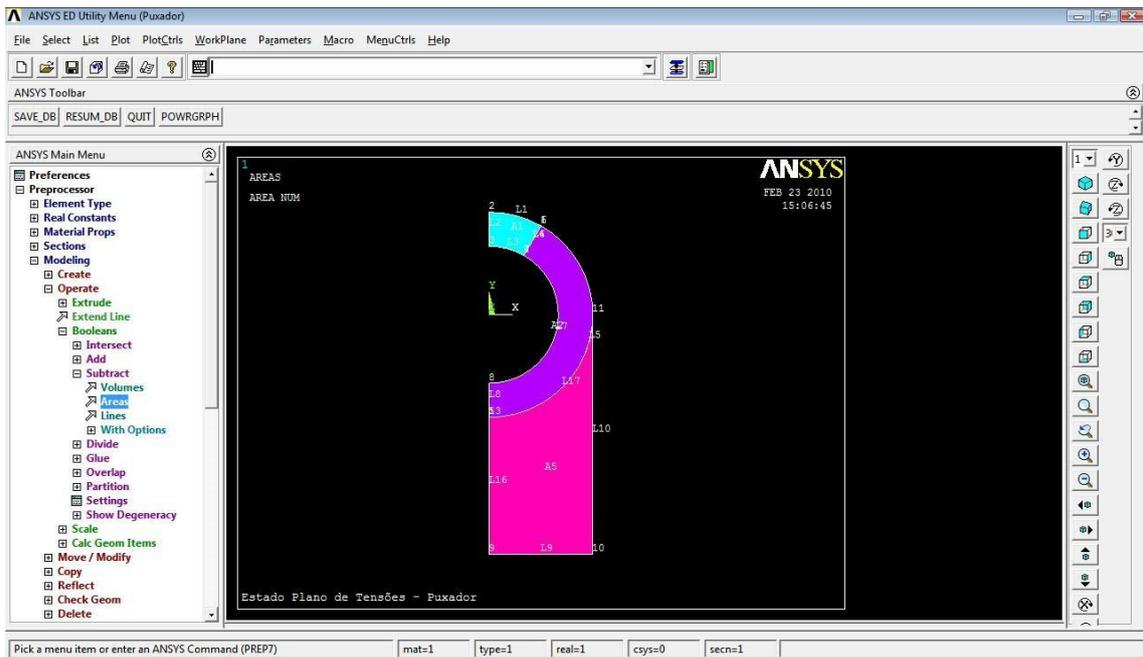
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Create”, “Area”, “Circle”, “Partial Annulus +”;
- ✓ Na nova janela que abrir, inserir:

- WPX = 0;
 - WPY = 0;
 - Rad-1 = 0;
 - Theta-1 = -90;
 - Rad-2 = b2;
 - Theta-2 = 0.
- ✓ Clicar em “OK”;

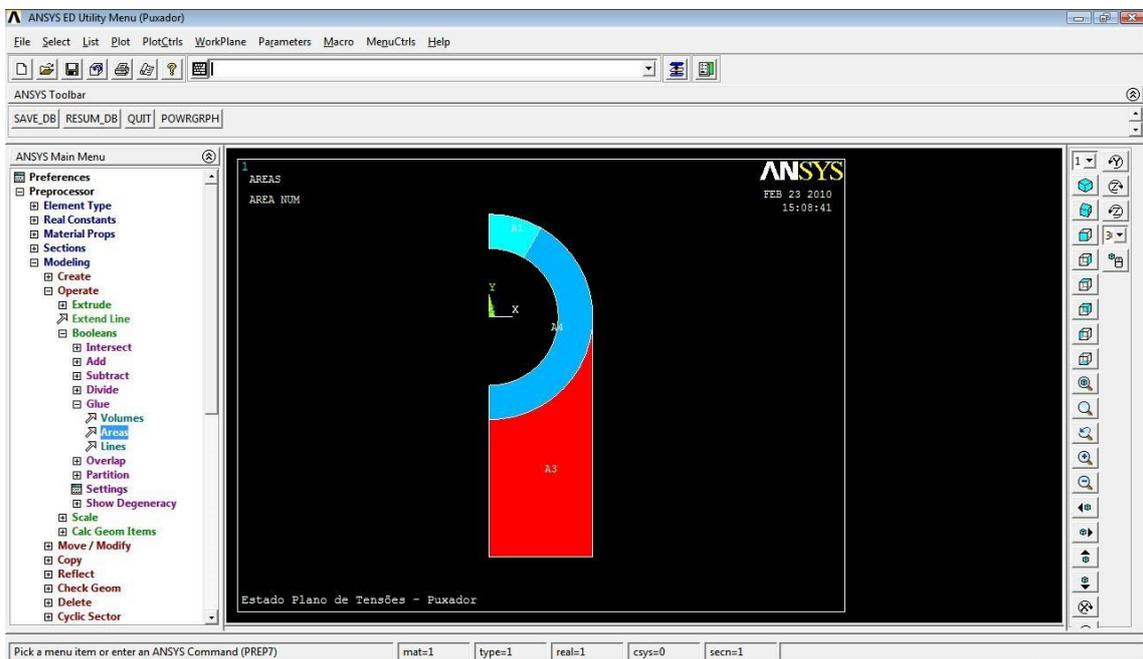


- ✓ Para operar as áreas: Área 5 = Área 3 – Área 4;
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Operate”, “Booleans”, “Subtract”, “Areas”;
- ✓ Apontar área 3 e clicar em “APPLY”;

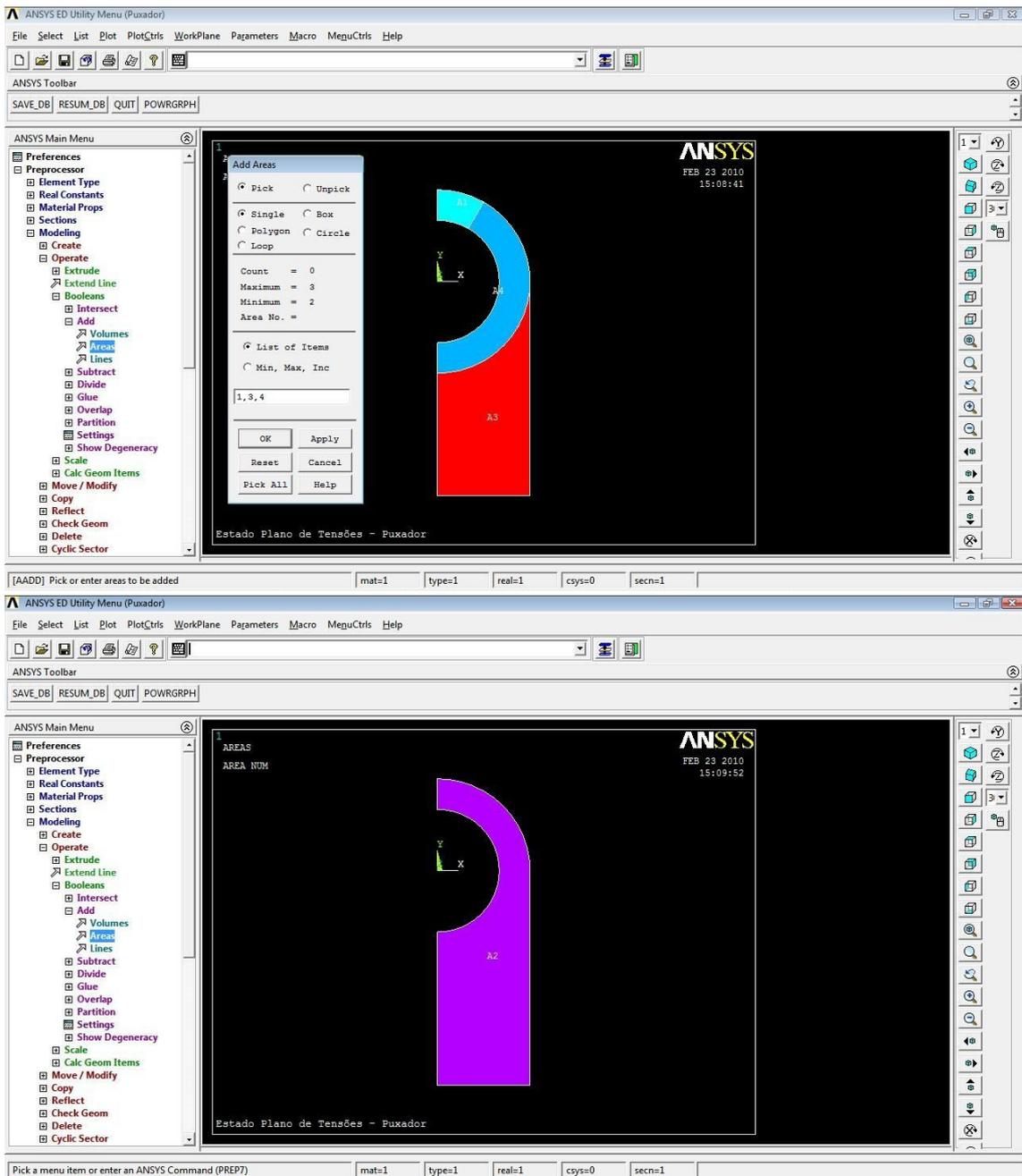
- ✓ Apontar área 4 e clicar em “OK”;



- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Operate”, “Booleans”, “Glue”, “Areas”;
- ✓ Clicar em “**PICK ALL**”;



- ✓ Para operar as áreas: Área 2 = Área 1 + Área 3 + Área 4
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Operate”, “Booleans”, “Add”, “Areas”;
- ✓ Apontar áreas 1,3 e 4 e clicar em “OK”.



2.4.3. Salva análise no arquivo Aula7.db:

- ✓ No “ANSYS Toolbar, clicar em “SAVE_DB”.

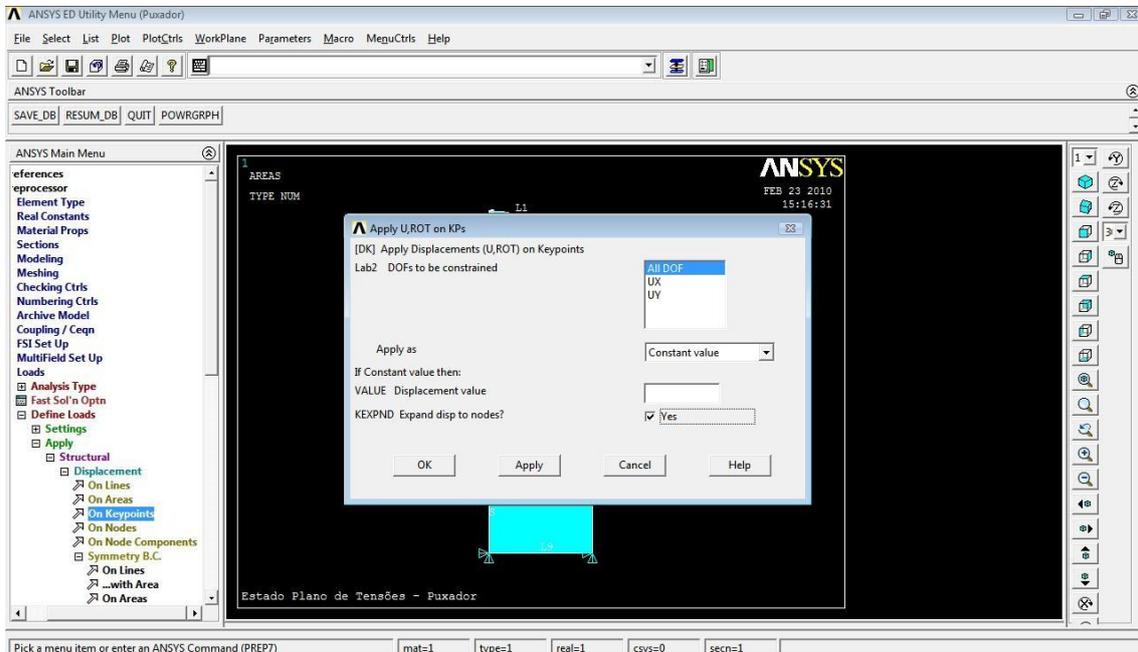
F

2.5. Aplicar as condições de contorno na modelagem sólida:

2.5.1. Fornece condição de contorno:

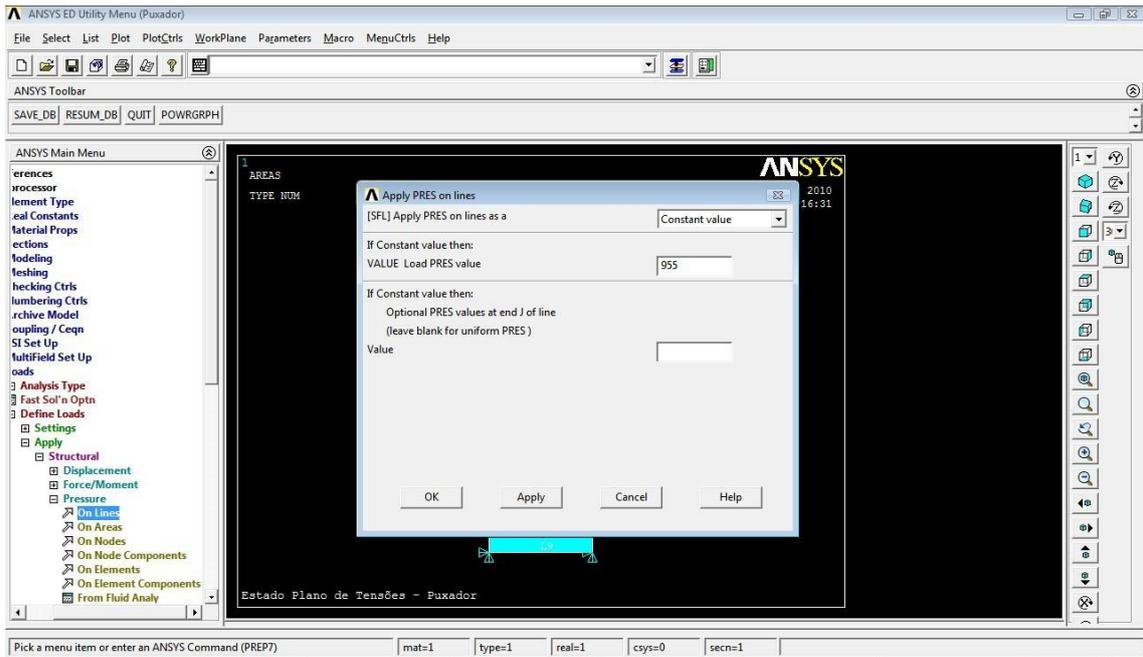
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Loads”, “Define Loads”, “Apply”, “Structural”, “Displacement”, “Symmetry B.C.”, “On Lines”;
- ✓ Na nova janela que abrir apontar as linhas **2, 8 e 11** e clicar em “OK”;
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Loads”, “Define Loads”, “Apply”, “Structural”, “Displacement”, “On Keypoints”;

- ✓ Apontar os Keypoints **9 e 10** e clicar em “OK”;
- ✓ Outra janela irá aparecer então selecionar no campo “DOFs to be constrained” a opção “**ALL DOF**” e selecionar:
 - KEXPND **Yes**;
- ✓ Clicar em “OK”;



2.5.2. Aplicar as cargas:

- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Loads”, “Define Loads”, “Apply”, “Structural”, “Pressure”, “On Lines.”;
- ✓ Apontar a linha **3** e clicar em “OK”;
- ✓ Na nova janela inserir o valor da carga a ser distribuída na linha:
 - VALI **955**;
 - VALJ **0**;
- ✓ Clicar em “OK”;



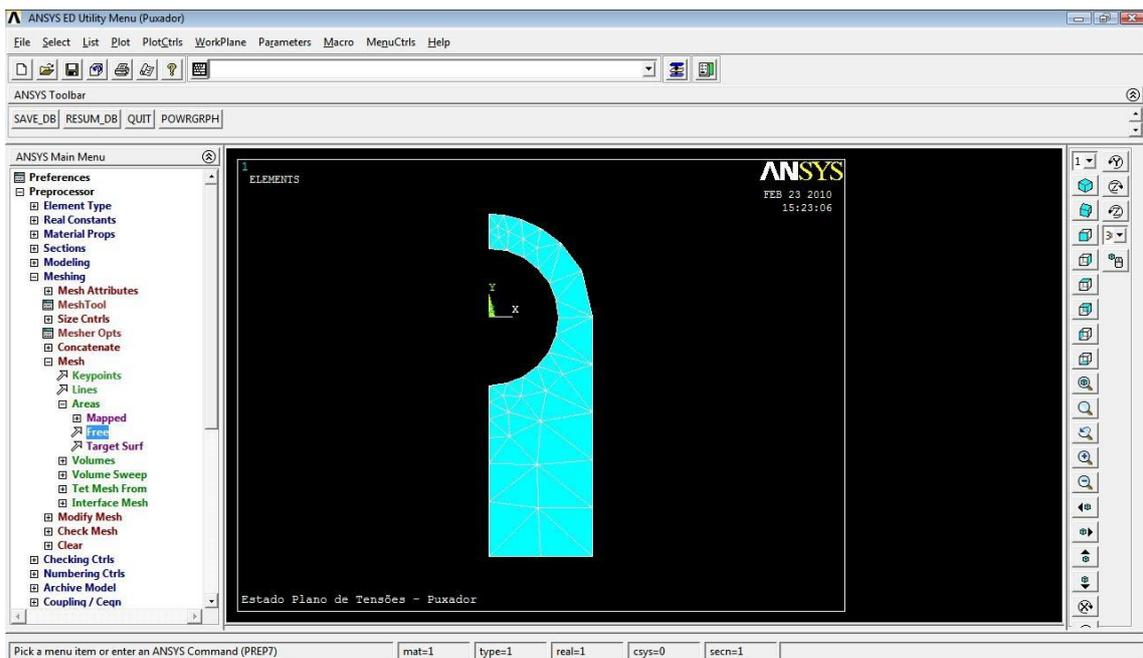
2.5.3. Salvando dados no arquivo Aula7.db

- ✓ No ANSYS Toolbar clicar em “SAVE_DB”.

G

2.6. Gera a malha de elementos finitos:

- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Meshing”, “Mesh”, “Areas”, “Free”;
- ✓ Clicar em “PICK ALL”;
- ✓ Clicar em “OK”



H

3. SOLUÇÃO

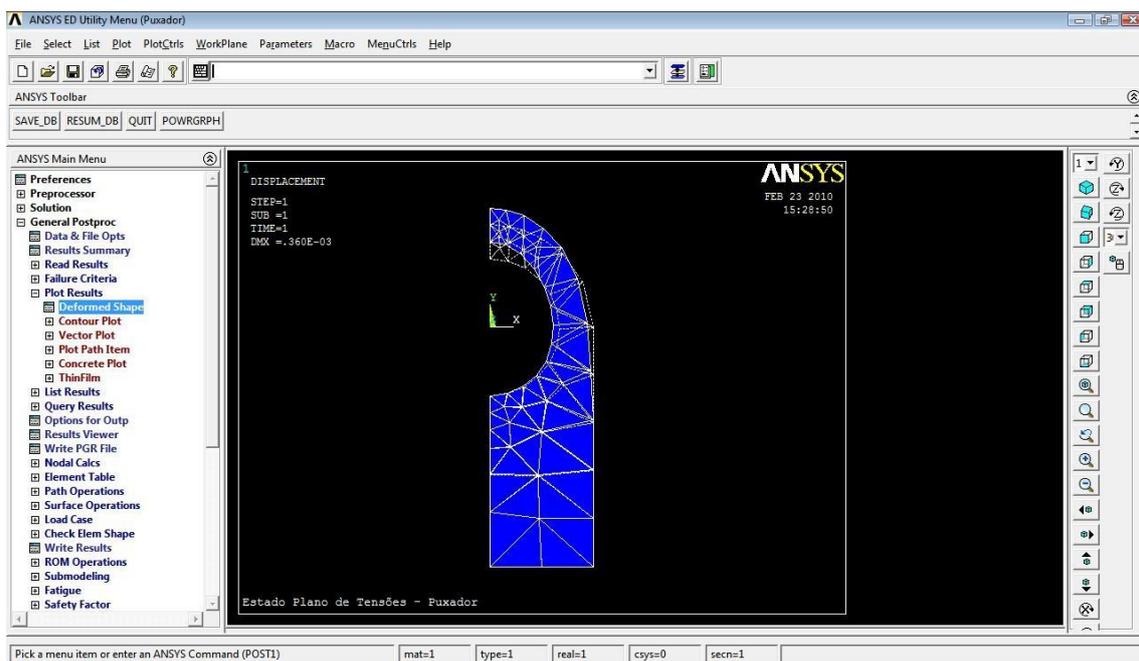
- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do “Solution” clicar em “Solve”, “Current LS”;
- ✓ Clicar em “OK”.
- ✓ Na janela “Information: Solution is done” clicar em “CLOSE”.
- ✓ No ANSYS Toolbar clicar em “SAVE_DB” para salvar os dados mais a solução no arquivo.

I

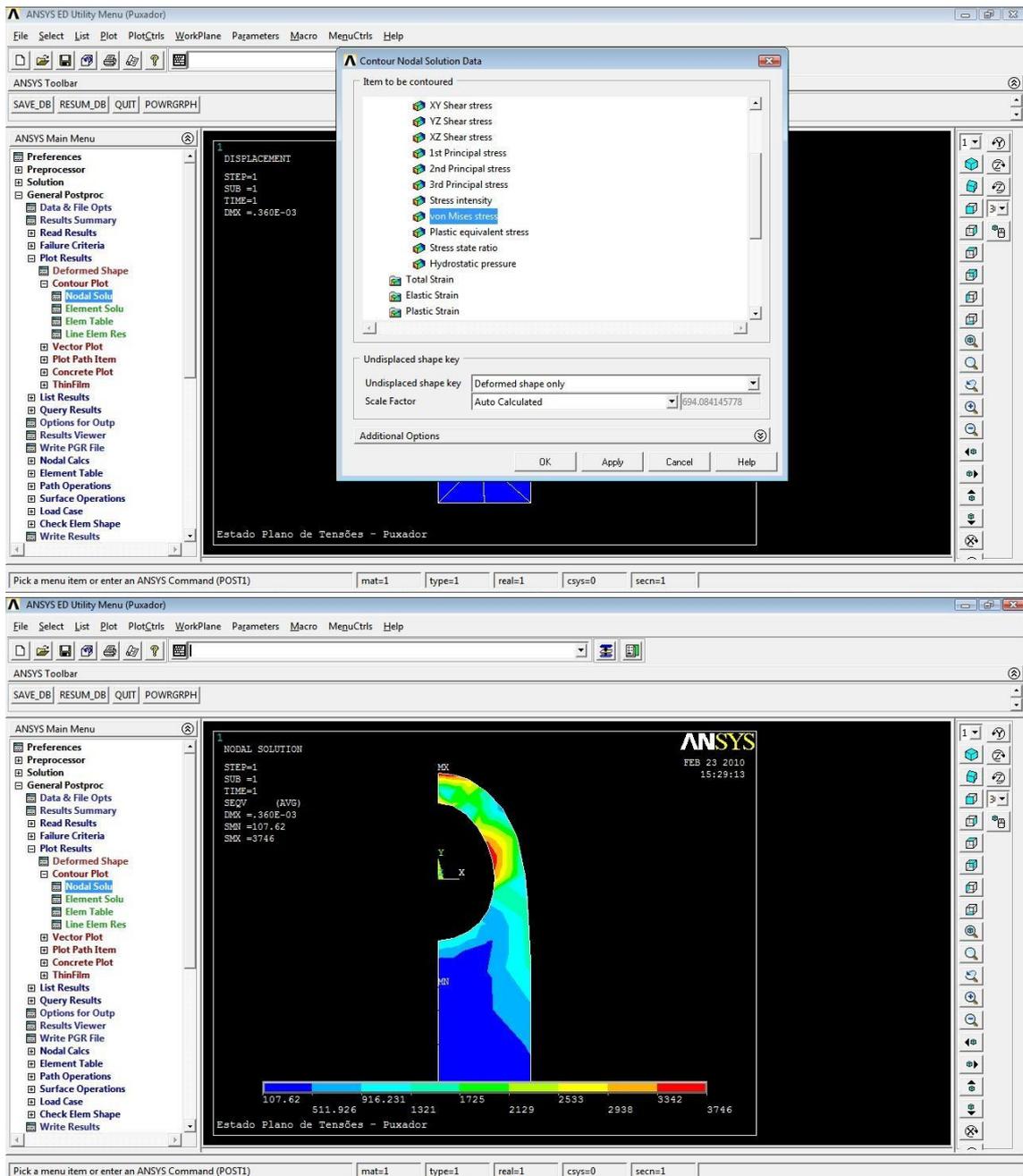
4. PÓS PROCESSAMENTO

4.1. Gera, lista e plota os resultados:

- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do “General Postproc” clicar em “Plot Results”, “Deformed Shape” para visualizar a configuração deformada da estrutura;
- ✓ Na janela “Plot Deformed Shape”, seleccionar a opção “Def+undeformed” e clicar em “OK”;

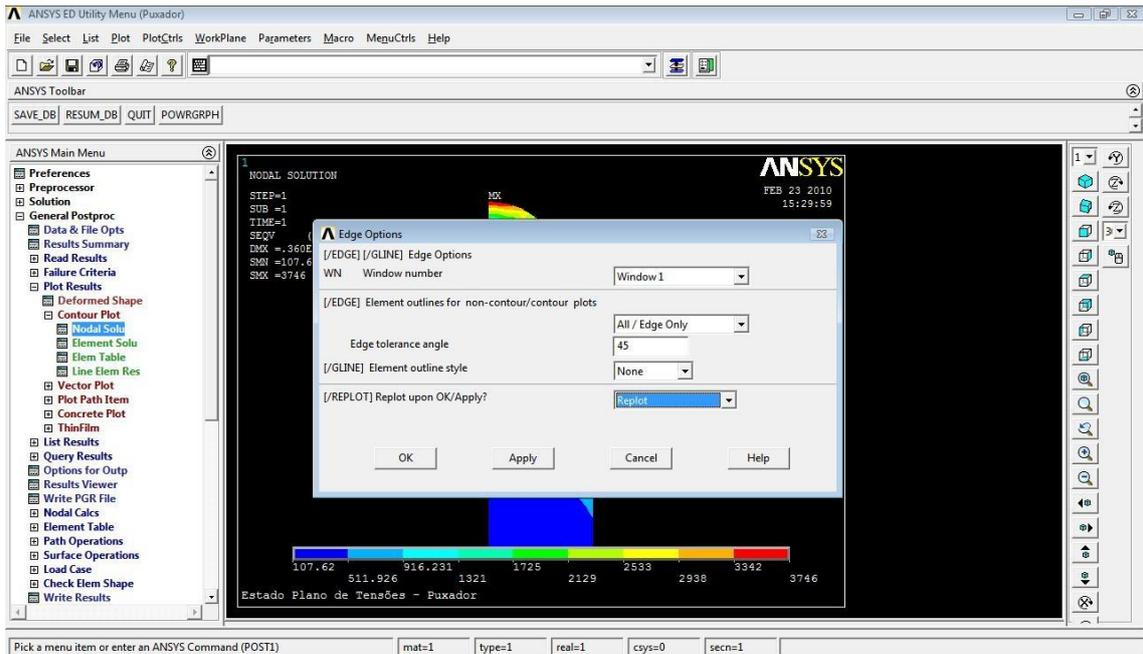


- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do “General Postproc” clicar em “Plot Results”, “Contour Plot”, “Nodal Solu”;
- ✓ Na nova janela seleccionar:
 - Stress;
 - Von Mises Stress
- ✓ Clicar em “OK”;

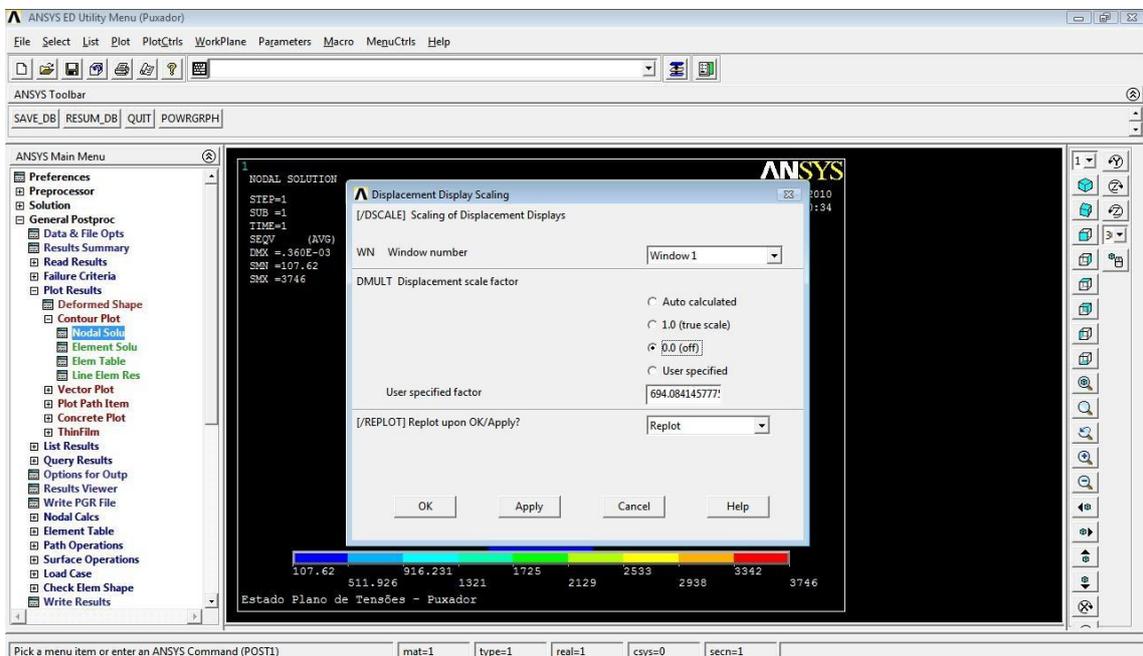


4.1.1. Esconde a malha de elementos finitos e plota à estrutura indeformada:

- ✓ No “ANSYS Utility Menu”, selecionar “Plot Ctls”, “Style”, “Edge Options”;
- ✓ Na nova janela, Escolher:
 - [/GLINE] Element outline style... **None**
 - [/REPLOTT] **Replot**
- ✓ Clicar em “OK”;

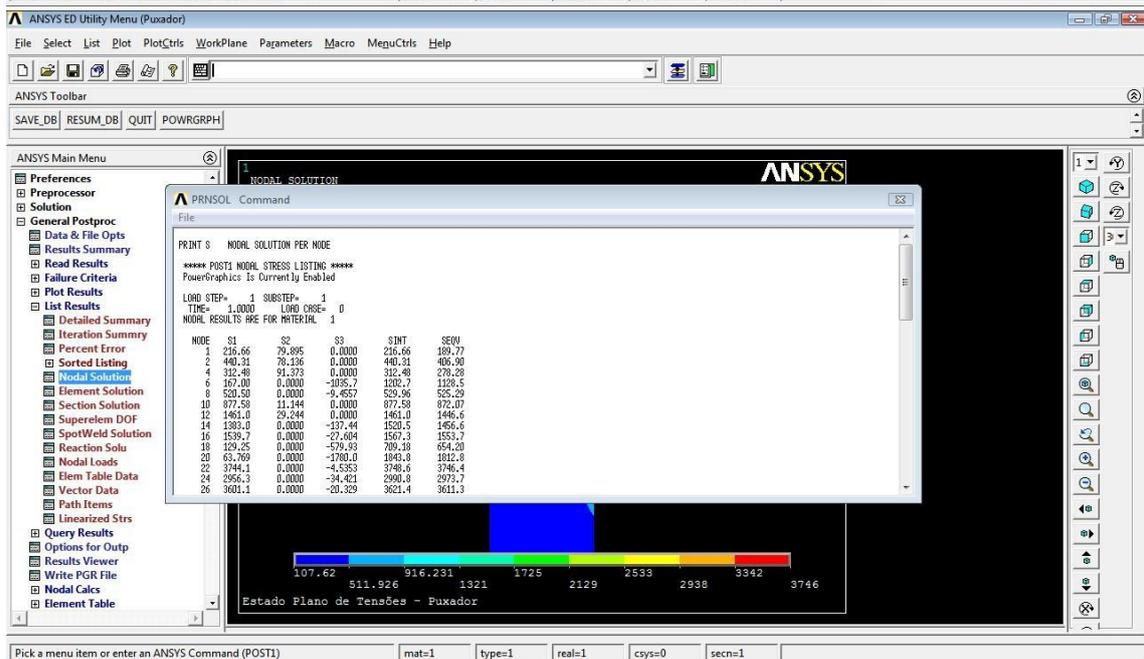
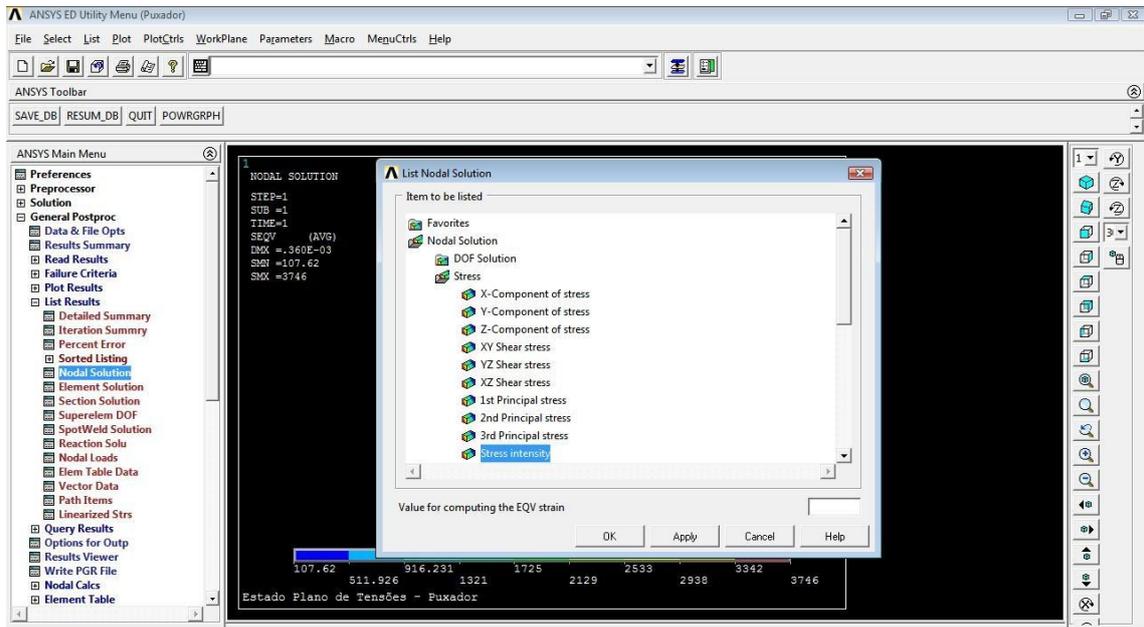


- ✓ No “ANSYS Utility Menu”, seleccionar “Plot Ctl”, “Style”, “Displacement Scaling”;
- ✓ Na nova janela, Escolher:
 - [/DSCALE] Scaling of Displacement Displays
 - DMULT **0.0 (off)**;
- ✓ Clicar em “OK”;

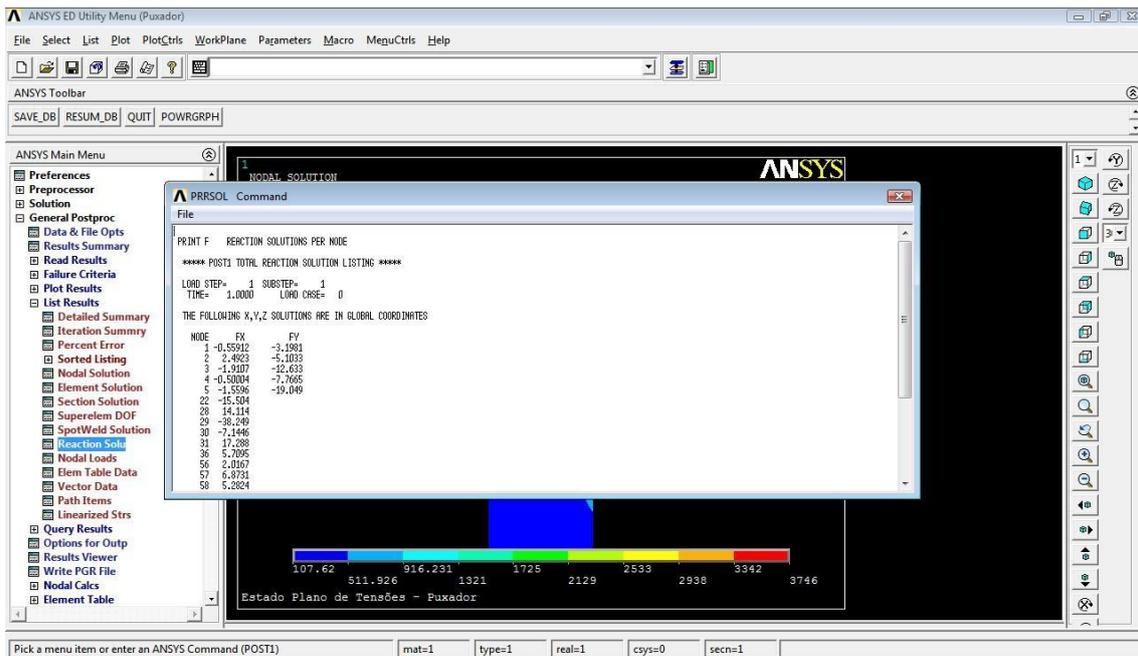


- 4.1.2. *Continuação dos resultados:*
- ✓ No “ANSYS Main Menu” dentro do “General Postproc” clicar em “List Results”, “Nodal Solution” para listar resultados dos nós e elementos;
 - ✓ Seleccionar na janela que abrir:
 - Stress

- Stress Intensity;
- ✓ Clicar em “OK”;



- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do “General Postproc” clicar em “List Results”, “Reaction Solution” para listar as reações nodais;
- ✓ Inserir na janela que abrir:
 - Lab All Struc Force F
- ✓ Clicar em “OK”;



B) SEGUNDO ESTUDO (melhorar malha de elementos finitos visando melhorar os resultados obtidos)

J

5. REINÍCIO DA ANÁLISE

5.1. *Limpa memória:*

- ✓ No “ANSYS Utility Menu”, clicar em “File”, “Clear and Start New”;
- ✓ Na nova janela, selecionar “Do Not Read File” e clicar em “OK”;
- ✓ Uma nova janela aparecerá, então confirmar clicando em “Yes”

5.2. *Carrega arquivo previamente salvo:*

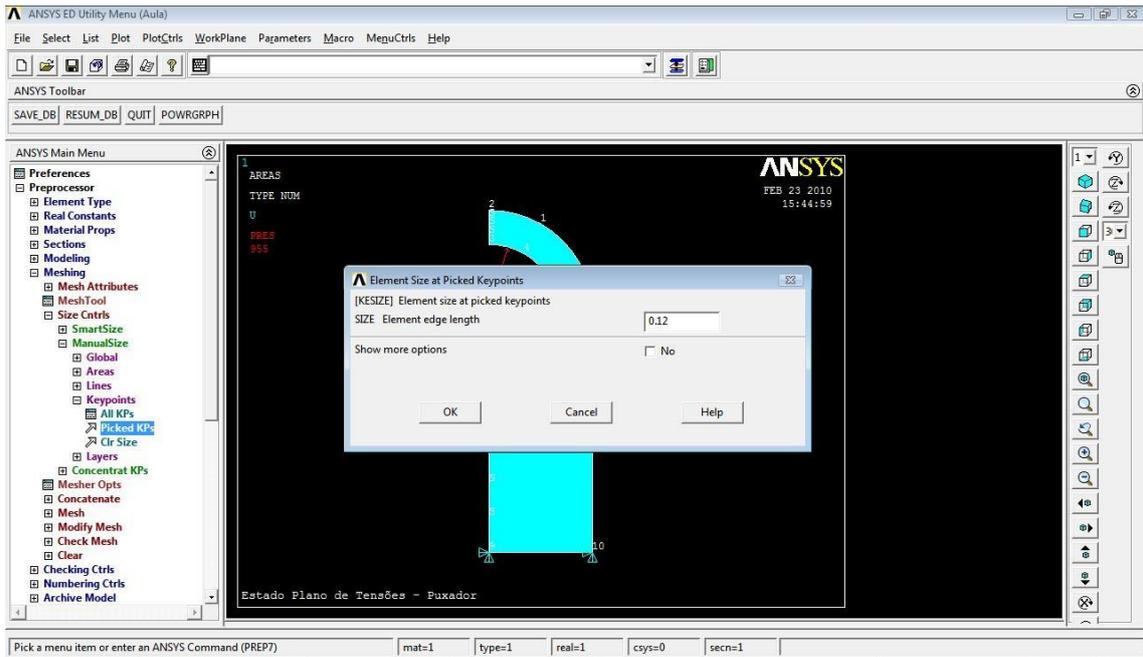
- ✓ No “ANSYS Utility Menu”, clicar em “File”, “Resume from...”;
- ✓ Abrir o arquivo “Aula7.db”.

K

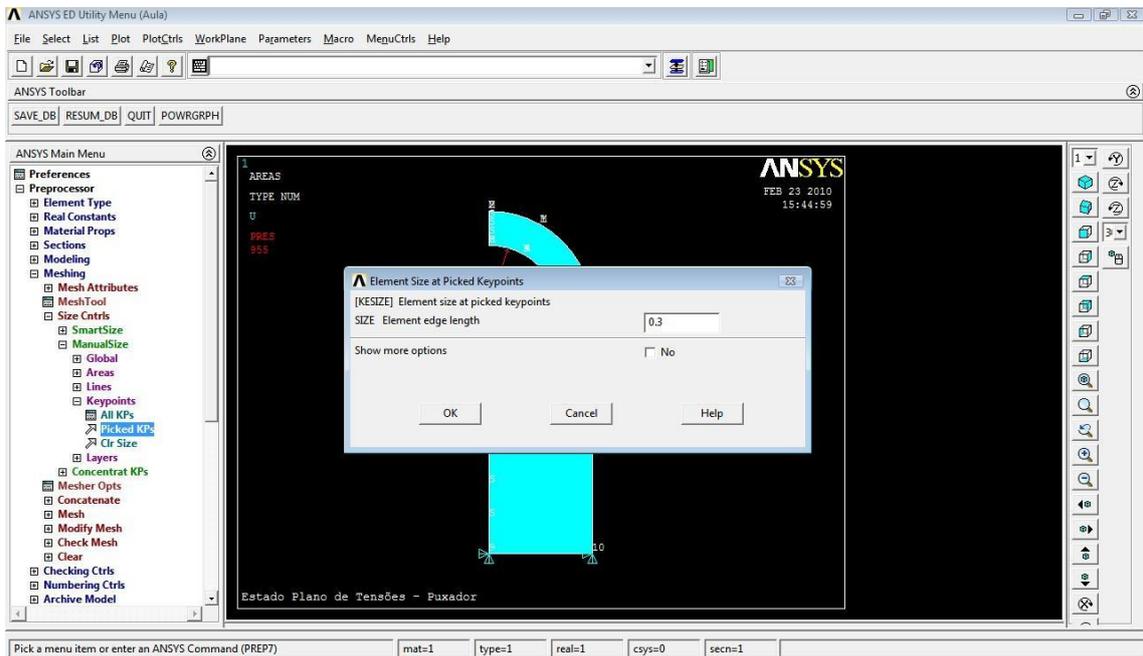
6. ENTRA NO PRÉ-PROCESSAMENTO

6.1. *Definindo uma nova densidade para a malha de elementos finitos:*

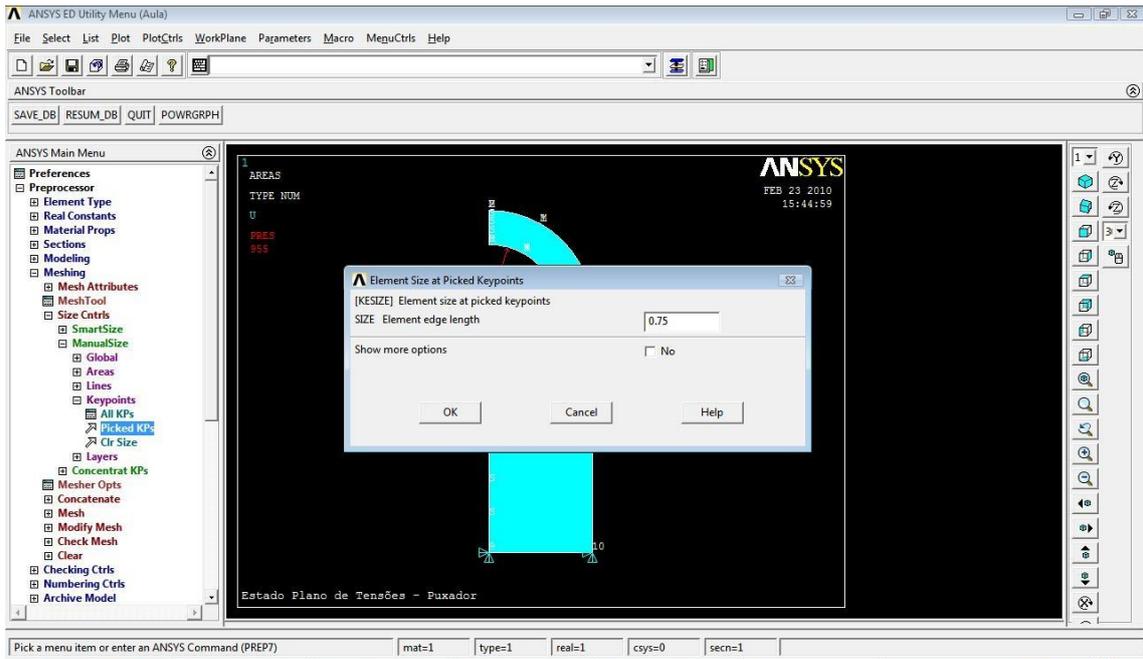
- ✓ No “ANSYS Main Menu” dentro do “Preprocessor” clicar em “Meshing”, “Size Cntrls”, “Manual Size”, “Keypoints”, “Picked KPs”;
- ✓ Apontar os Keypoints 3, 2, 4, 1 e 11 e clicar em “APPLY”;
- ✓ Na nova janela inserir [KESIZE]:
 - SIZE **0.12;**
- ✓ Clicar em “APPLY”;



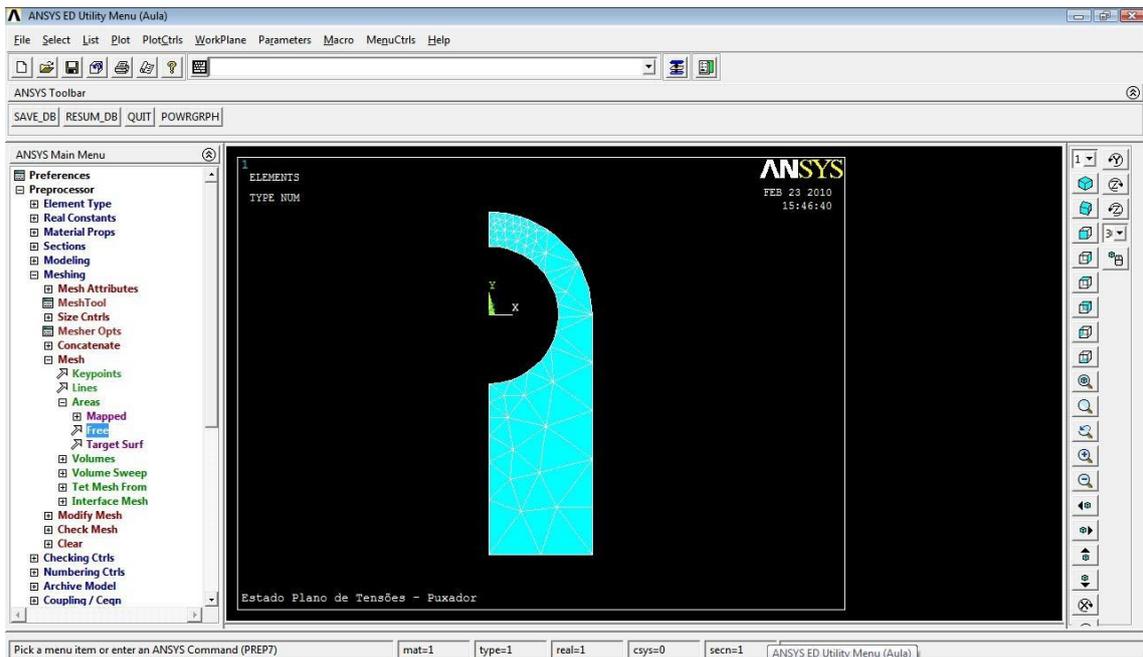
- ✓ Apontar o keypoint 8 e clicar em “APPLY”;
- ✓ Na nova janela inserir [KESIZE]:
 - SIZE **0.30**;
- ✓ Clicar em “APPLY”;



- ✓ Apontar o keypoint 11 e clicar em “OK”;
- ✓ Na nova janela inserir [KESIZE]:
 - SIZE **0.75**;
- ✓ Clicar em “OK”;



- ✓ No “ANSYS Main Menu” dentro do “Preprocessor” clicar em “Meshing”, “Mesh”, “Areas”, “Free”;
- ✓ Apontar a área 2 e clicar em “OK”.



L

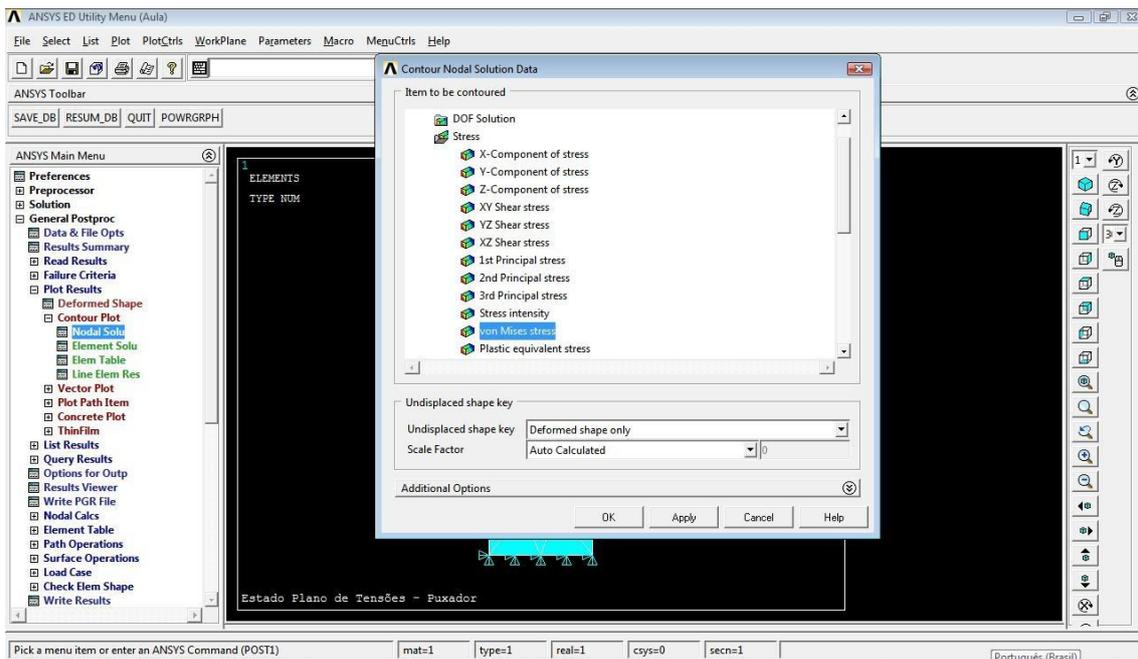
7. SOLUÇÃO

- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do “Solution” clicar em “Solve”, “Current LS”;
- ✓ Clicar em “OK”.
- ✓ Na janela “Information: Solution is done” clicar em “CLOSE”.

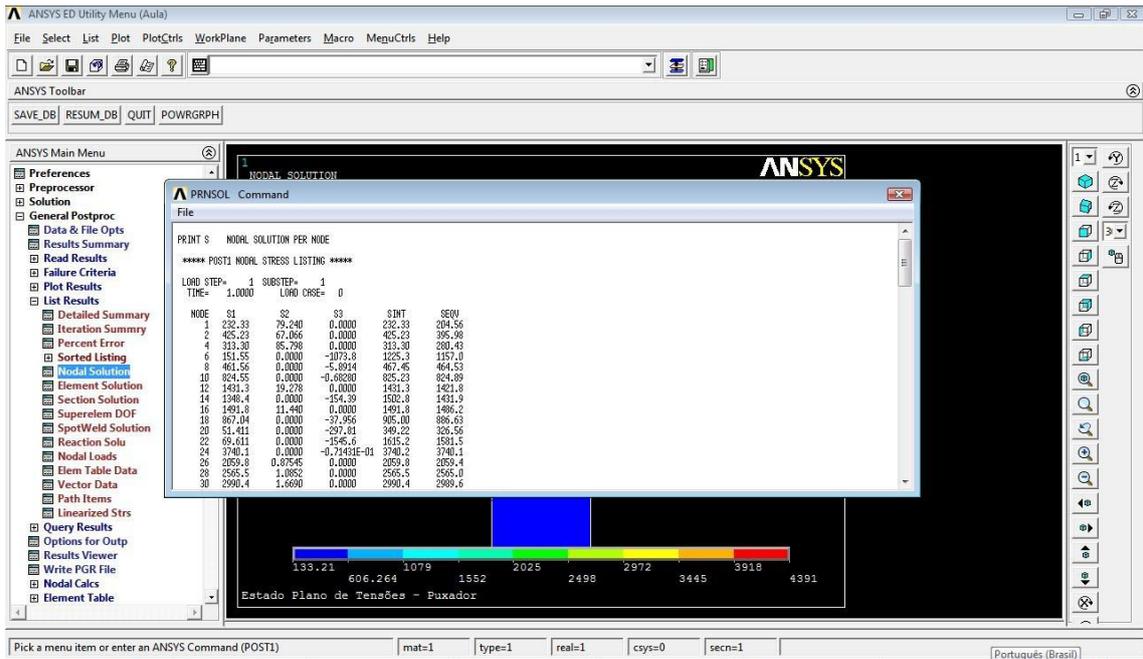
8. PÓS PROCESSAMENTO

4.1. Gera, lista e plota os resultados:

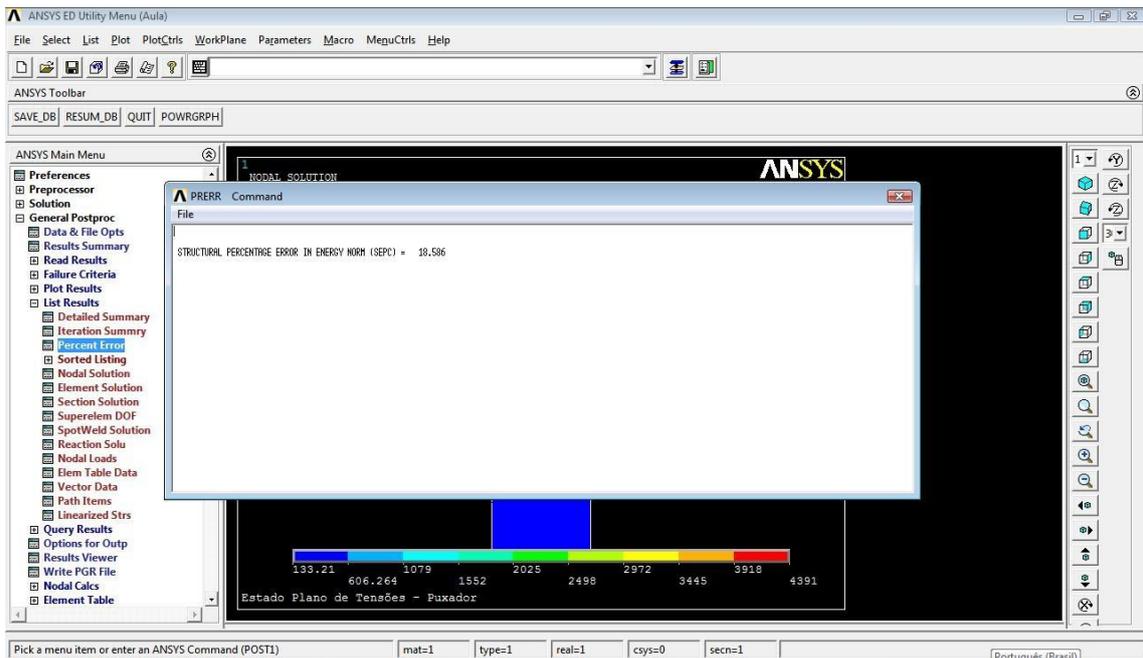
- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do “General Postproc” clicar em “Plot Results”, “Contour Plot”, “Nodal Solu”;
- ✓ Na nova janela selecionar:
 - Stress;
 - **Von Mises Stress**
- ✓ Clicar em “OK”;



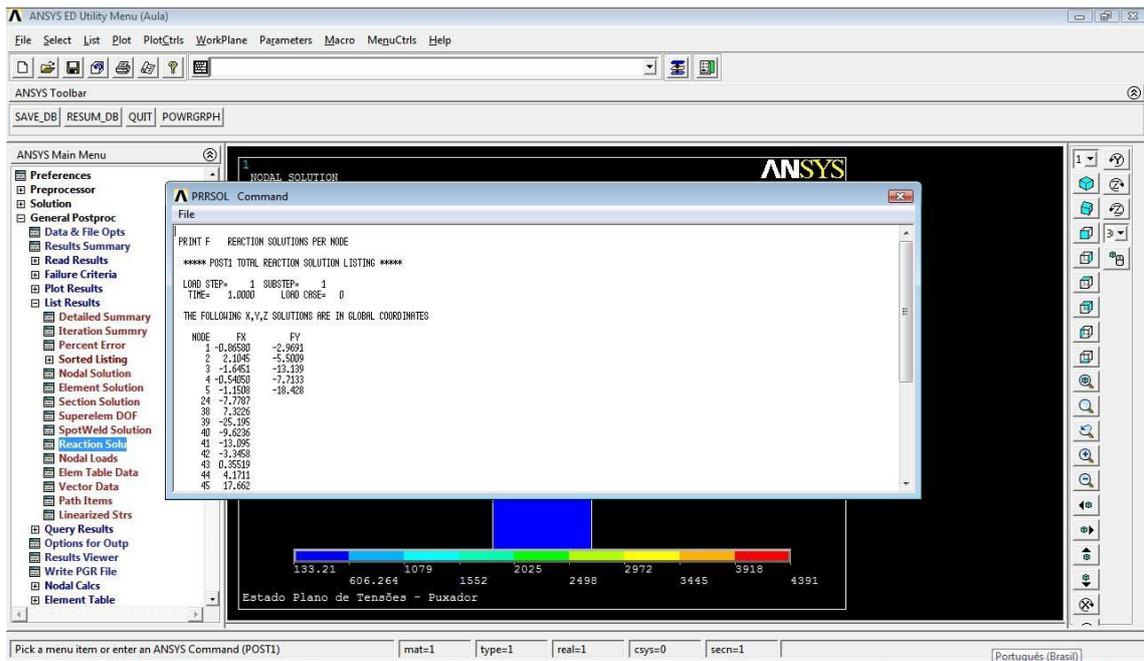
- ✓ No “ANSYS Main Menu” dentro do “General Postproc” clicar em “List Results”, “Nodal Solution” para listar resultados dos nós e elementos;
- ✓ Selecionar na janela que abrir:
 - Stress
 - **Stress Intensity;**
- ✓ Clicar em “OK”;



- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do “General Postproc” clicar em “List Results”, “Percent Error” para listar a porcentagem de erro;



- ✓ Erro = 18.586.
- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do “General Postproc” clicar em “List Results”, “Reaction Solution” para listar as reações nodais;
- ✓ Inserir na janela que abrir:
 - Lab **All Struc Force F**
- ✓ Clicar em “OK”;



C) TERCEIRO ESTUDO (melhorar malha de elementos finitos visando melhorar os resultados obtidos)

N

9. REINÍCIO DA ANÁLISE

9.1. *Limpa memória:*

- ✓ No "ANSYS Utility Menu", clicar em "File", "Clear and Start New";
- ✓ Na nova janela, selecionar "Do Not Read File" e clicar em "OK";
- ✓ Uma nova janela aparecerá, então confirmar clicando em "Yes"

9.2. *Carrega arquivo previamente salvo:*

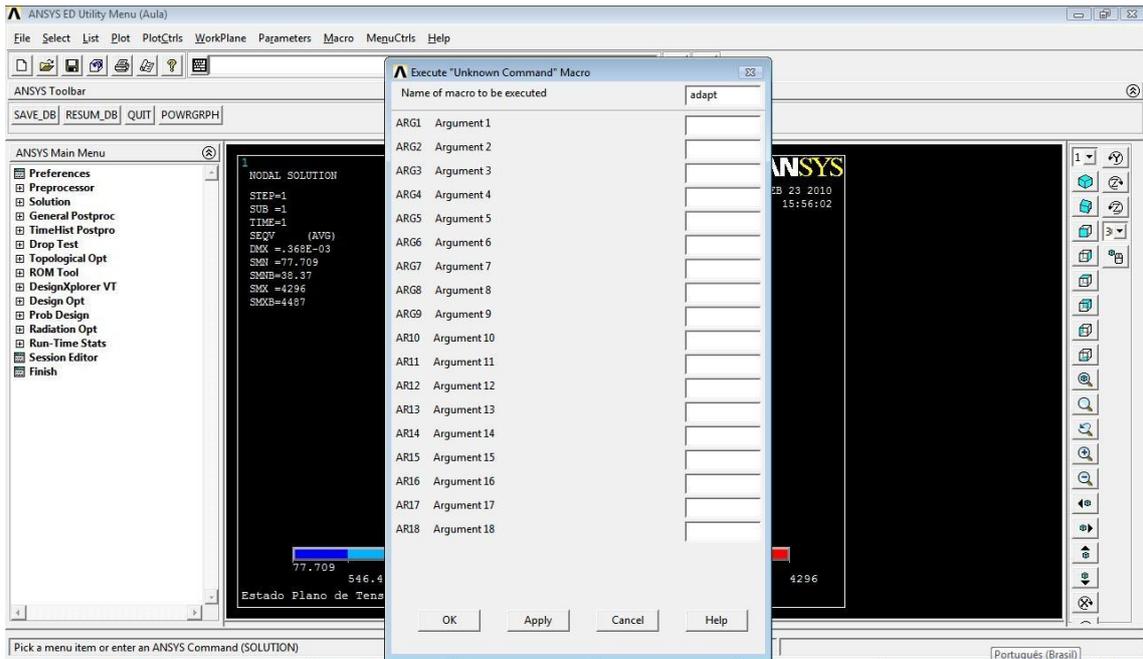
- ✓ No "ANSYS Utility Menu", clicar em "File", "Resume from...";
- ✓ Abrir o arquivo "Aula7.db".

O

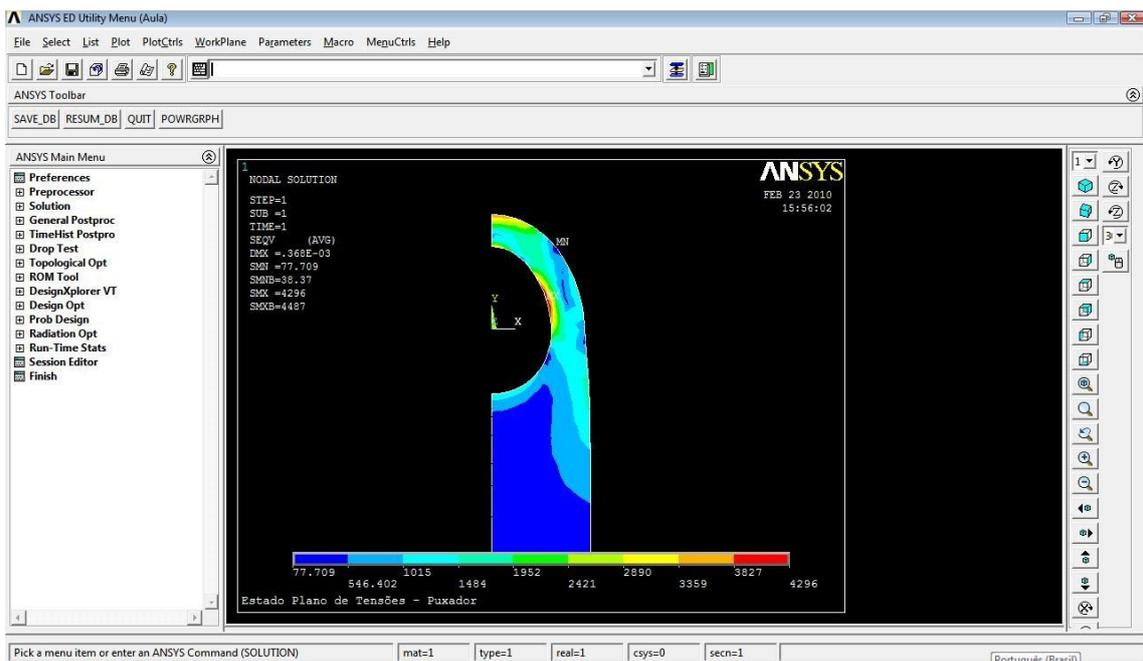
10. ENTRA NO PRÉ-PROCESSAMENTO

10.1. *Definindo uma nova densidade para a malha de elementos finitos usando o adaptador de malhas – com método h – utiliza redefinição de malha:*

- ✓ No "ANSYS Utility Menu" clicar em "Macro", "Execute Macro";
- ✓ Na nova janela, inserir:
 - Name of macro to be executed **adapt**
- ✓ Clicar em "OK".



- ✓ A Macro resolverá o problema utilizando várias malhas de forma a obter a malha que produz um melhor resultado.



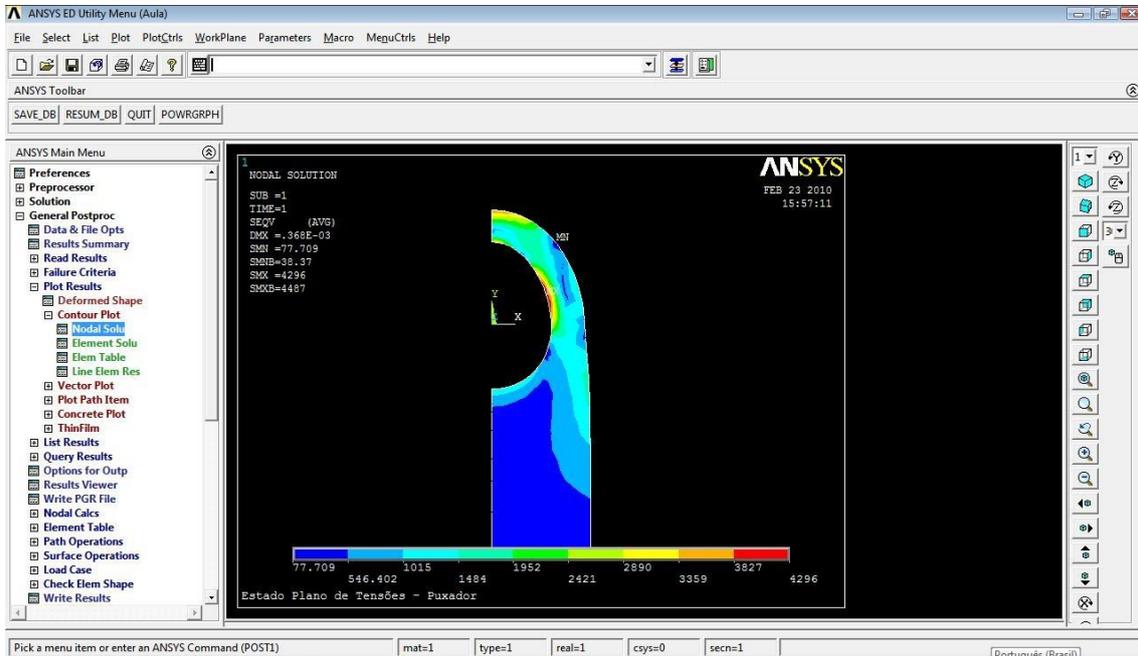
P

11. PÓS PROCESSAMENTO

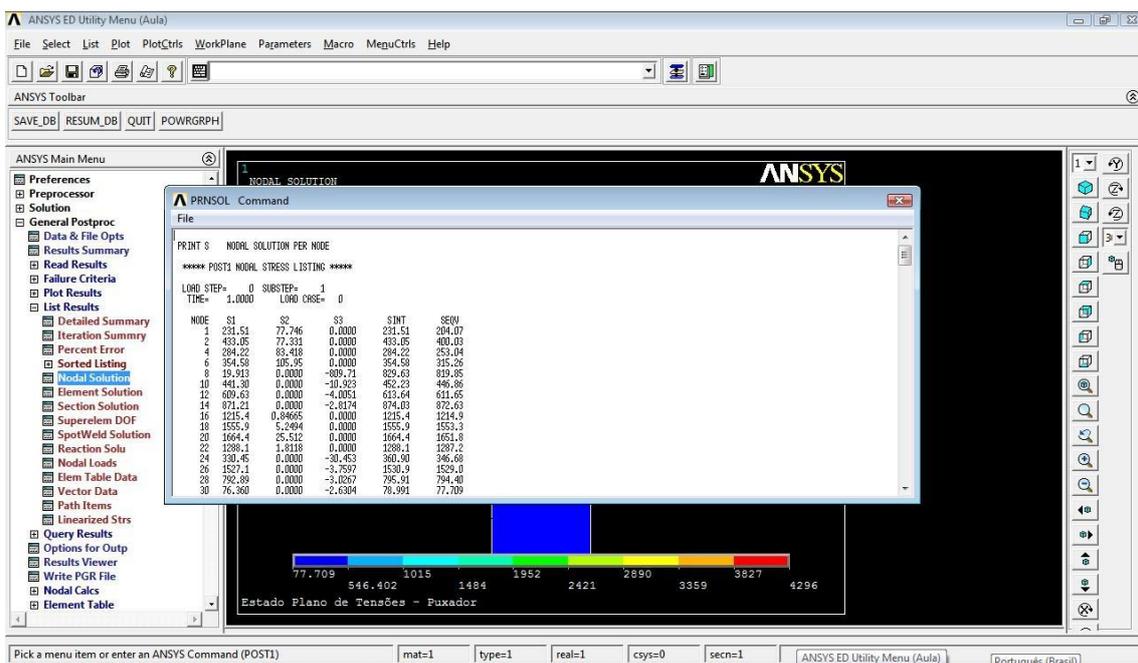
4.1. Gera, lista e plota os resultados:

- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do "General Postproc" clicar em "Plot Results", "Contour Plot", "Nodal Solu";

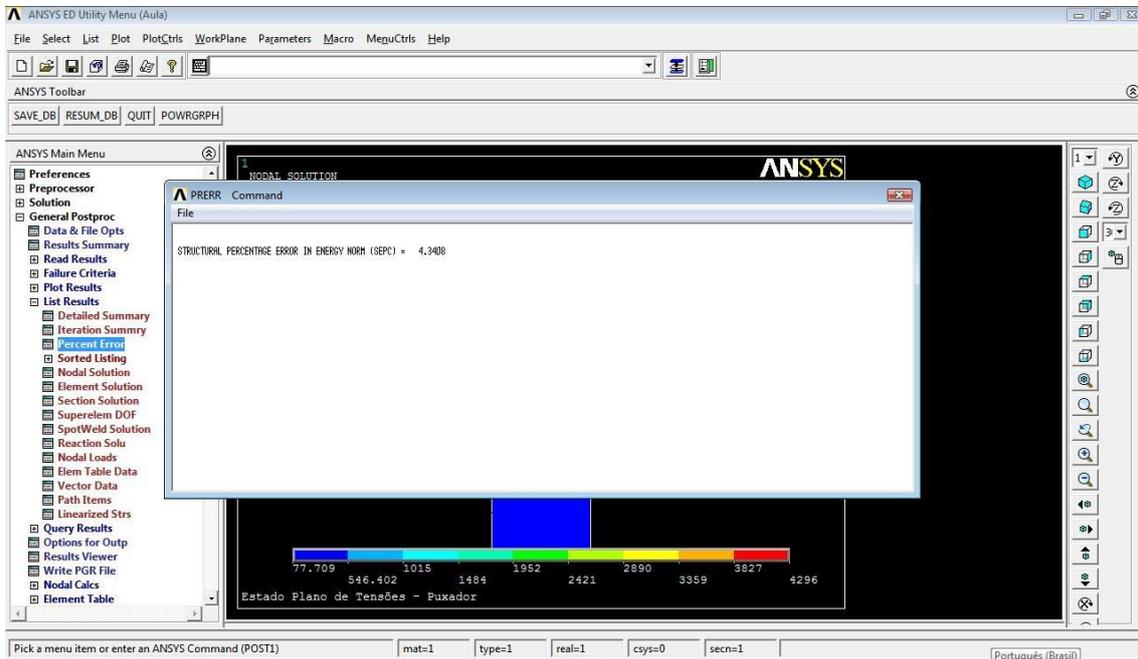
- ✓ Na nova janela selecionar:
 - Stress;
 - **Von Mises Stress**
- ✓ Clicar em “OK”;



- ✓ No “ANSYS Main Menu” dentro do “General Postproc” clicar em “List Results”, “Nodal Solution” para listar resultados dos nós e elementos;
- ✓ Selecionar na janela que abrir:
 - Stress
 - **Stress Intensity;**
- ✓ Clicar em “OK”;

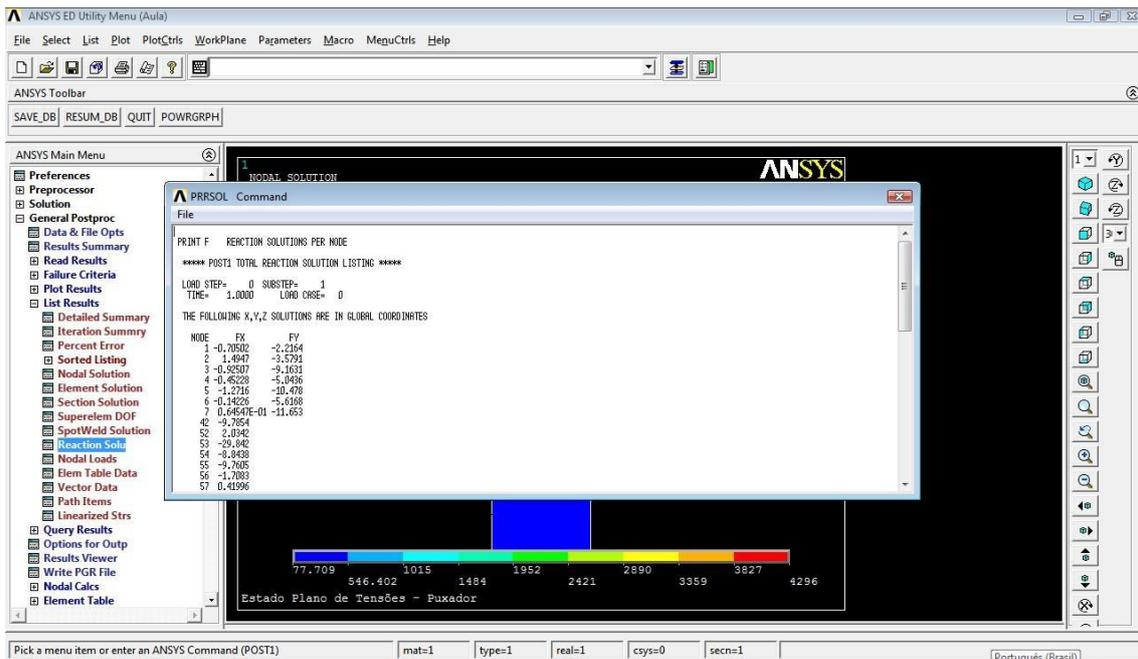


- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do “General Postproc” clicar em “List Results”, “Percent Error” para listar a porcentagem de erro;



- ✓ Erro = 4.3408.

- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do “General Postproc” clicar em “List Results”, “Reaction Solution” para listar as reações nodais;
- ✓ Inserir na janela que abrir:
 - Lab **All Struc Force F**
- ✓ Clicar em “OK”;



12. SALVANDO ARQUIVOS E SAINDO DO PROGRAMA:

- ✓ No ANSYS Tollbar, clicar em “SAVE_DB” para salvar no Data Base;
- ✓ Ainda no ANSYS Toolbar, clicar em “QUIT”;
- ✓ Na nova janela, selecionar a opção “Save everything” e clicar em “OK”.