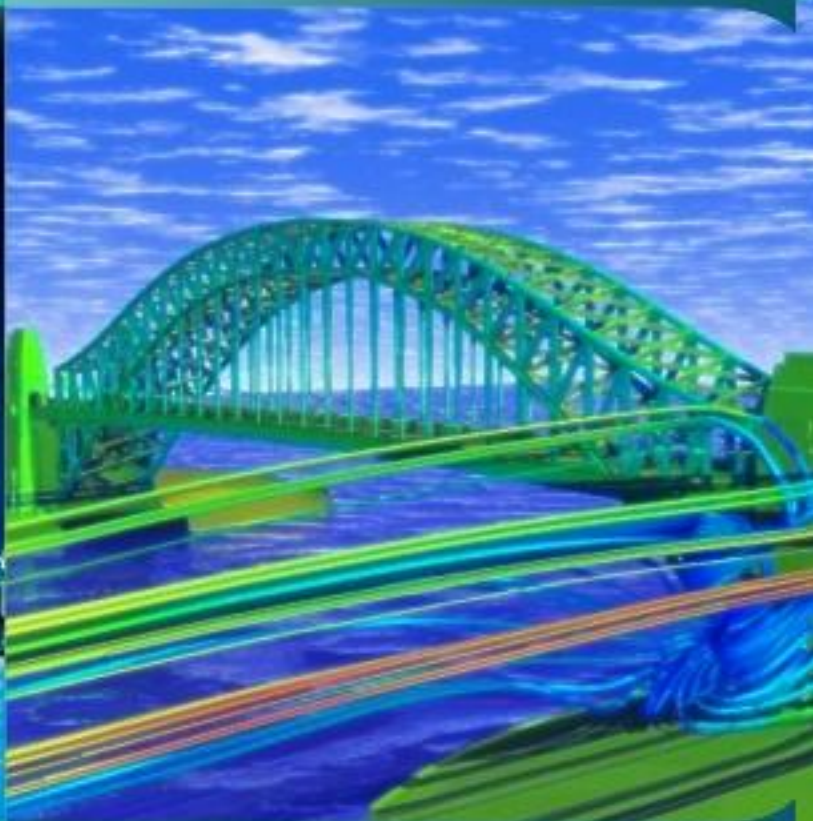




**2010**

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



**Prof<sup>a</sup>. Mildred B. Hecke  
Universidade Federal do Paraná  
Versão 1.0.0.0**



**VASOS DE PRESSÃO**

# VASOS DE PRESSÃO

## INTRODUÇÃO

Vasos de pressão são reservatórios que contém fluídos (líquidos ou gases) que em geral estão armazenados no seu interior. Eles devem ser projetados para resistir com segurança a pressões internas e externas. De uso comum em refinarias de petróleo, indústrias químicas e petroquímicas, os vasos de pressão constituem um conjunto importante de equipamentos que abrangem os mais variados usos. O projeto e a construção de vasos de pressão envolvem uma série de cuidados especiais e exige o conhecimento de normas e materiais adequados para cada tipo de aplicação, pois suas falhas podem acarretar consequências catastróficas até mesmo com perda de vidas, sendo considerados equipamentos de grande periculosidade. Podem ser de paredes finas e de paredes espessas.



Figura 1 – Exemplos de vasos de pressão (fotos retiradas da internet).

**Vasos de Pressão de paredes finas e semi-espessas (Estruturas de Cascas)** – Podem-se citar com exemplo desse caso, os cascos de submarinos, os tanques de ar comprimido, os extintores de incêndio, as latas de spray e etc. Em geral, a seguinte relação é satisfeita:  $r / t > 10$ , onde  $r$  é o raio e  $t$  é a espessura da parede do vaso de pressão. A figura 2 mostra a foto e o esquema de um vaso de pressão esférico. Essas estruturas podem ser estudadas através de modelos estruturais de cascas (“Shell”).

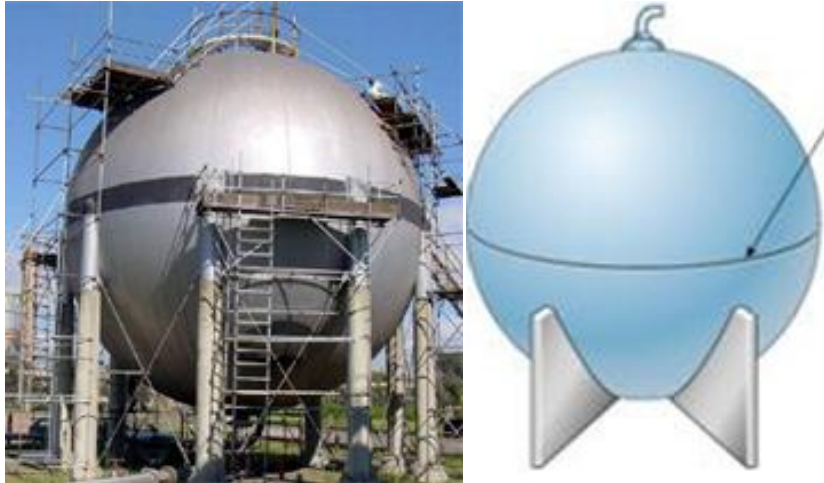


Figura 2 – Vaso de pressão esférico.

**Vasos de Pressão de paredes espessas (Estruturas 3D)** – Podem-se citar com exemplo desse caso, os vasos sanguíneos e as artérias, mostrados esquematicamente na figura 3. Devem ser estudados através de modelos sólidos tridimensionais.

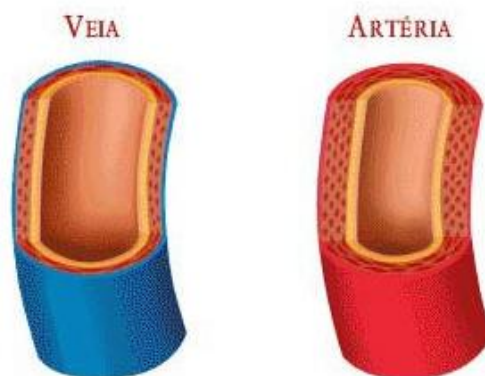


Figura 3 – Esquema de uma veia e uma artéria.

### **VASO DE PRESSÃO CILÍNDRICO DE PAREDE FINA**

O exemplo a ser apresentado é um vaso de pressão cilíndrico ilustrado na figura 4.

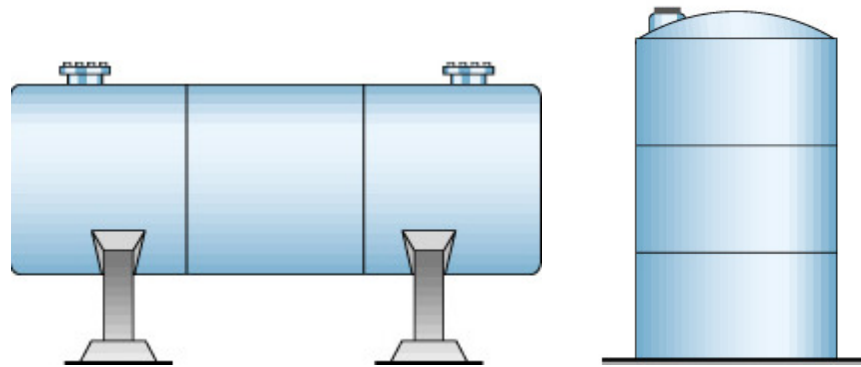


Figura 4 – Ilustrações de vasos de pressão cilíndricos.

As tensões na região central do vaso de pressão podem ser facilmente calculadas com o auxílio da Resistência dos Materiais, pelas expressões:

$$\sigma_1 = \frac{pr}{t}$$

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2t}$$

Obtidas a partir da análise dos esquemas apresentados na figura 5.

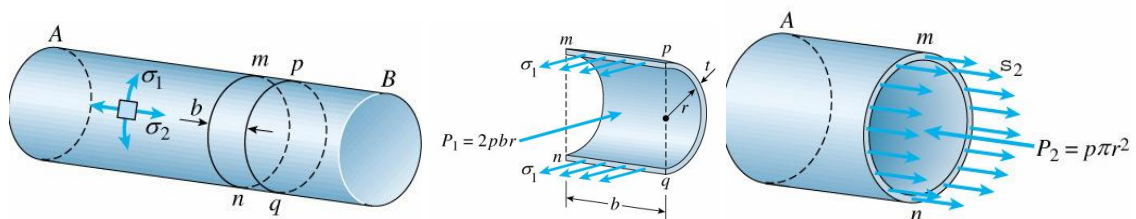


Figura 5 – Esquema de um trecho de um vaso de pressão cilíndrico.

Como exemplo, a figura 6 mostra o esquema da seção transversal de um vaso de pressão feito em ferro fundido ( $E = 14.5 \text{ Msi}$  e  $\nu = 0.21$ ) e está submetido a uma pressão interna de  $p = 1700 \text{ psi}$  que é apresentado em:

<http://www.ndsu.edu/me/images/Kallmeyer/477/Pressure%20Vessel%20Example.pdf>

O vaso de pressão tem um diâmetro interno de 8 in, sendo sua espessura em sua parte cilíndrica de 0,5 in e possui tampas esféricas com 0,25 in de espessura nas extremidades. Além disso, existem dois pequenos sulcos circunferenciais na superfície interna de 1/8 in de raio e um sulco circunferencial profundo de 2 in de largura por 0.25 in de espessura no centro do cilindro.



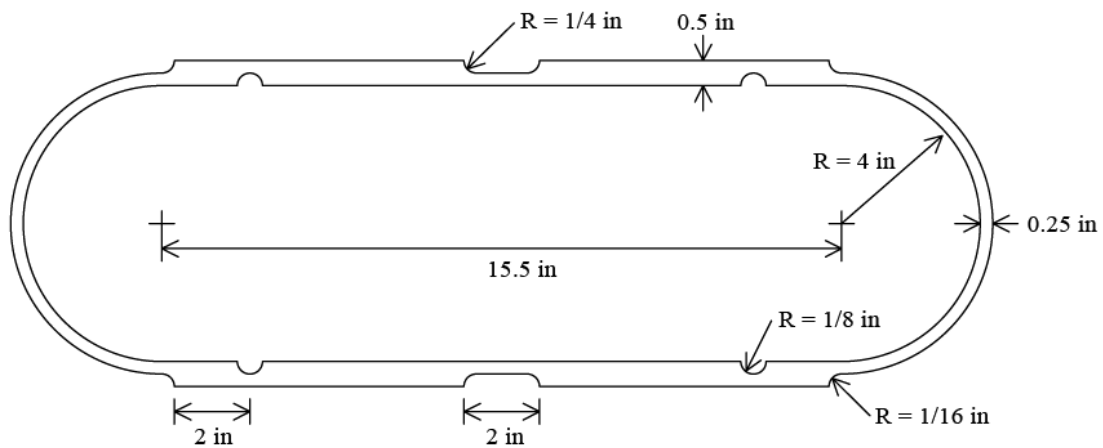


Figura 6 – Esquema da seção transversal do vaso de pressão.

Neste exemplo, o software ANSYS será utilizado para analisar as tensões e deformações nas paredes do vaso de pressão, devido à pressão interna. Já que o vaso de pressão em estudo tem simetria axial sobre o seu eixo longitudinal, uma análise axissimétrica (modelo matemático a ser adotado) poderá ser realizada, utilizando-se para tal um elemento finito plano (por exemplo, o elemento Plane2 - triangular de 6 nós bidimensional), com a opção de axissimetria ativada. Assim, o esforço computacional poderá ser muito reduzido pois apenas a quarta parte do vaso de pressão poderá ser modelado, já que além da axissimetria (eixo longitudinal), existe também um plano transversal de simetria. No software ANSYS, um modelo axissimétrico pode ser criado de maneira que o eixo Y-global seja o eixo de axissimetria e assim, todo o modelo deverá aparecer no primeiro quadrante, ou seja, lado direito do eixo Y-global (ao longo do eixo X-global positivo). Nenhuma parte do modelo (elementos, nós, etc.) pode ser definida com coordenada X negativa. Uma vez que a opção de axissimetria esteja ativada, o software ANSYS aplicará automaticamente condições de contorno de simetria ao longo do eixo Y-global.

Para fins de validação do modelo axissimétrico, as tensões segundo o eixo longitudinal  $\sigma_l$  e segundo o eixo  $\Theta$ ,  $\sigma_\Theta$  nas paredes do vaso de pressão, longe de qualquer dos entalhes podem ser estimadas utilizando as fórmulas acima especificadas. Embora o modelo não satisfaça especificamente o critério para ser considerado como um vaso de pressão de "paredes finas", essas equações ainda podem fornecer valores razoavelmente precisos para fins de validação do modelo. Para um recipiente sob pressão submetido à pressão interna, apenas a tensão radial  $\sigma_r$  deverá variar desde  $\sigma_r = -p = -1,7 \text{ ksi} = -1700 \text{ psi}$  em pontos da superfície interna até o valor zero  $\sigma_r = 0$  em pontos da superfície exterior. Assim, as demais componentes de tensões podem ser calculadas como:

$$\sigma_\Theta = \frac{pr}{t} \quad \text{e} \quad \sigma_l = \frac{pr}{2t}$$

Ou seja, nos pontos de maior espessura ( $t = 0,5$  in):

$$\sigma_{\theta} = 27.200 \text{ psi} \quad \text{e} \quad \sigma_l = 13.600 \text{ psi}$$

E nos pontos de menor espessura ( $t = 0,25$  in):

$$\sigma_{\theta} = 13.600 \text{ psi} \quad \text{e} \quad \sigma_l = 6.800 \text{ psi}$$

### PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS, DOS MATERIAIS E CARGA

- Propriedades geométricas:
  - Como na figura 6;
- Propriedades do material:
  - Módulo de Elásticidade: EX = 14.5 Msi
  - Coeficiente de Poisson: PRXY = 0.21
- Carregamentos:
  - Pressão interna: p = 1700 psi

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: **“Vaso de pressão cilíndrico de paredes finas”**;
- ✓ 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: **“VPcil”**;
- ✓ Clicar em OK.

### 1.3. *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.

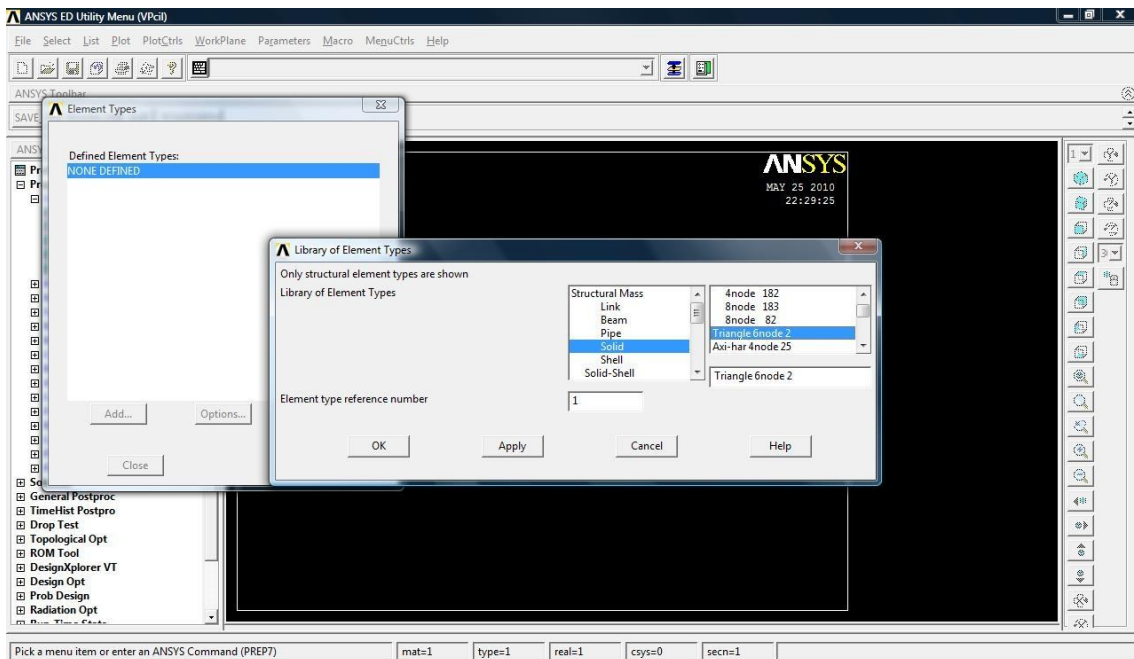
## 2. ENTRA NA FASE DE PRÉ-PROCESSAMENTO

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

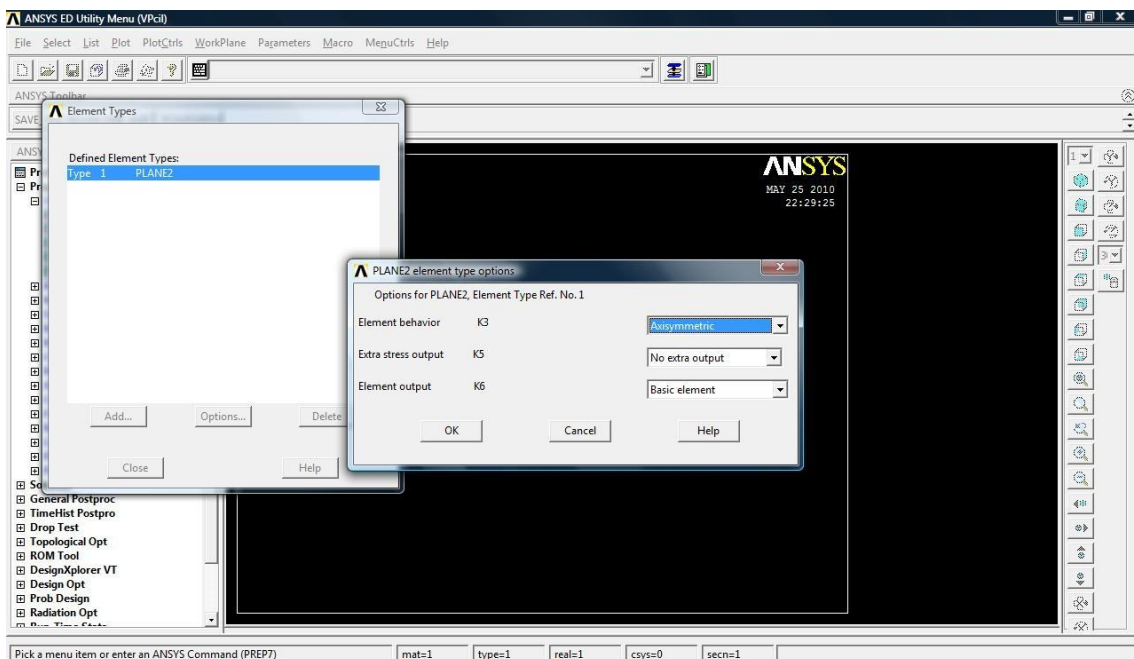
B

### 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      **Axisymmetric**
- ✓ Clicar em “OK”;



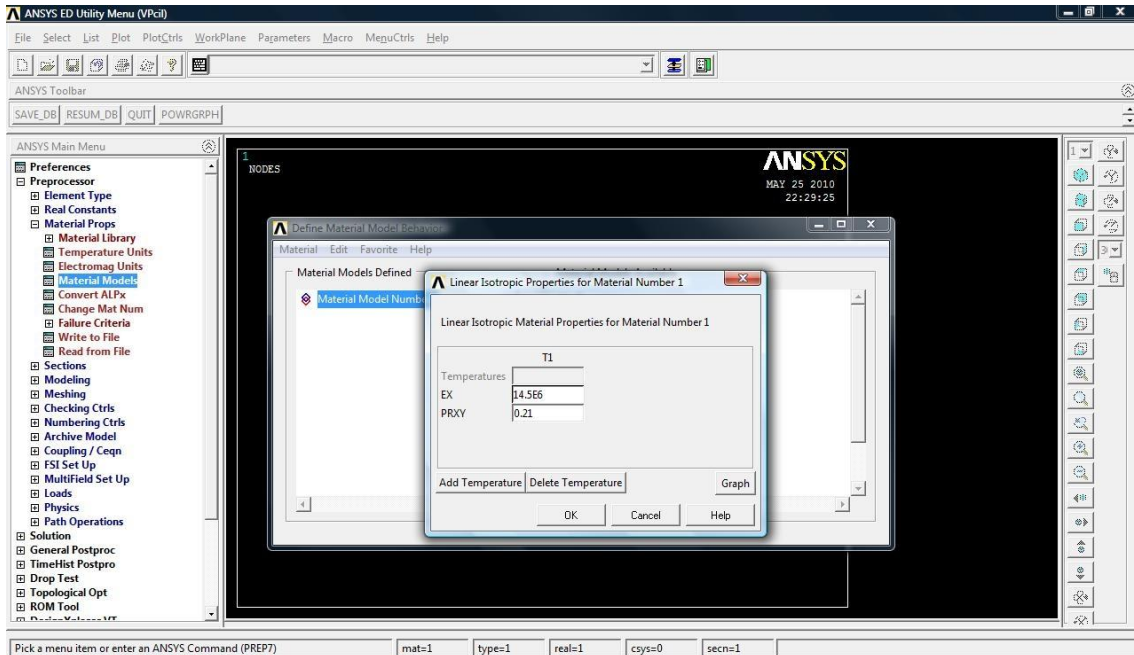
C

## 2.2. **Defina as propriedades do material:**

- ✓ Dentro do “Preprocessor”, seleccionar “Material Props”, “Material Models”;
- ✓ Na nova janela que abrir, para o “Material Model Number 1”, no quadro “Material Models Available” seleccionar: “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 = **14.5E6**;
  - PRXY = **0.21**;
- ✓ Fechar a janela “Define Material Model Behavior”.

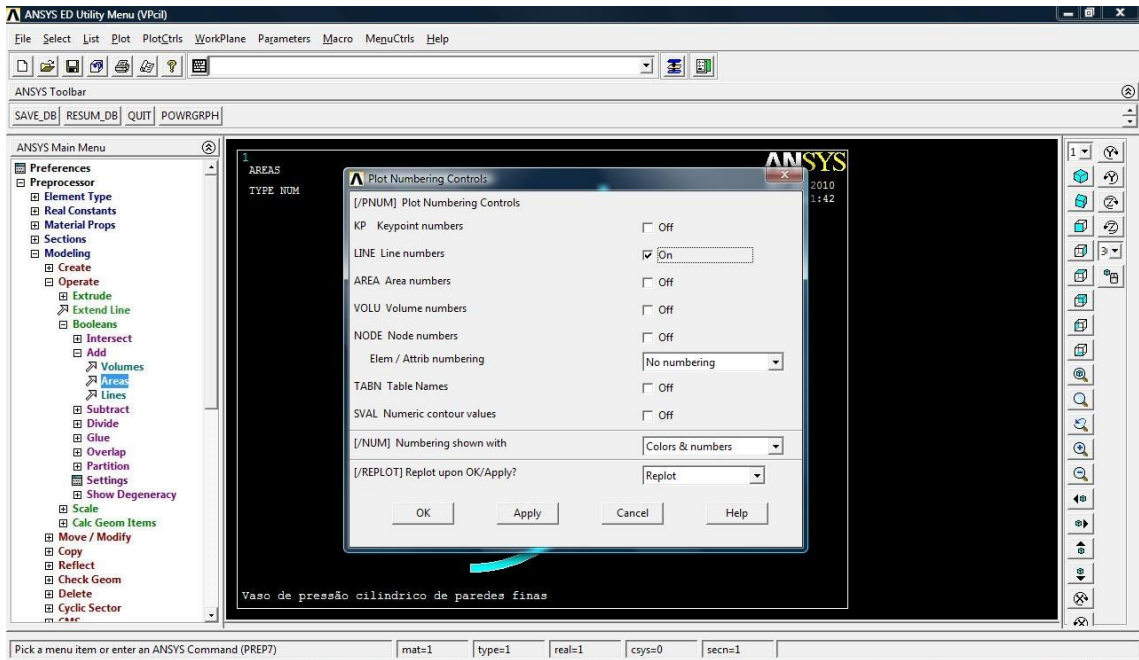


D

## 2.3. Cria o modelo geométrico:

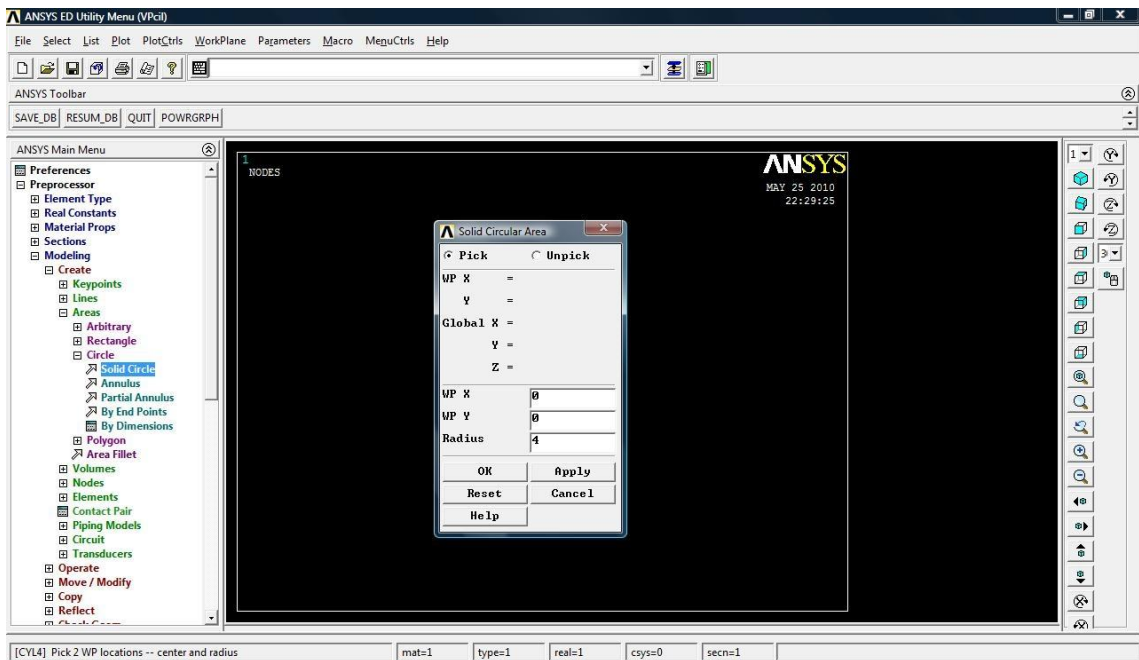
### 2.3.1. Numera área, lines e keypoints:

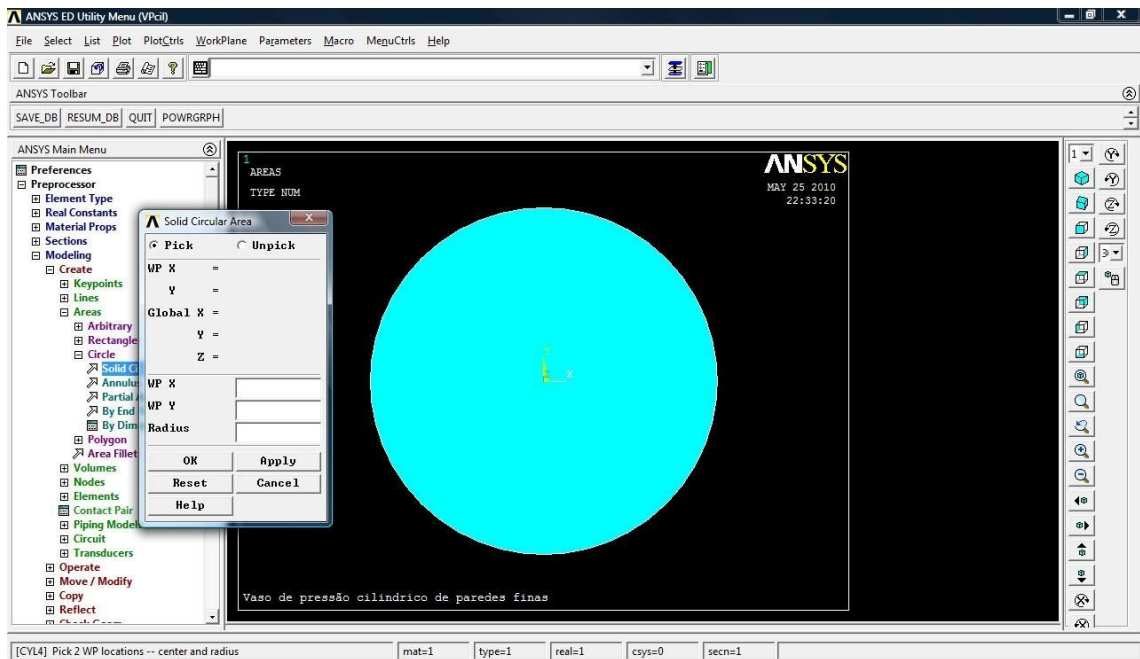
- ✓ No ANSYS Utility Menu clicar em “PlotCtrls” e acessar a opção “Numbering”;
- ✓ Na nova janela que aparecer, selecionar:
  - Lines **ON**
- ✓ Clicar em “OK”.



### 2.3.2. Cria o modelo geométrico:

- ✓ Dentro do “Preprocessor” seleccionar “Modeling”, “Create”, “Area”, “Circle”, “Solid Circle”;
- ✓ Na nova janela que abrir, inserir:
  - WPX = 0;
  - WPY = 0;
  - Rad-1 = 4;
- ✓ Clicar em “APPLY”;

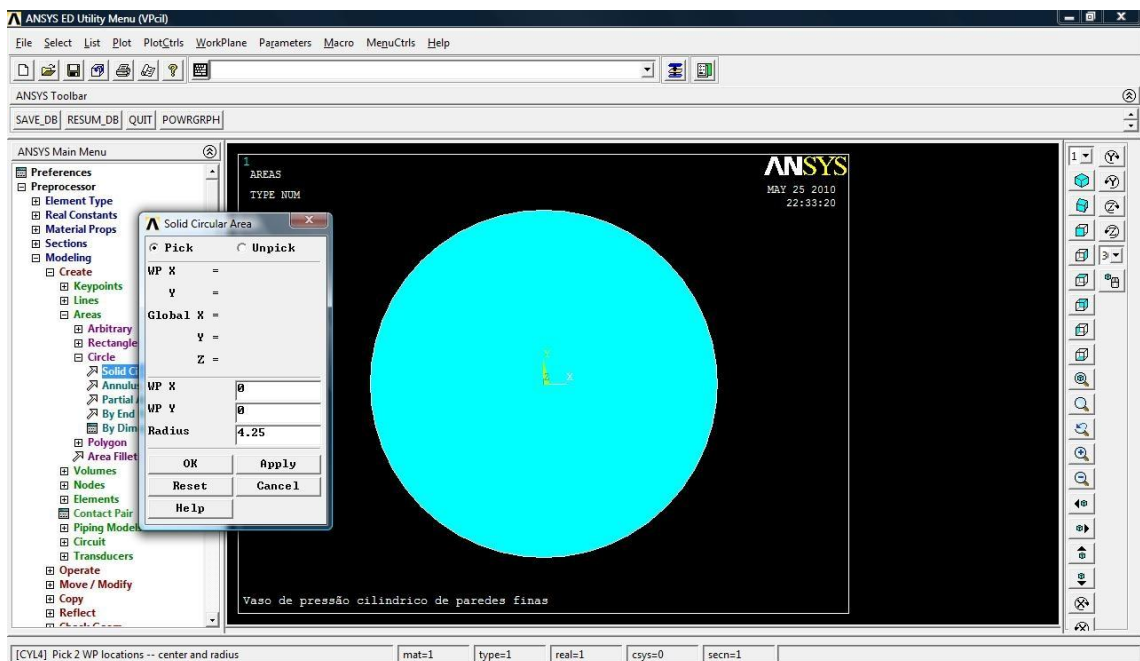


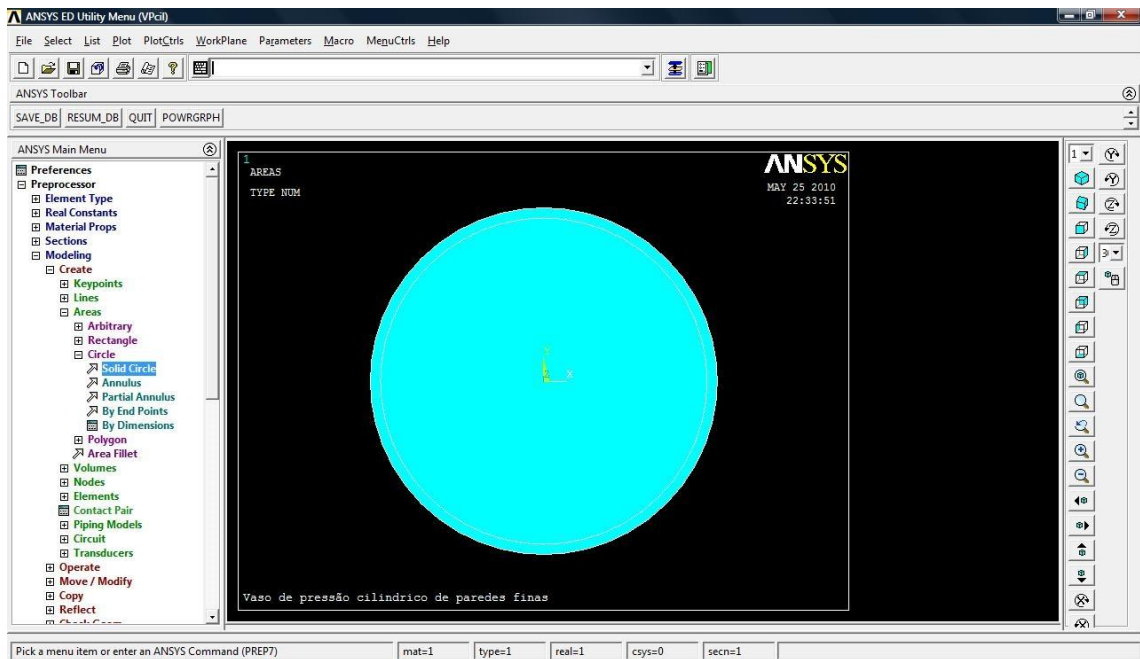


✓ Na nova janela que abrir, inserir:

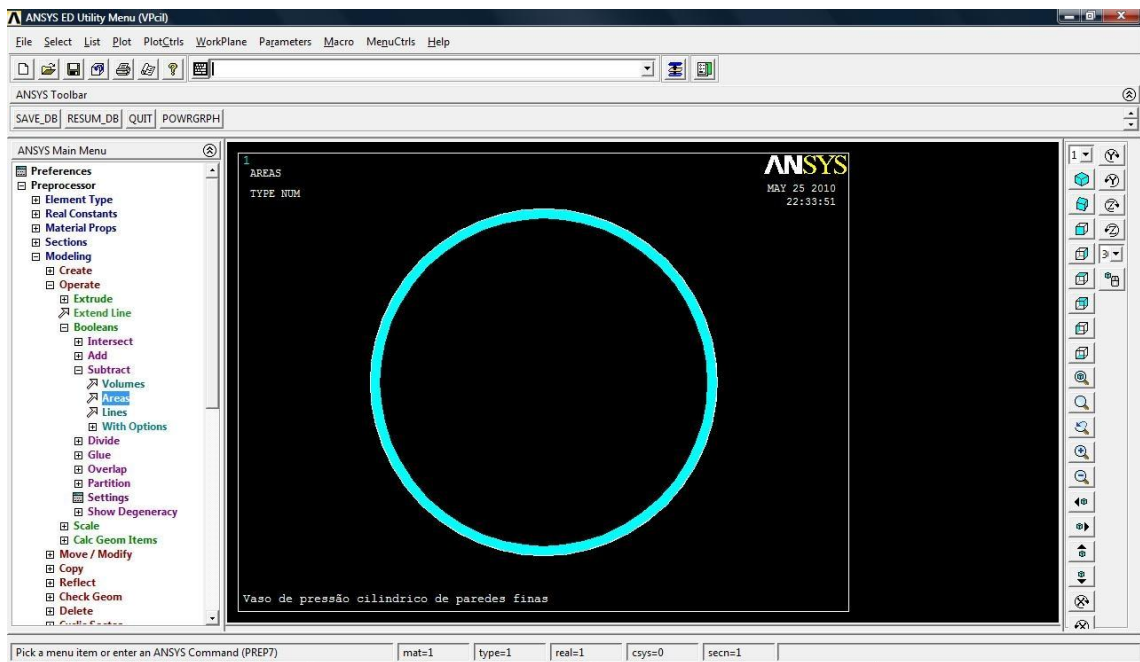
- WPX = 0;
- WPY = 0;
- Rad-1 = 4.25;

✓ Clicar em "OK";

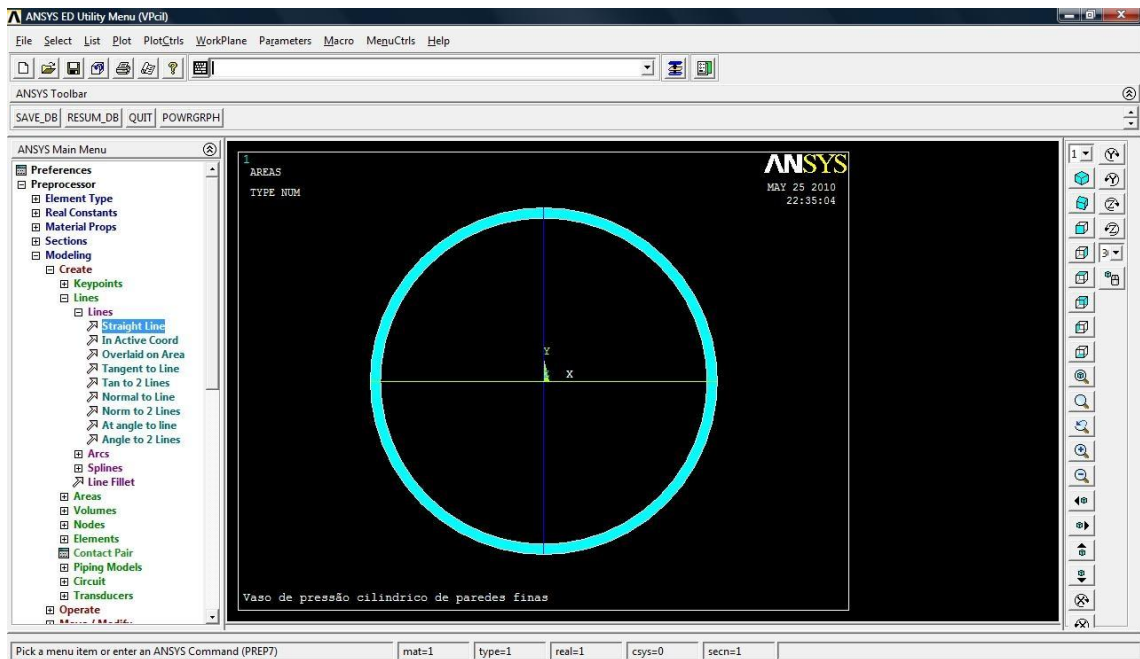




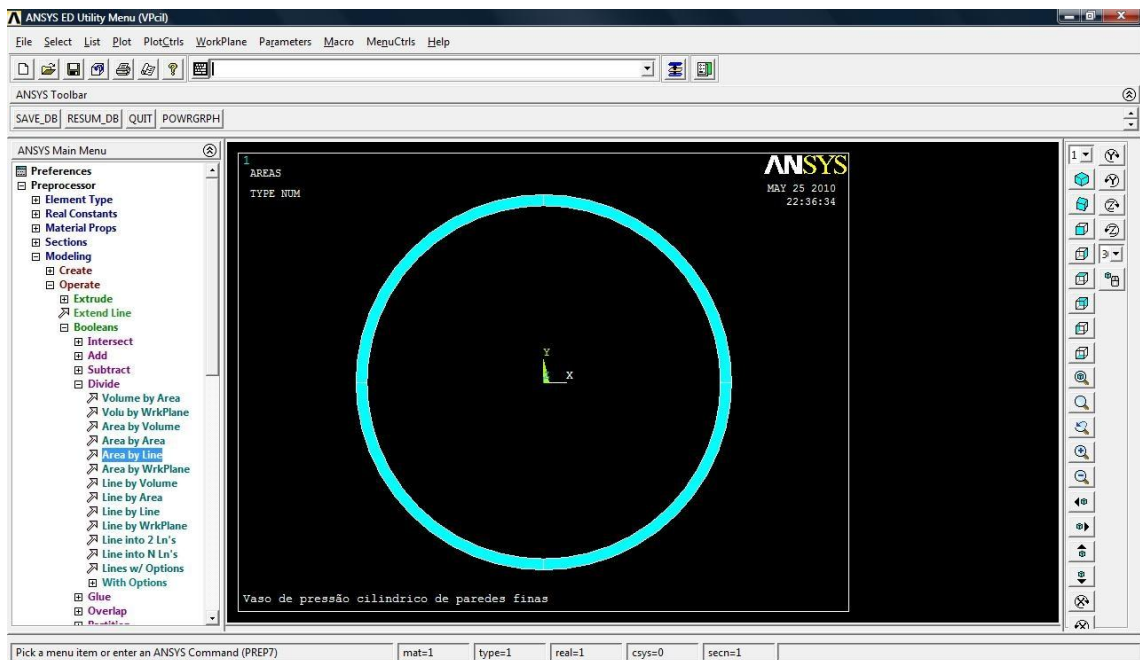
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Operate”, “Booleans”, “Subtract”, “Areas”;
- ✓ Apontar área 2 (círculo grande) e clicar em “APPLY”;
- ✓ Apontar área 1 (círculo pequeno) e clicar em “OK”;



- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Create”, “Lines”, “Lines”, “Straight Line”;
- ✓ Clique nos “Keypoints” do círculo externo que estão no eixo X-global de maneira a criar uma linha reta paralela ao eixo X-global.
- ✓ Na sequência clique nos Keypoints do círculo externo que estão no eixo Y-global de maneira a criar uma linha reta paralela ao eixo Y-global.
- ✓ Clicar em “OK”

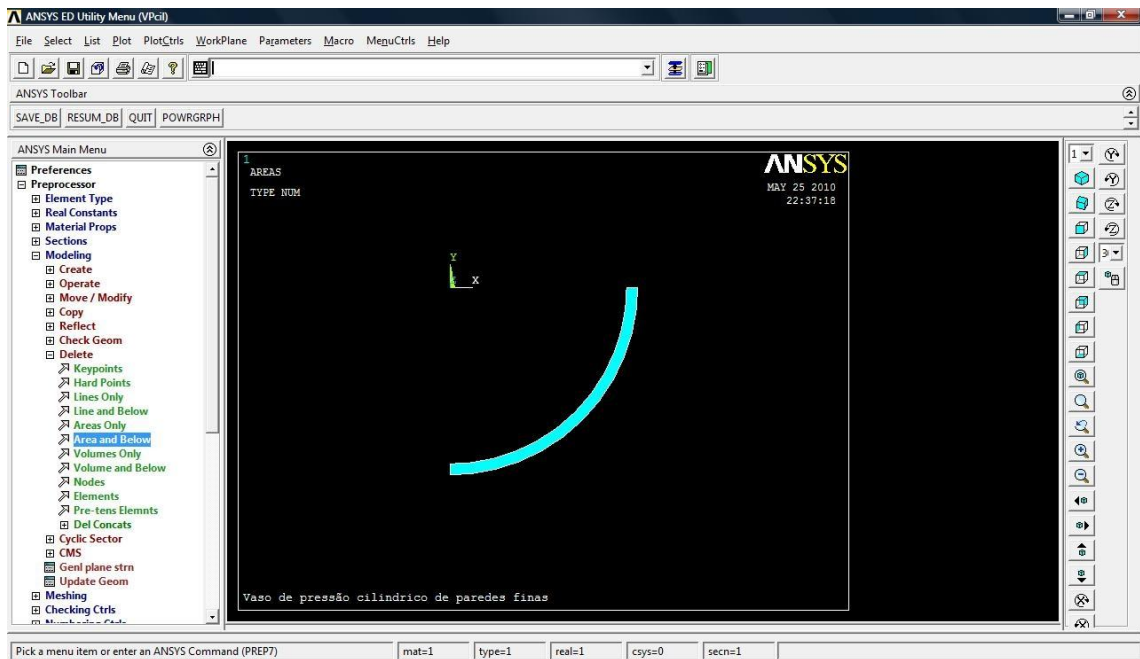


- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Operate”, “Booleans”, “Divide”, “Area by Line”;
- ✓ Selecione com o mouse a área remanescente e clique em “OK”;
- ✓ Selecione as duas linhas que foram criadas e clique em “OK”;

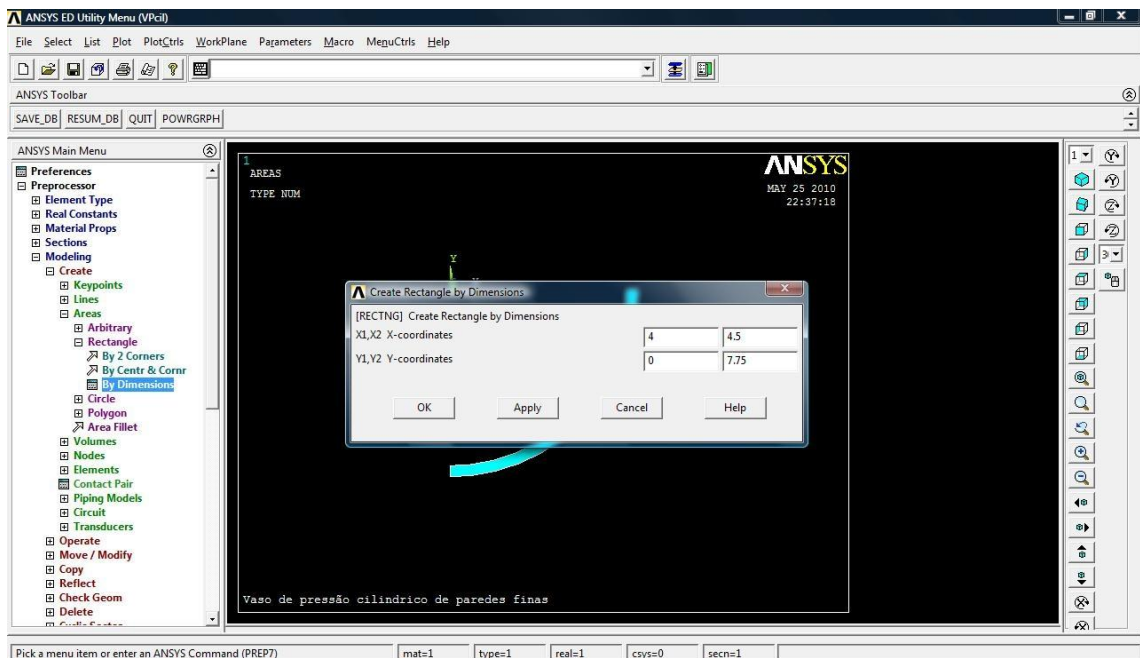


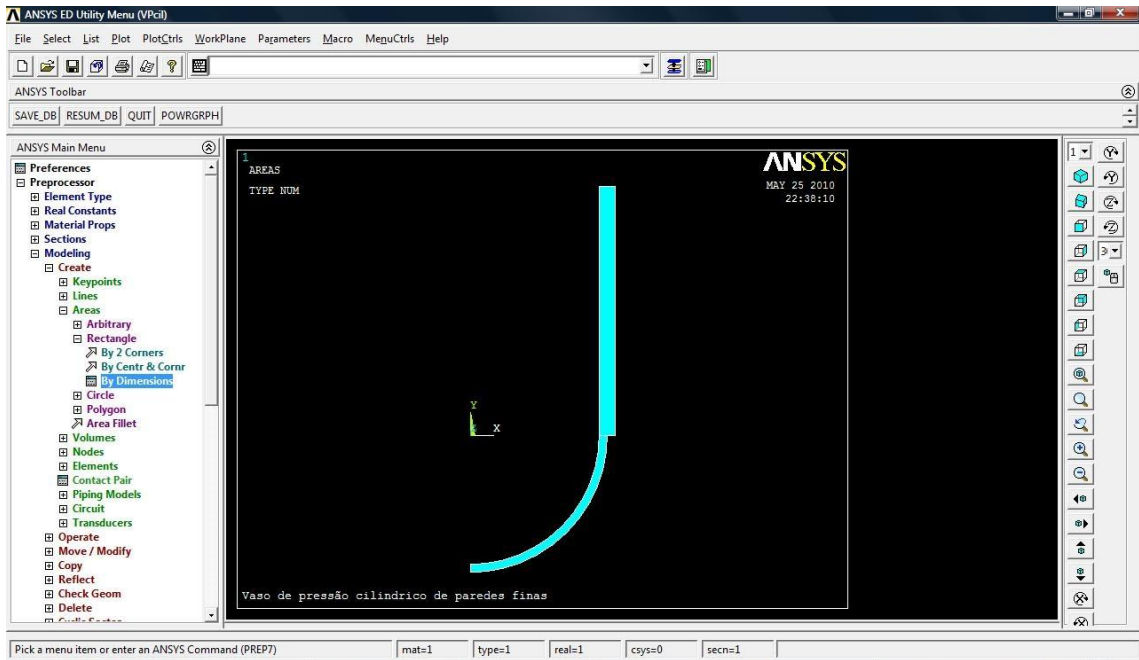
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Delete”, “Areas and Below”;
- ✓ Selecionar as três áreas, primeiro, segundo e terceiro quadrantes e clique em “OK”;



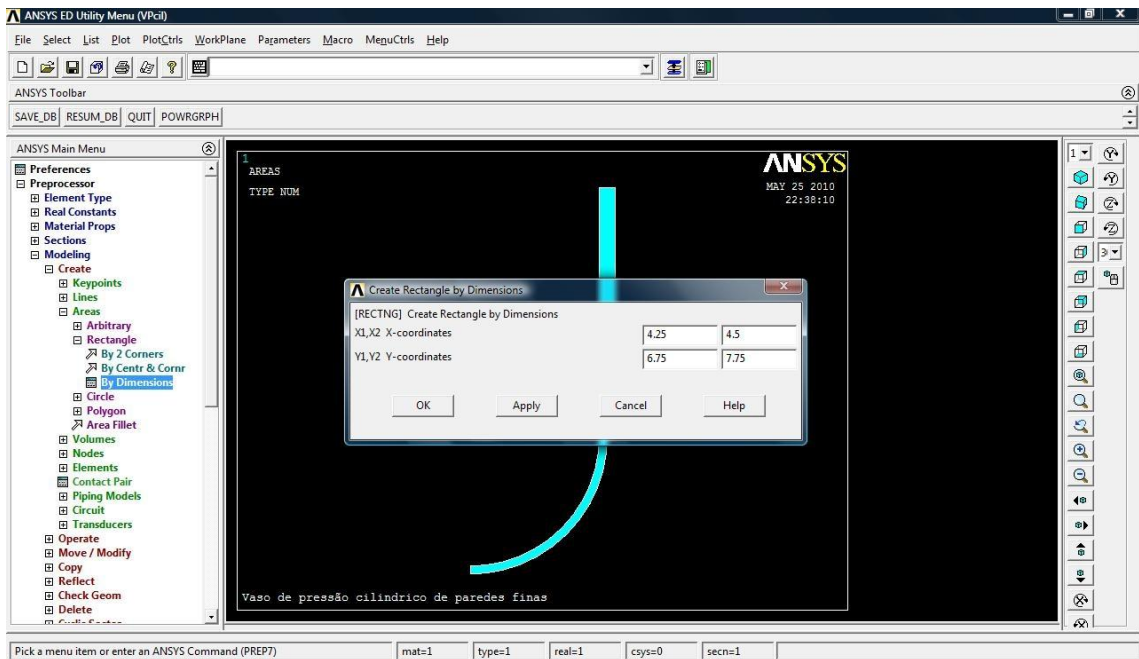


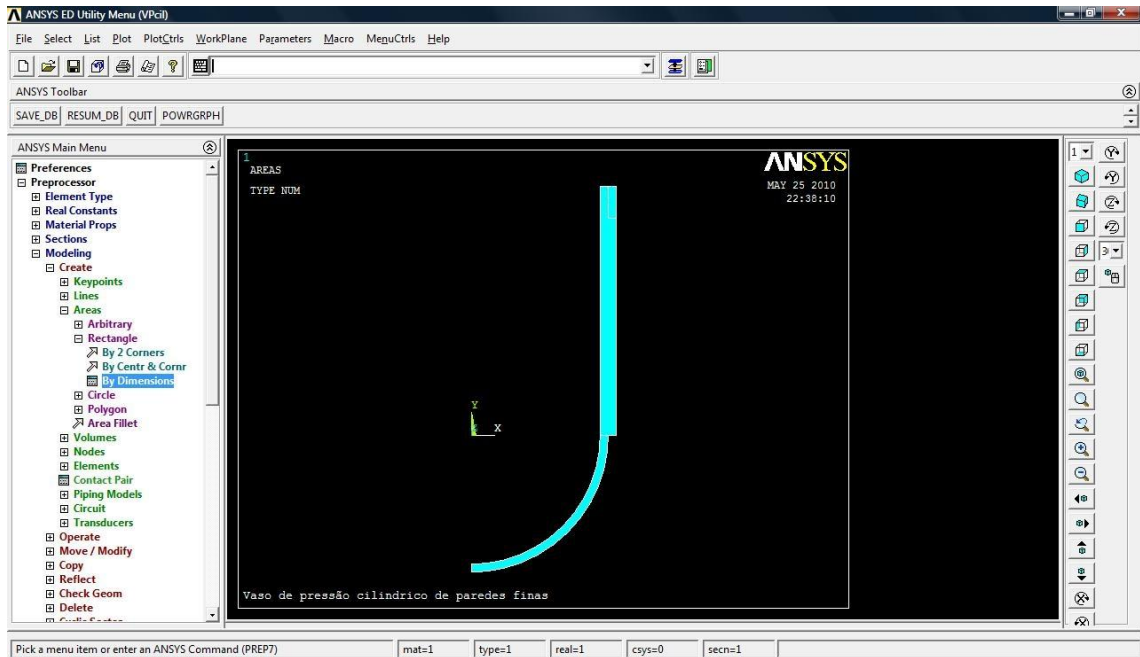
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Create”, “Area”, “Rectangle”, “By Dimensions”;
- ✓ Na nova janela que abrir, inserir:
  - X - coordinates = 4                    4.5;
  - Y - coordinates = 0                    7.75;
- ✓ Clicar em “APPLY”;



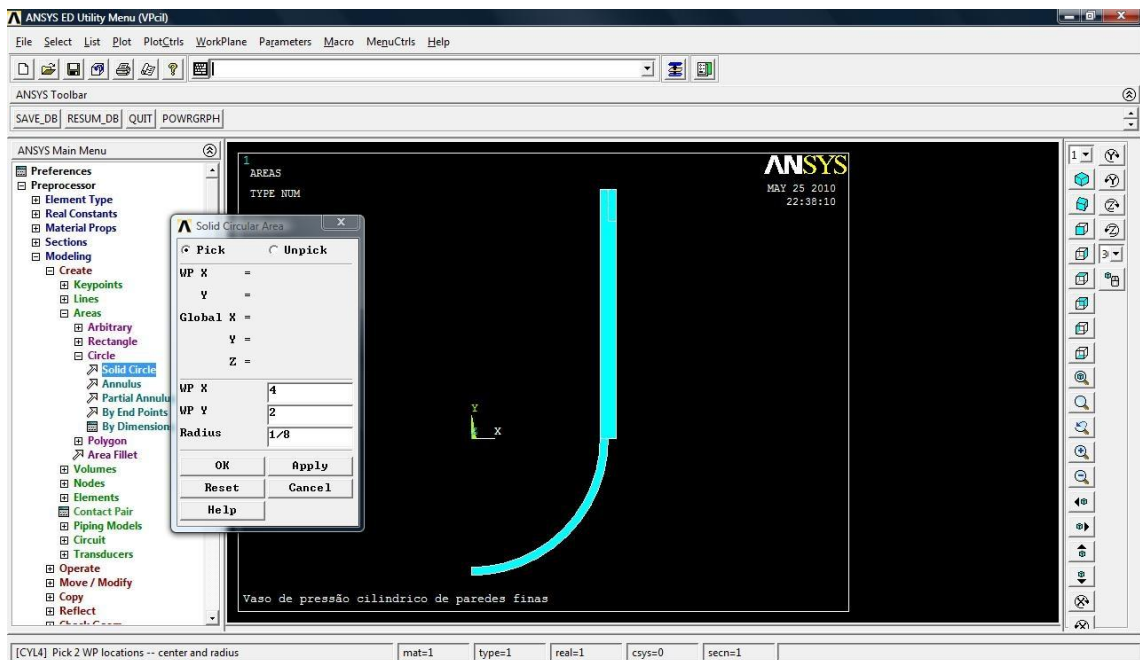


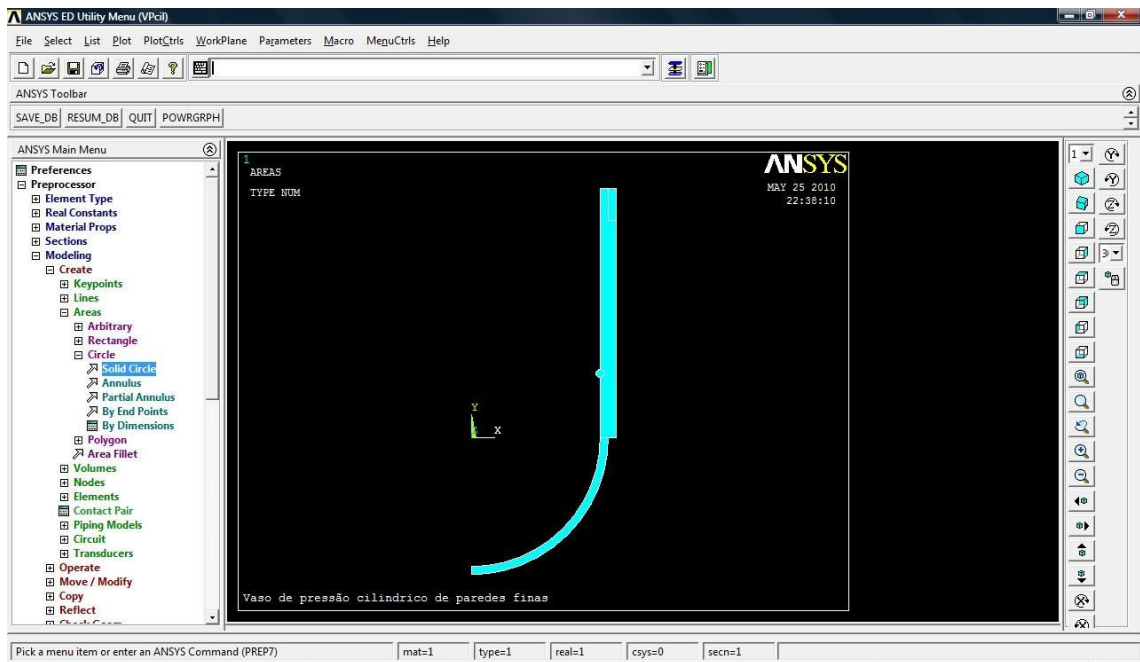
- ✓ Na nova janela que abrir, inserir:
  - X - coordinates = 4.25      4.5;
  - Y - coordinates = 6.75      7.75;
- ✓ Clicar em "OK";



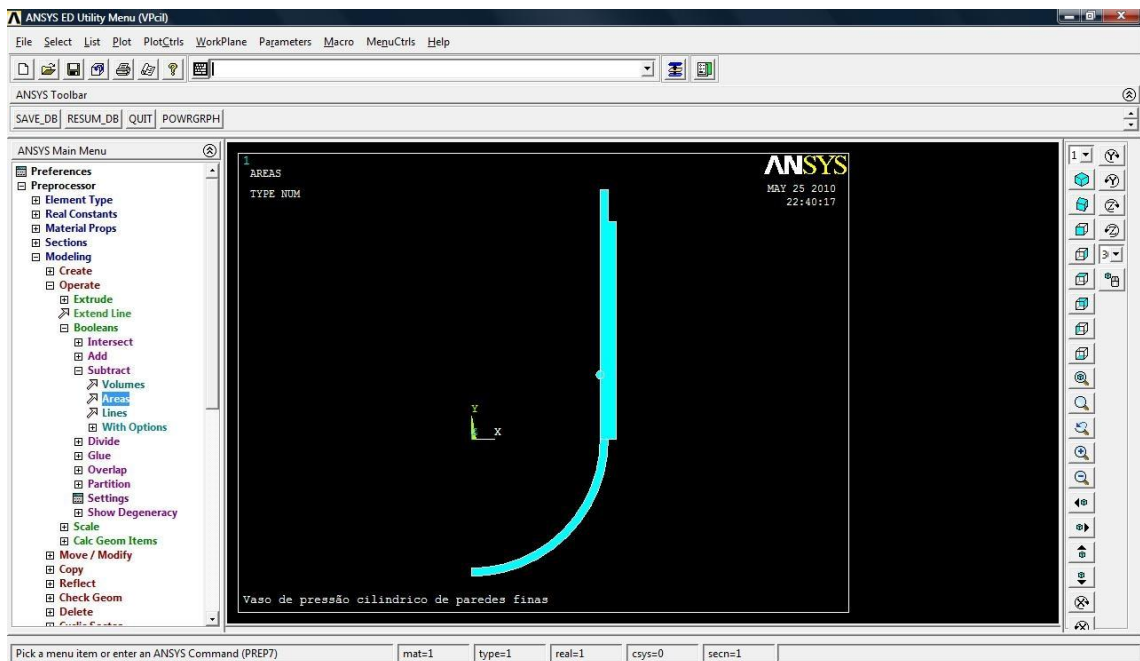


- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Create”, “Area”, “Circle”, “Solid Circle”;
- ✓ Na nova janela que abrir, inserir:
  - WPX = 4;
  - WPY = 2;
  - Rad-1 = 1/8;
- ✓ Clicar em “OK”;

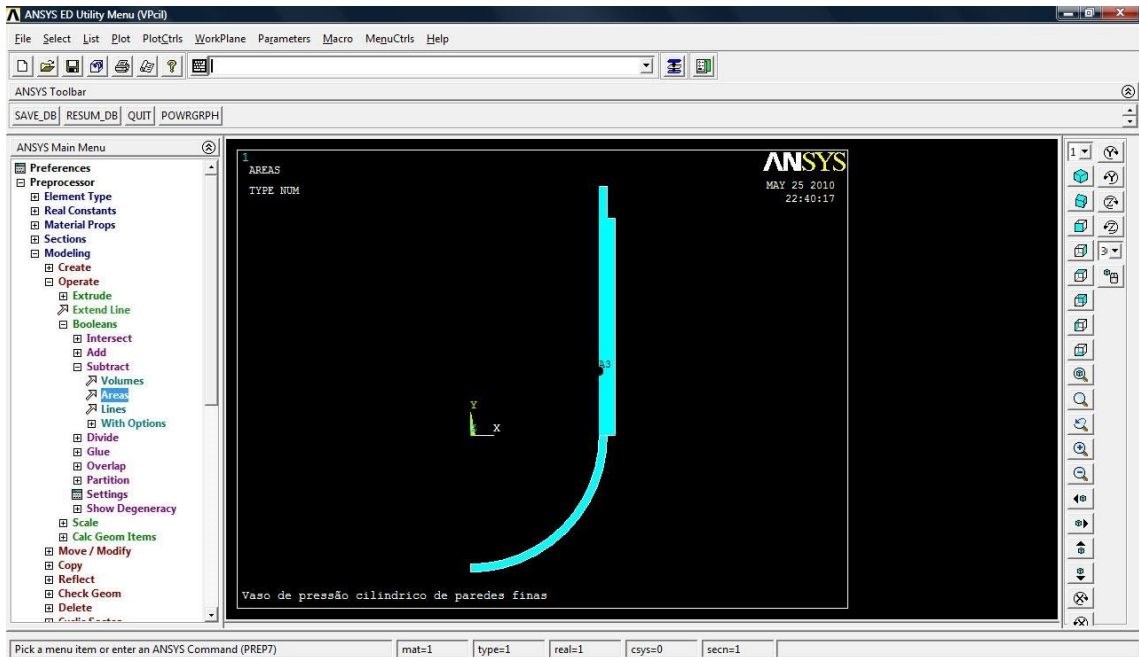




- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Operate”, “Booleans”, “Subtract”, “Areas”;
- ✓ Apontar com o mouse o retângulo grande e clicar em “OK”;
- ✓ Apontar com o mouse o retângulo pequeno e clicar em “OK”;



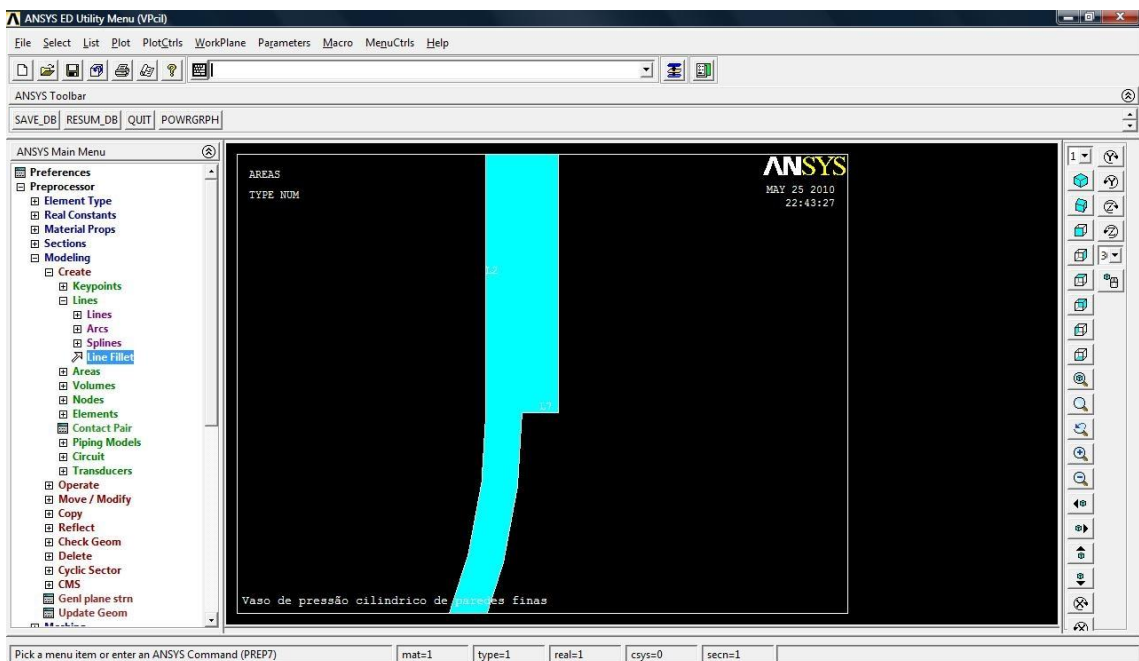
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Operate”, “Booleans”, “Subtract”, “Areas”;
- ✓ Apontar com o mouse o retângulo grande e clicar em “OK”;
- ✓ Apontar com o círculo e clicar em “OK”;



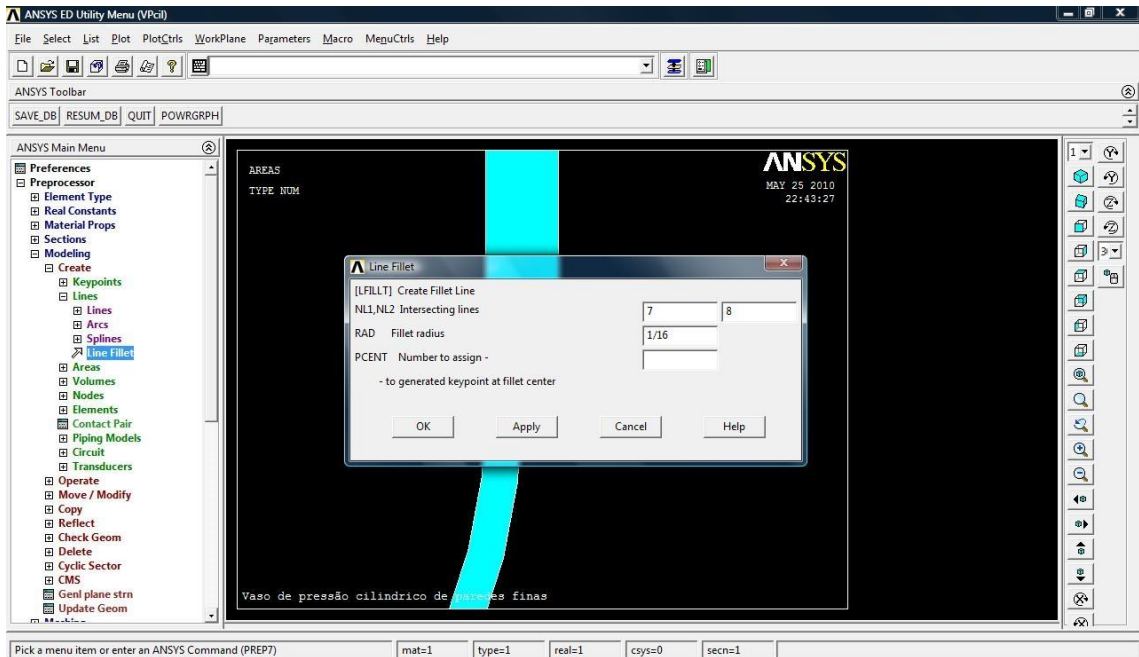
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Operate”, “Booleans”, “Add”, “Areas”;
- ✓ Clicar em “PICK ALL”;

### 2.3.3. Cria linhas de concordância nas transições dos trechos mais finos:

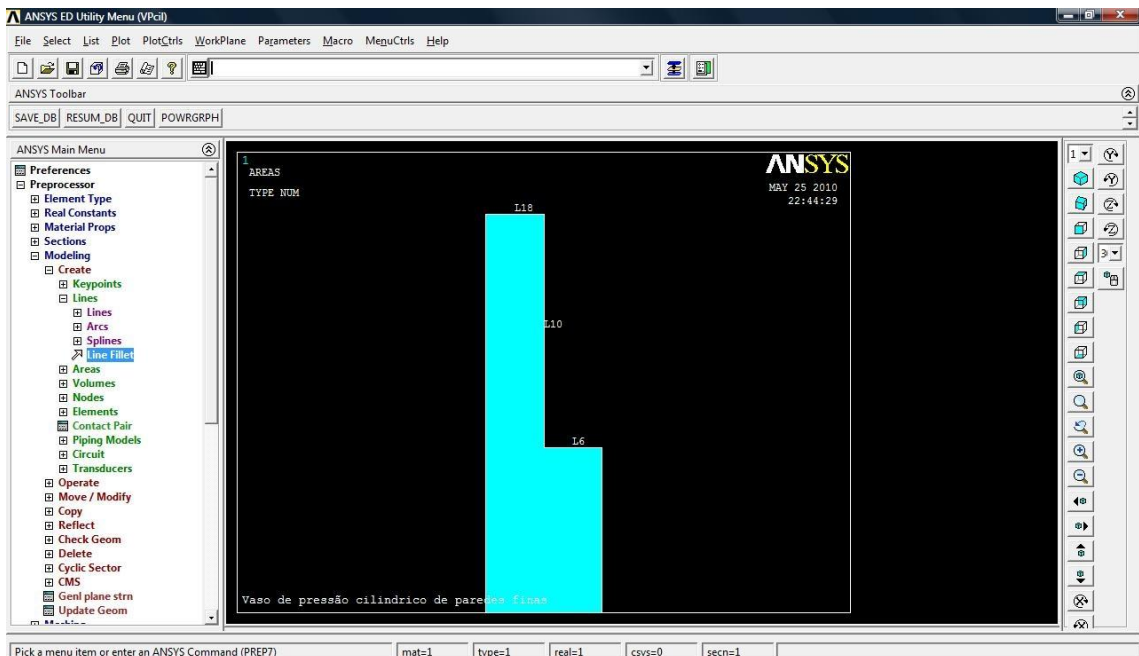
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Create”, “Lines”, “Line Fillet”;
- ✓ Seleciona-se com o mouse as linhas 7 e 8 e clicar em “OK”;
- ✓ Inserir, na nova janela:
  - Radius = **1/16**
- ✓ Clicar em “OK”;

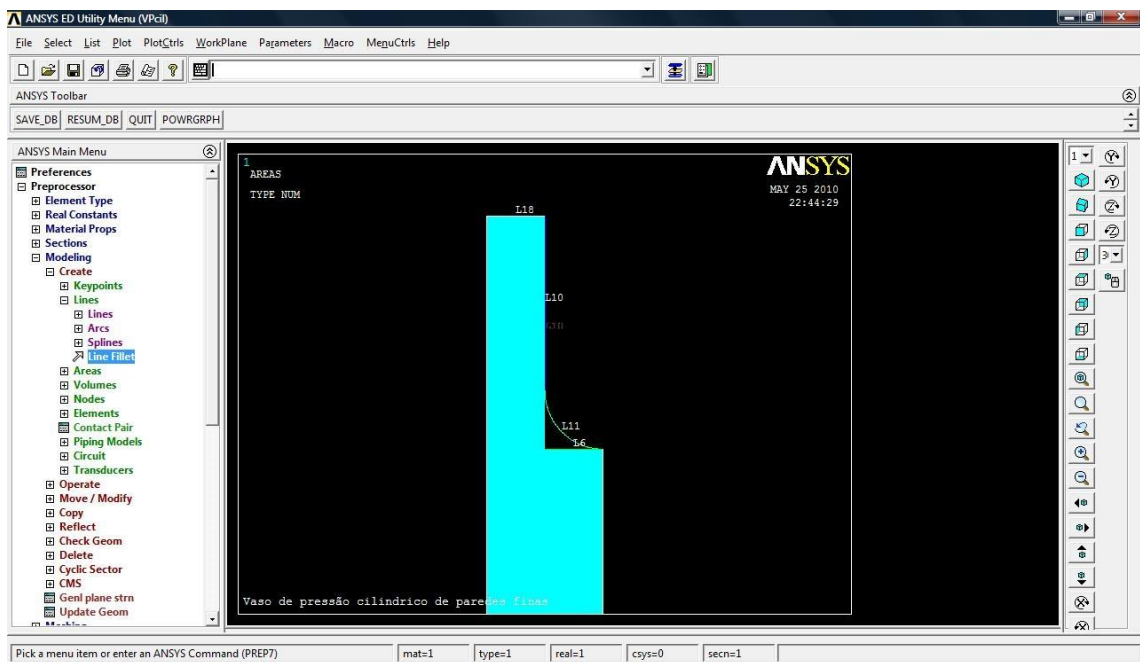
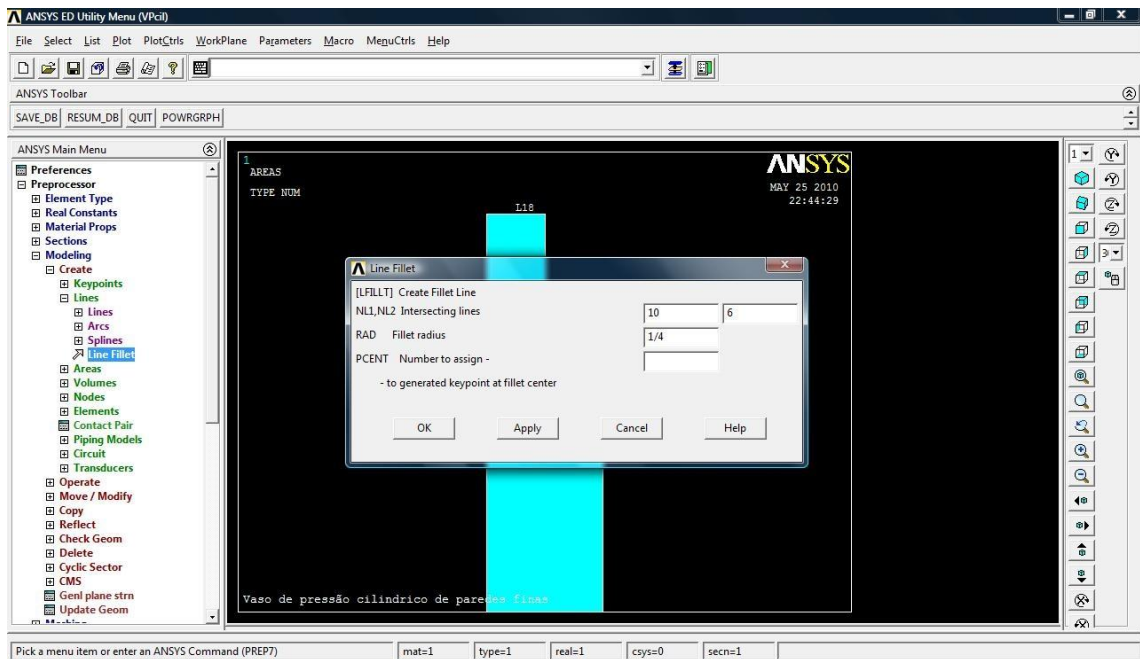




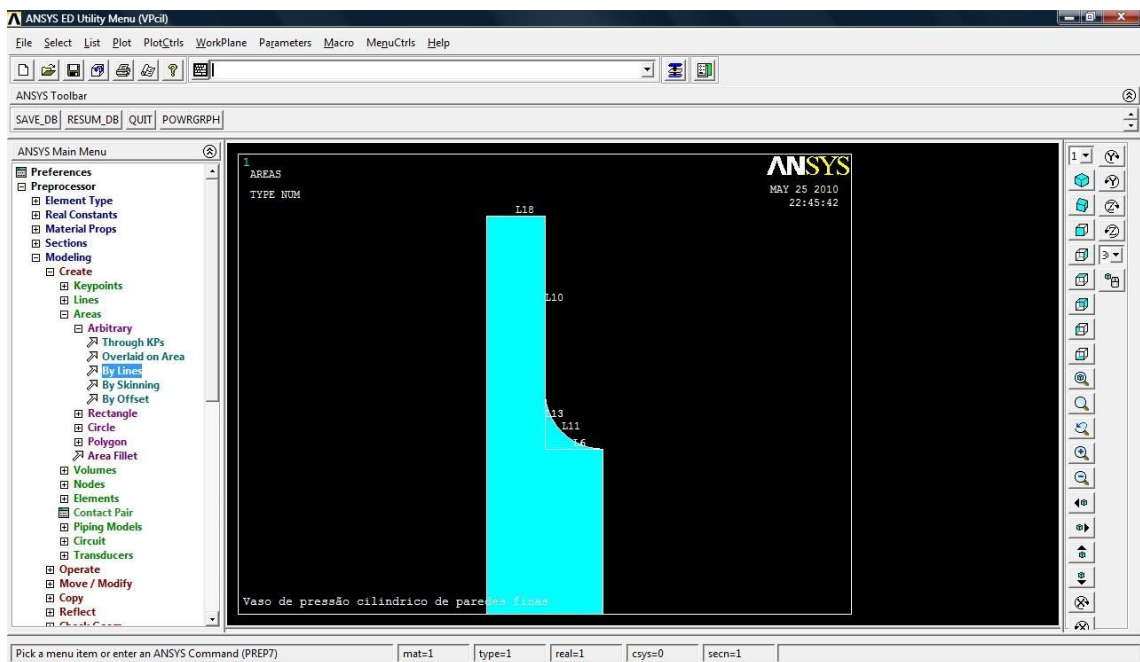
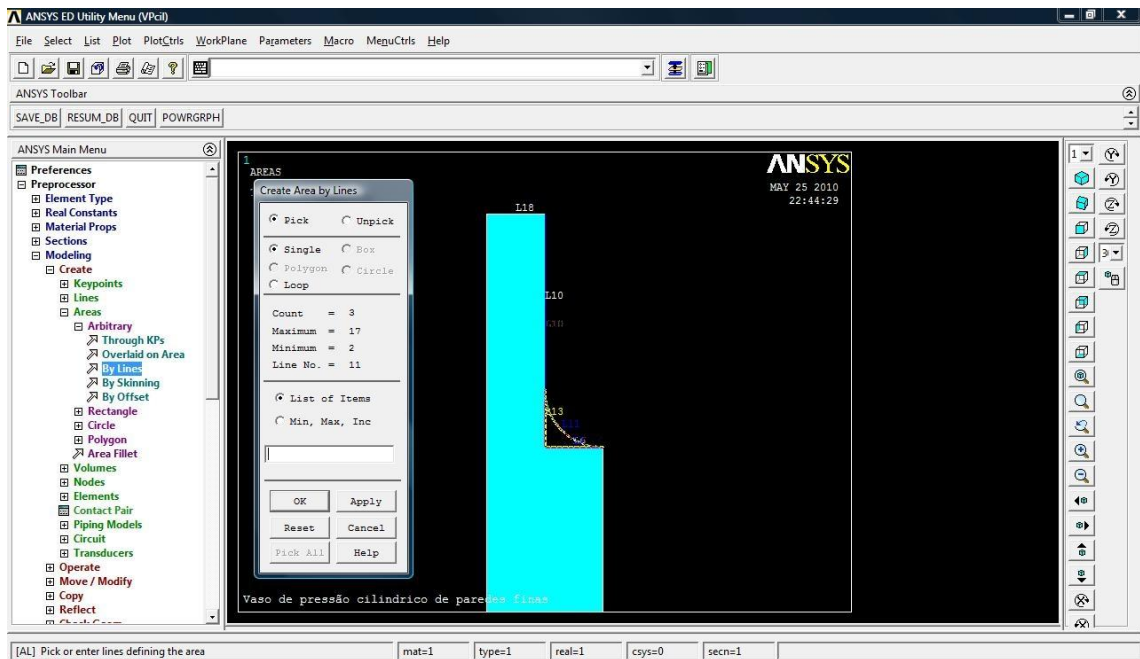


- ✓ Dentro do “Preprocessor” seleccionar “Modeling”, “Create”, “Lines”, “Line Fillet”;
- ✓ Seleccionam-se com o mouse as linhas **10 e 6** e clicar em “OK”;
- ✓ Inserir, na nova janela:
  - Radius = **1/4**
- ✓ Clicar em “OK”;

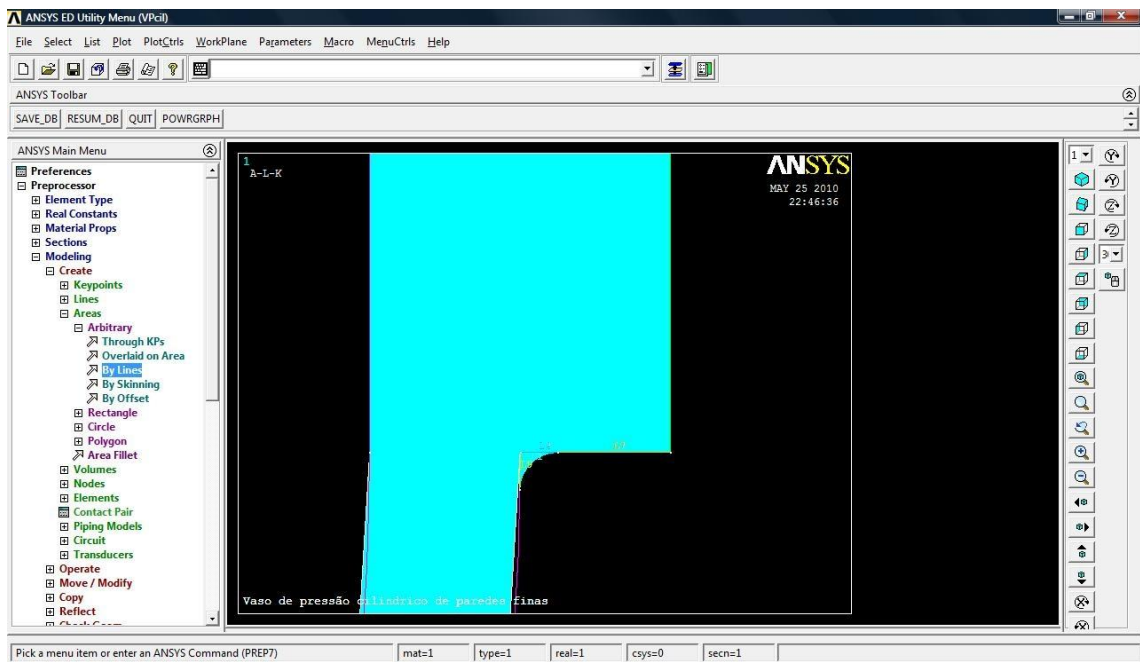
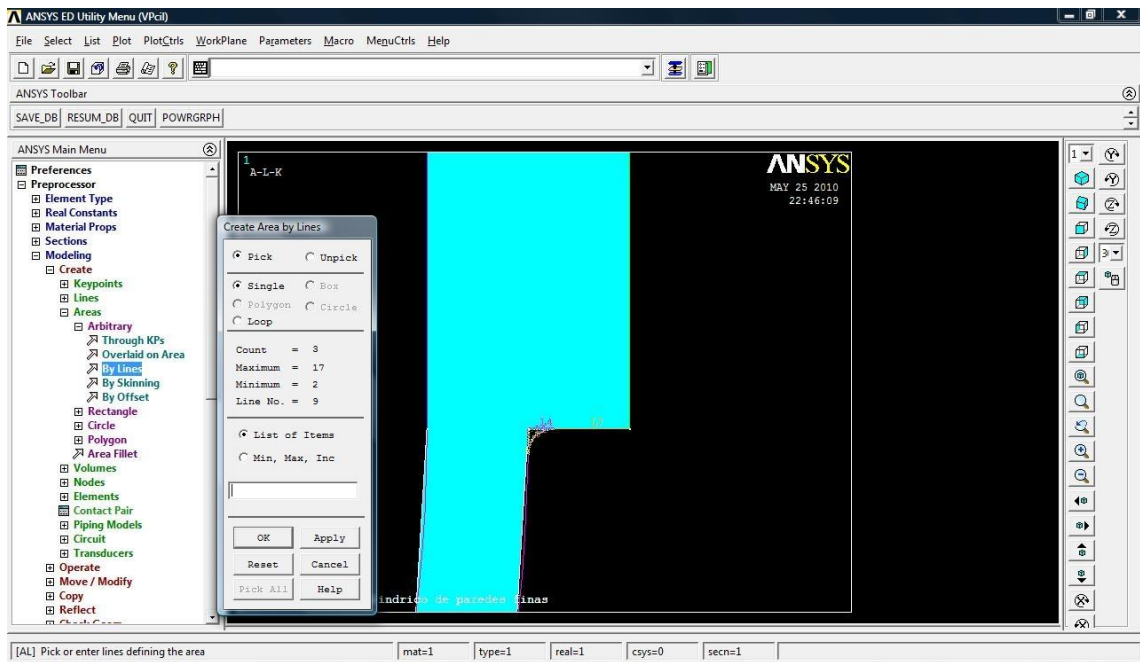




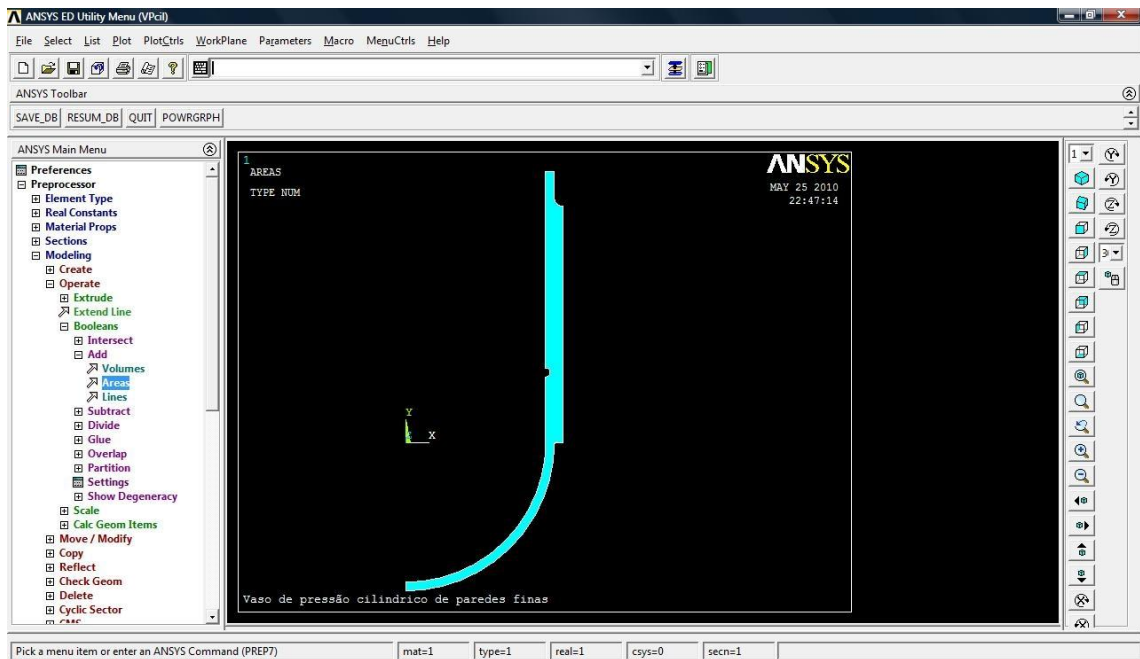
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Create”, “Areas”, “Arbitrary”, “By Lines”;
- ✓ Selecionam-se com o mouse as duas linhas retas e a linha de concordância (6, 13 e 11) como na figura a seguir e clicar em “OK”;



- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Create”, “Areas”, “Arbitrary”, “By Lines”;
- ✓ Selecionam-se com o mouse as duas linhas retas e a linha de concordância como na figura a seguir e clicar em “OK”;

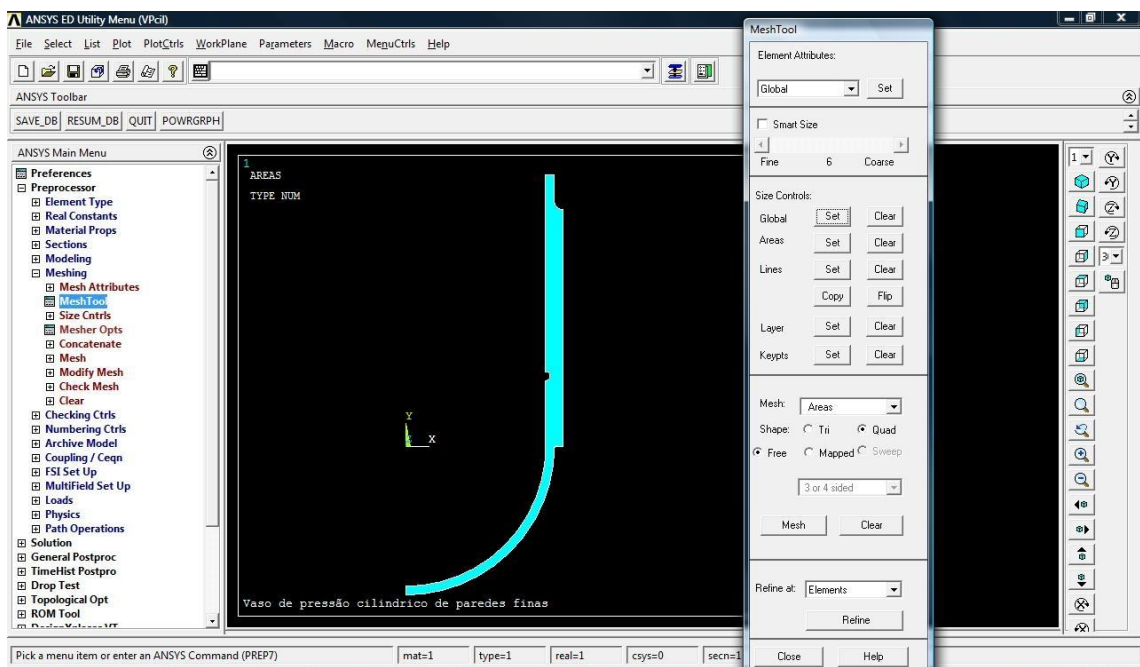


- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Operate”, “Booleans”, “Add”, “Areas”;
- ✓ Clicar em “**PICK ALL**”;



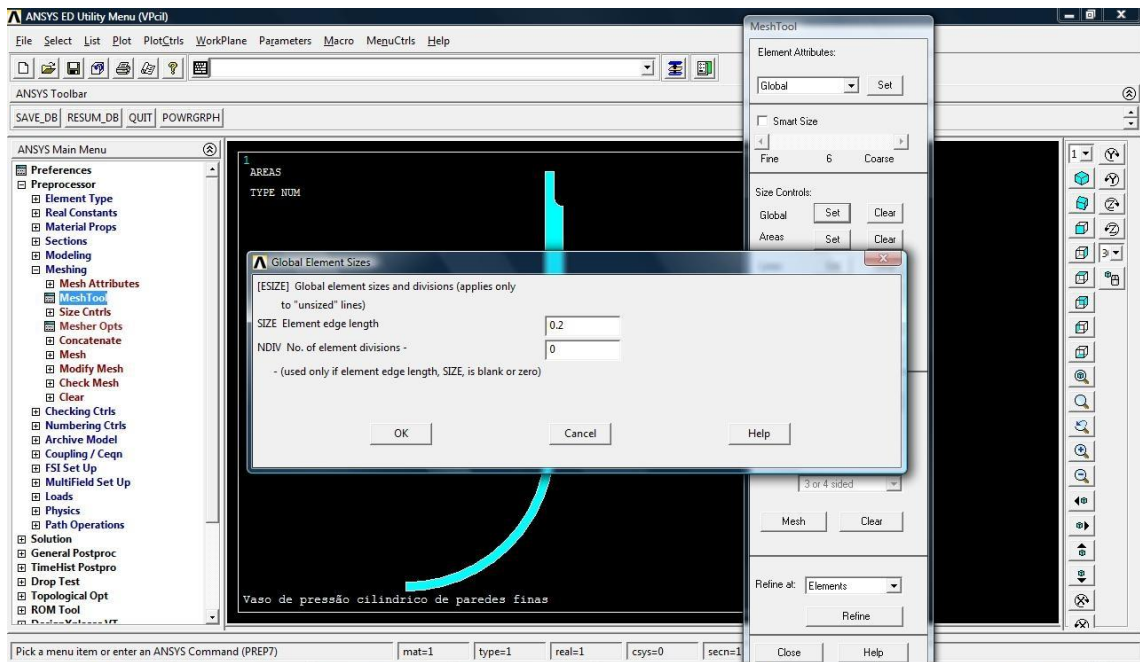
#### 2.4. Gera a malha de elementos finitos:

- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Meshing”, “Mesh Tool”;
- ✓ Clicar em “Set”, junto ao “Size Controls”, “Global”;

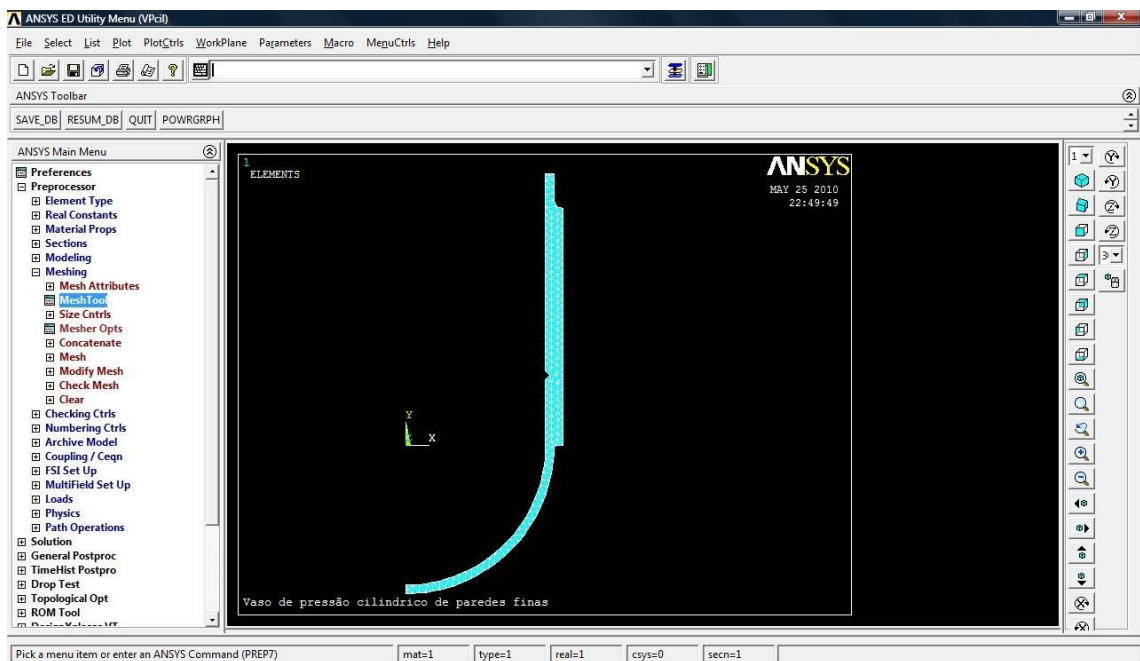


- ✓ Na nova janela, inserir:
  - SIZE = 0.2
- ✓ Clicar em “OK”;



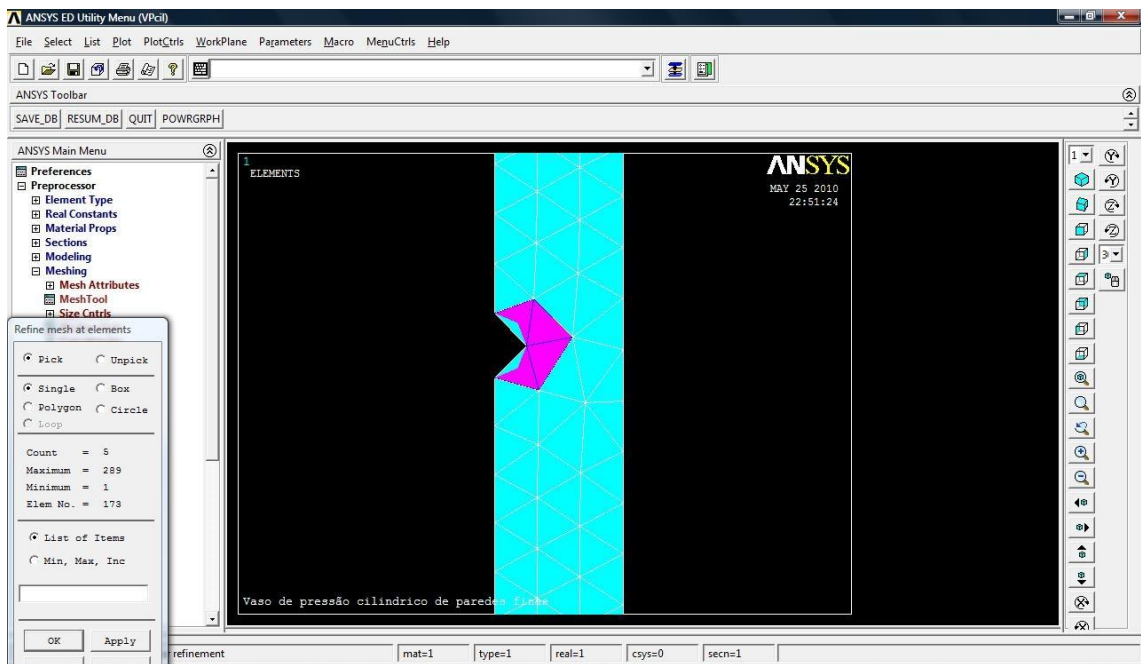
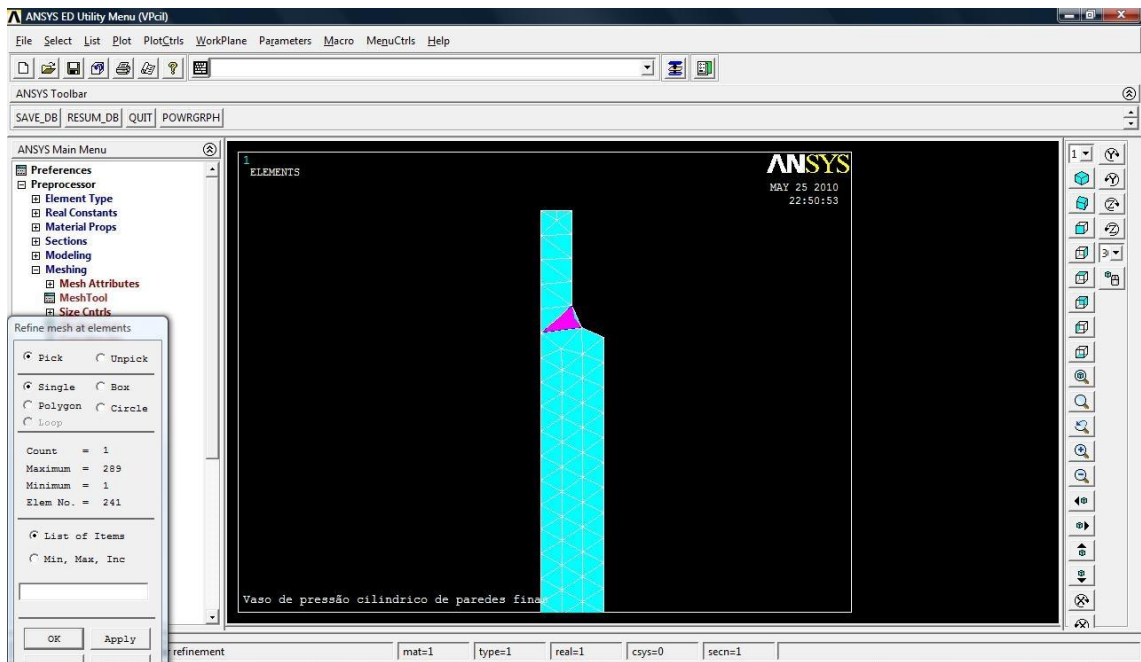


✓ Clicar em “Mesh”, selecionar com o mouse a **Area** e clicar em “OK”;

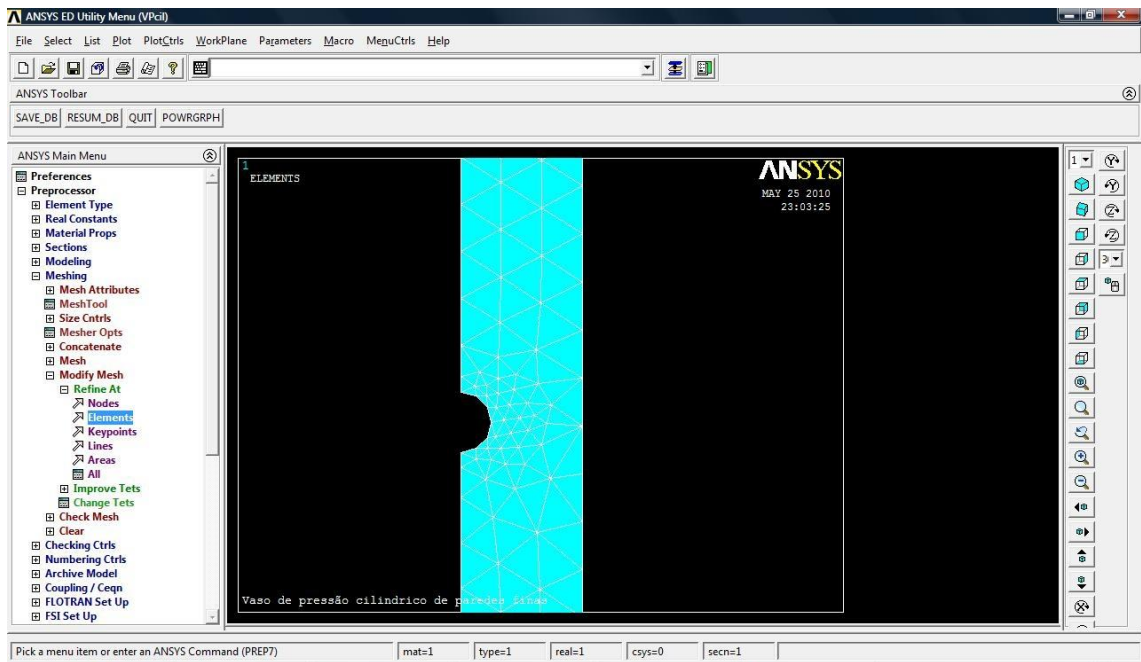
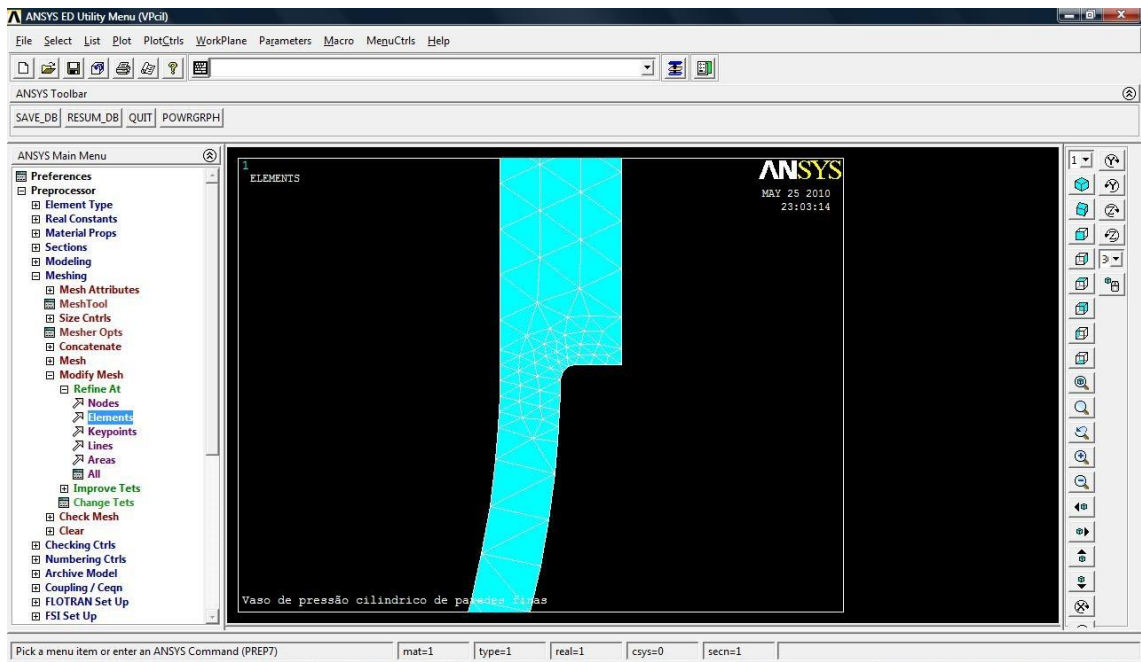


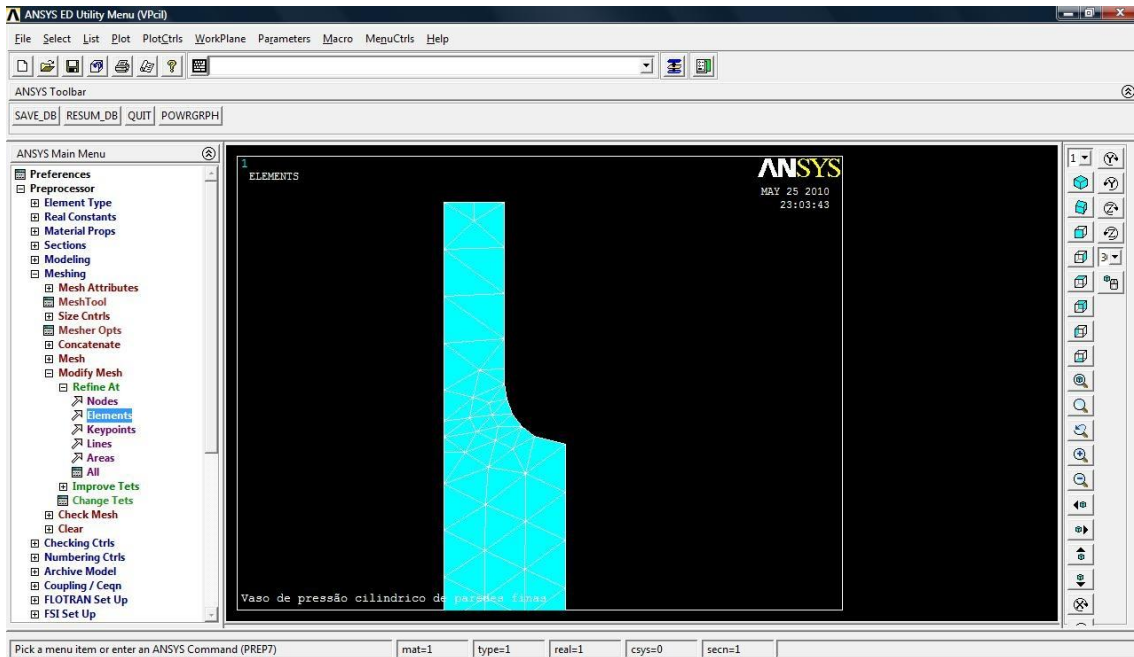
2.4.1. *Regiões de transição podem ter a malha mais densificada:*

- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Meshing”, “Modify Mesh”, “Refine at”, “Element”;
- ✓ Selecionar com o mouse os elementos das regiões de transição e clicar em “OK”;









## 2.4.2. Salva análise no arquivo VPcil.db:

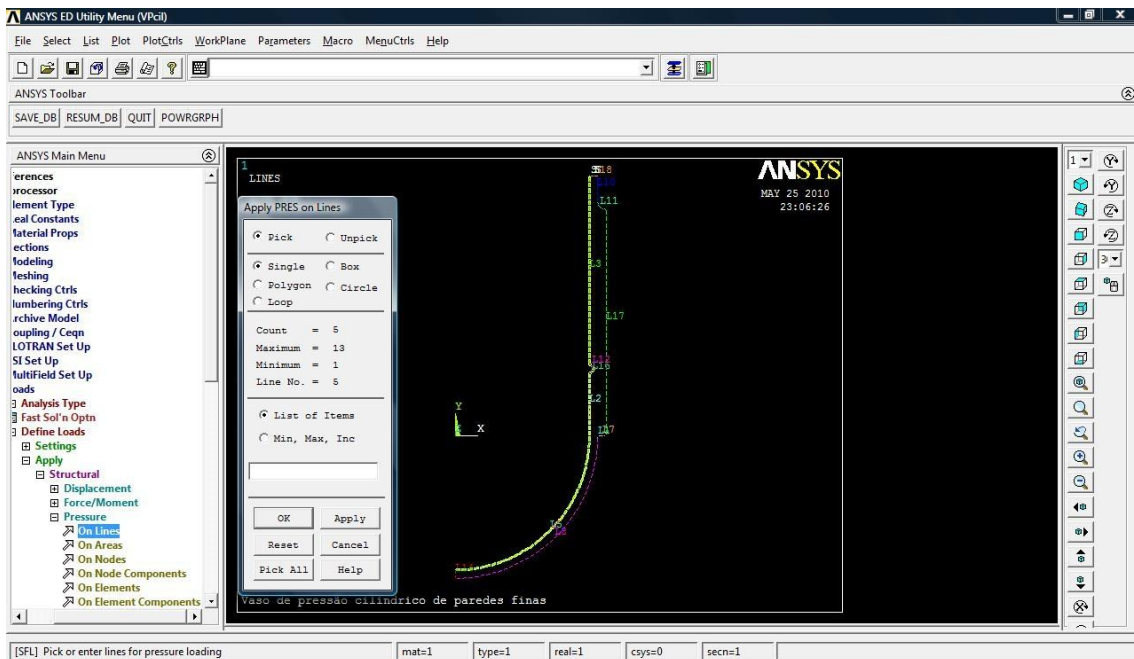
- ✓ No “ANSYS Toolbar, clicar em “SAVE\_DB”.

E

## 2.5. Aplicar as condições de contorno na modelagem sólida:

### 2.5.1. Fornece condição de contorno:

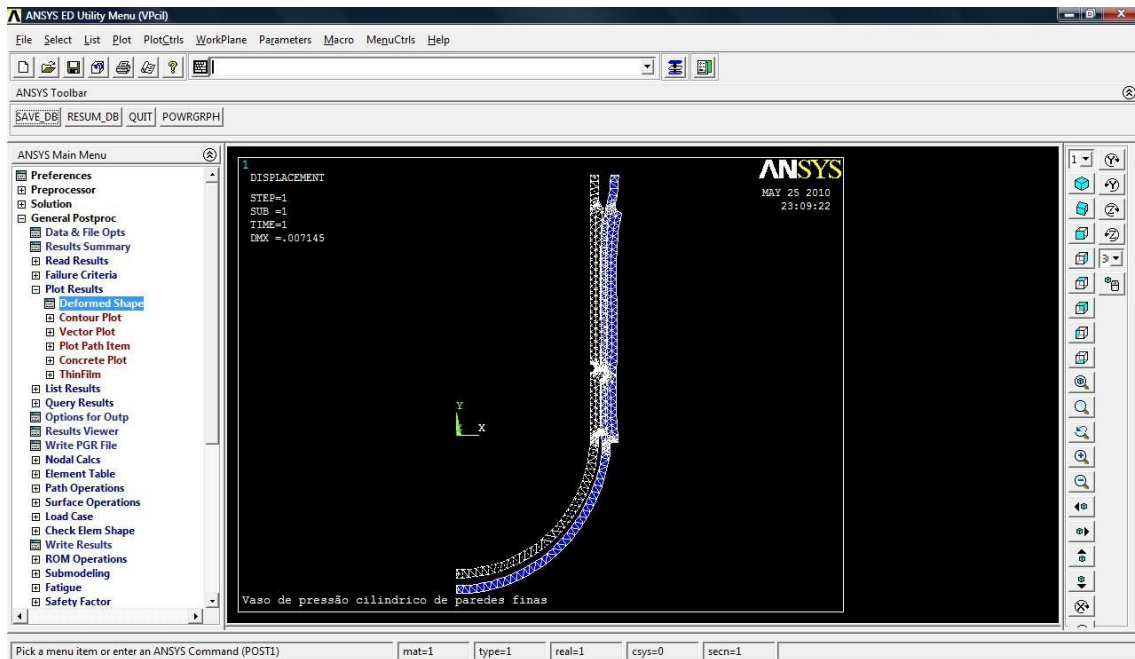
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Loads”, “Define Loads”, “Apply”, “Structural”, “Displacement”, “Symmetry B.C.”, “On Lines”;
- ✓ Na nova janela que abrir apontar a linha 18 (no topo do modelo) e clicar em “OK”;



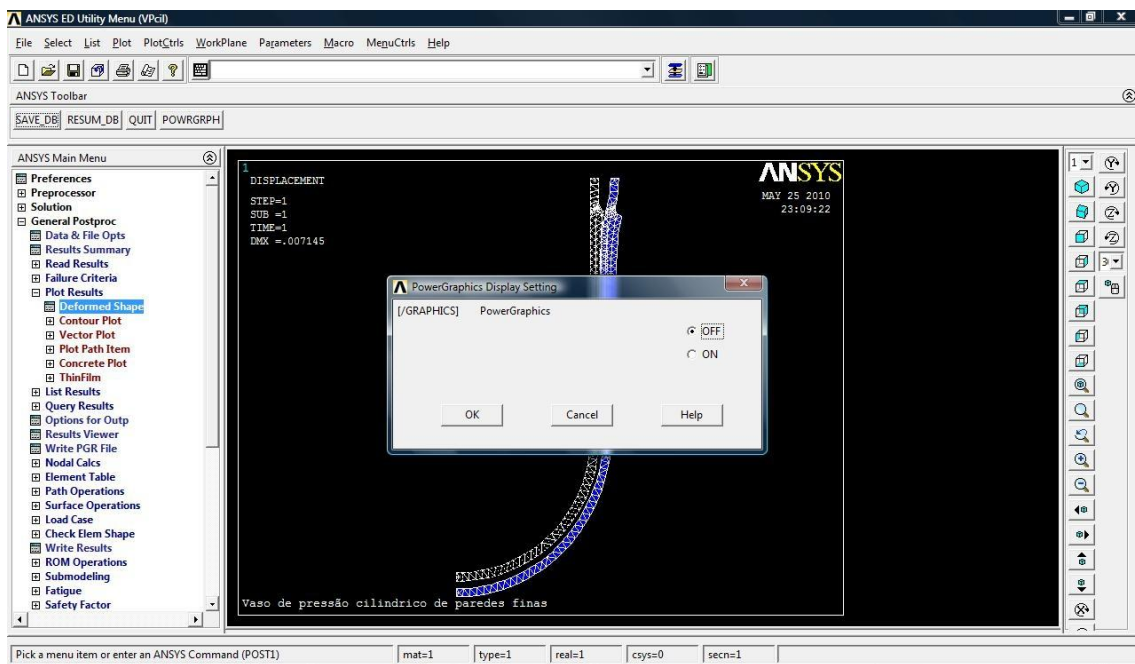




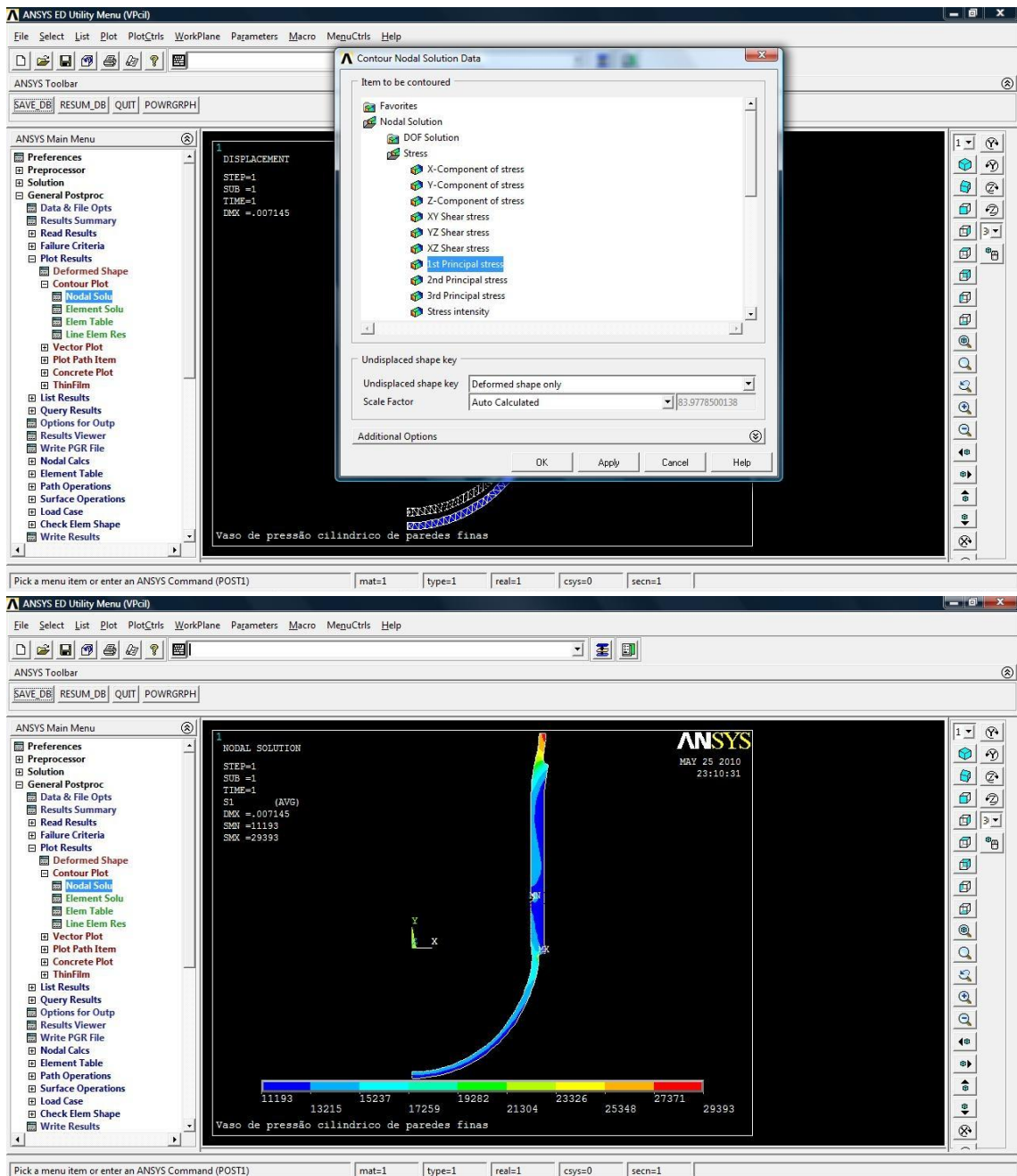
- ✓ Na janela “Plot Deformed Shape”, seleccionar a opção “Def+undeformed” e clicar em “OK”;



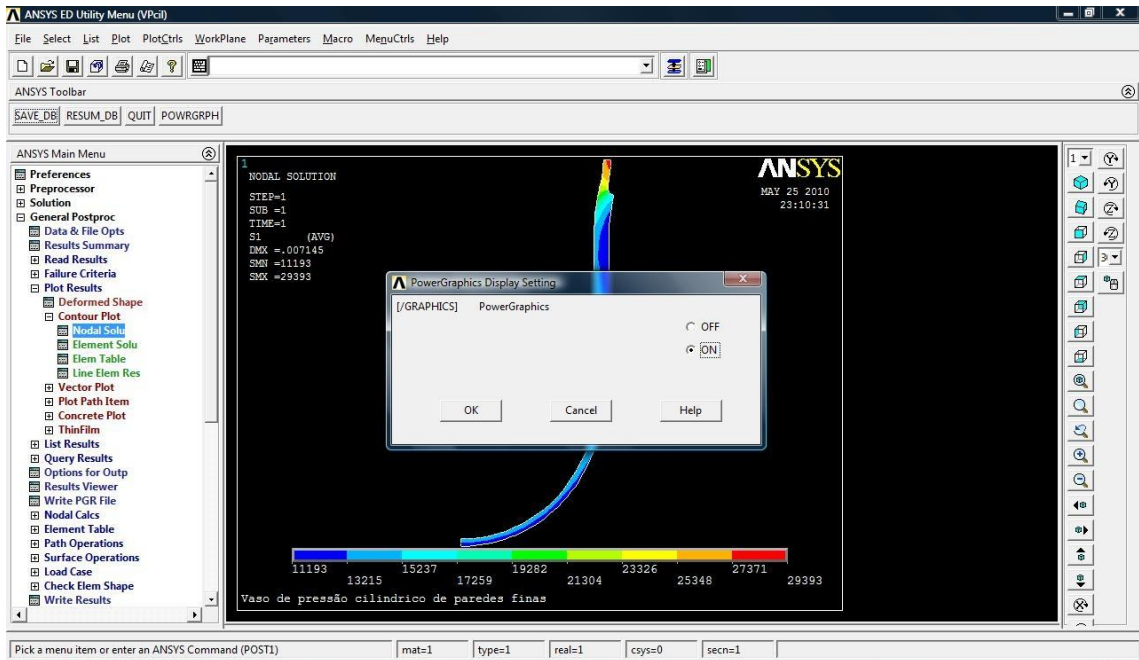
- ✓ No ANSYS Toolbar, clicar em “POWRGRPH”;
- ✓ Na nova janela seleccionar “OFF” e clicar em “OK”;



- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do “General Postproc” clicar em “Plot Results”, “Contour Plot”, “Nodal Solu”;
- ✓ Na nova janela seleccionar:
  - Stress;
    - **1st Principal Stress**
- ✓ Clicar em “OK”;

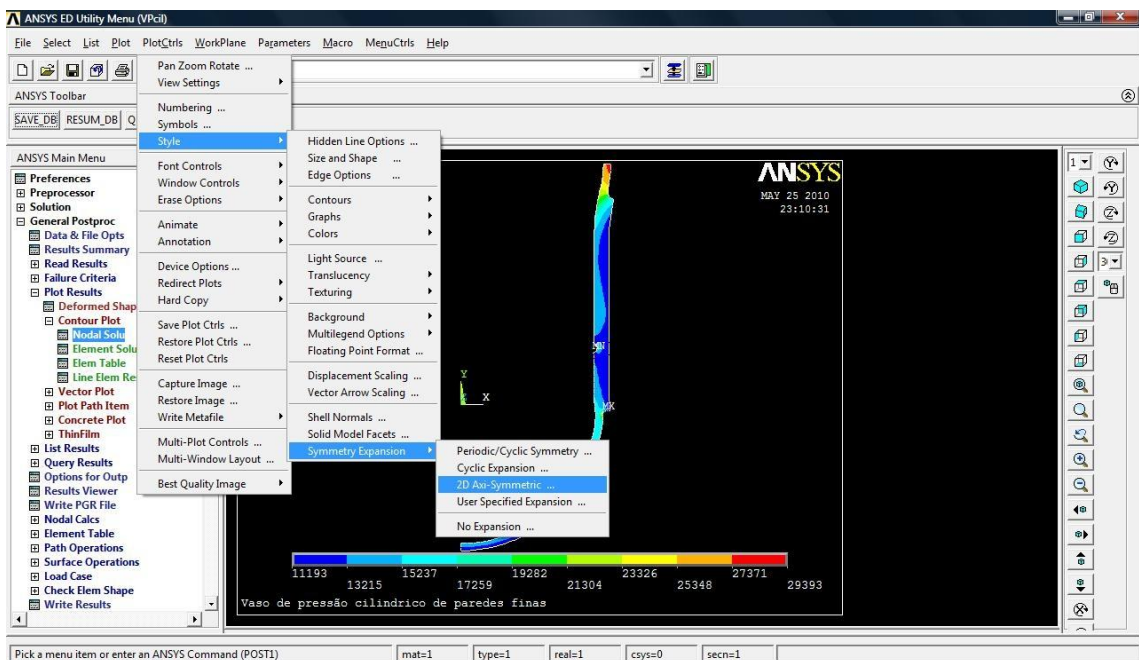


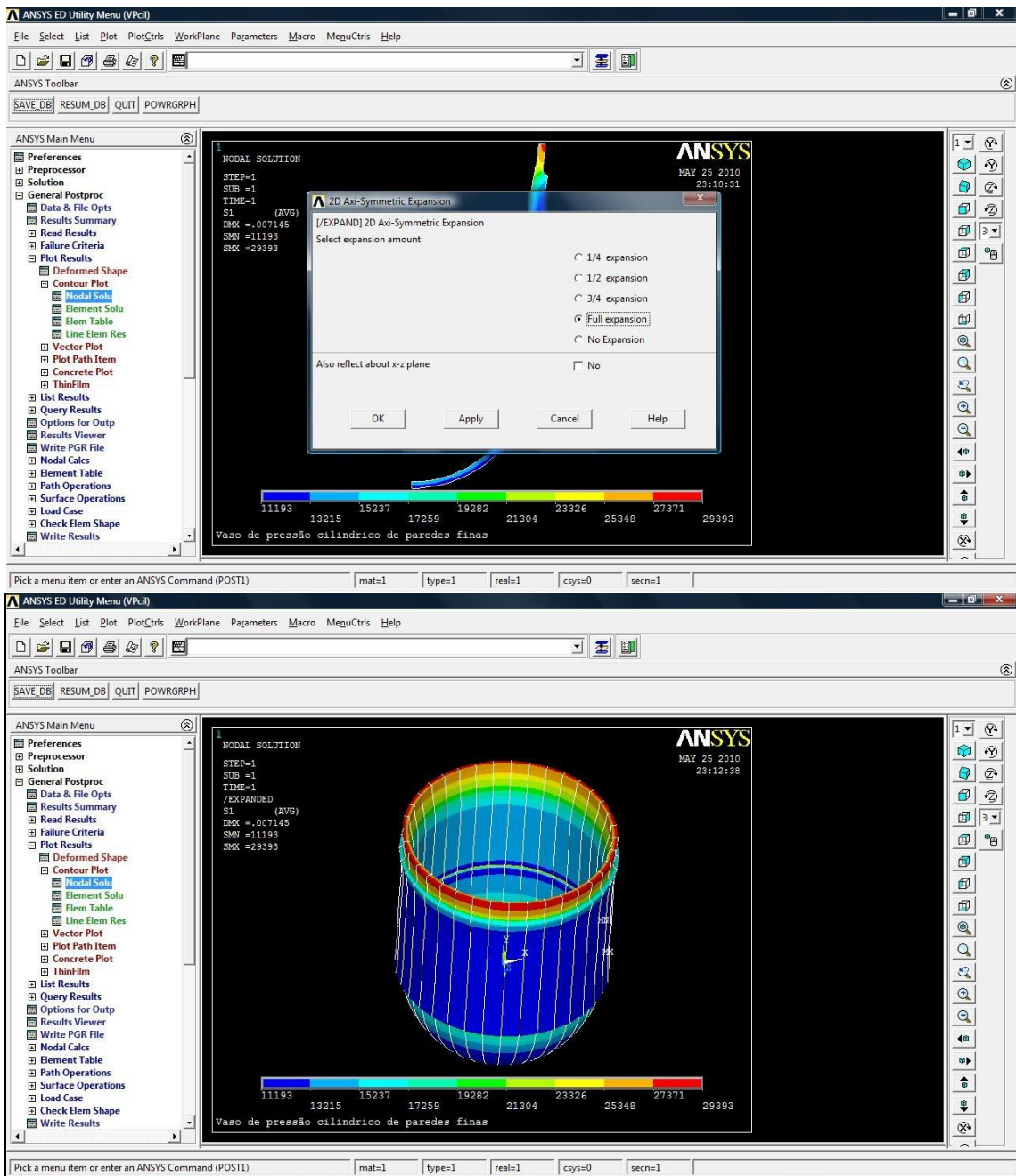
- ✓ No ANSYS Toolbar, clicar em “POWRGRPH”;
- ✓ Na nova janela selecionar “ON” e clicar em “OK”;



#### 4.1.1. Expande modelo Axissimétrico para melhorar a visualização:

- ✓ No “Ansys Utility Menu”, selecionar “PlotCtrls”, “Style”, “Symmetry Expansion”, “2D Axi-Symmetric...”;
- ✓ Na nova janela, selecionar “Full expansion” e clicar em “OK”;





## 5. SALVANDO ARQUIVOS E SAINDO DO PROGRAMA:

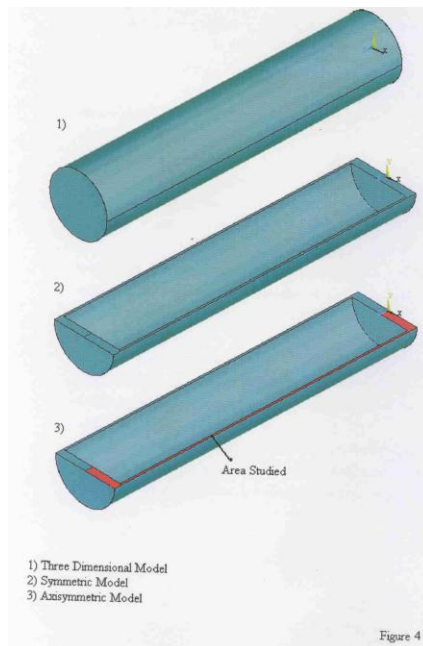
- ✓ No ANSYS Tollbar, clicar em “SAVE\_DB” para salvar no Data Base;
- ✓ Ainda no ANSYS Toolbar, clicar em “QUIT”;
- ✓ Na nova janela, seleccionar a opção “Save everything” e clicar em “OK”.



## SUGESTÃO:

Ler e criar o vaso de pressão do artigo do site:

<http://www.mbari.org/education/internship/98interns/98internpapers/98heckman.pdf>



O artigo faz uma comparação dos resultados usando diversos modelos matemáticos.

Com o uso de diferentes elementos finitos existentes na biblioteca do ANSYS.

Além disso, propõe o uso de elementos de contato para a modelagem das uniões entre cilindro e tampas.