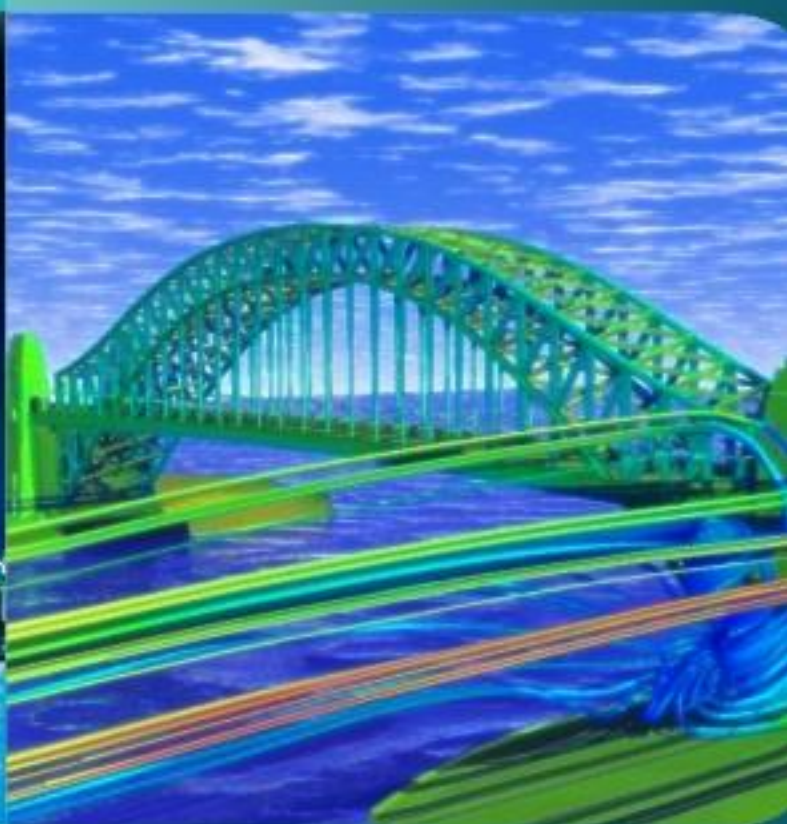




2010

# 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



ESTUDO DE UM BLOCO DE FUNDAÇÃO PARCIALMENTE CARREGADO

## ESTUDO DE UM BLOCO DE FUNDAÇÃO PARCIALMENTE CARREGADO

### INTRODUÇÃO

O objetivo deste exemplo é a verificação do comportamento estrutural de um bloco de fundação parcialmente carregado. Neste exemplo consideramos um bloco de concreto armado servindo como estrutura de ligação de um pilar, com uma das dimensões bastante grande, e uma cortina de estacas existentes sobre todo o comprimento do pilar. A figura 1 mostra esquematicamente tal estrutura.

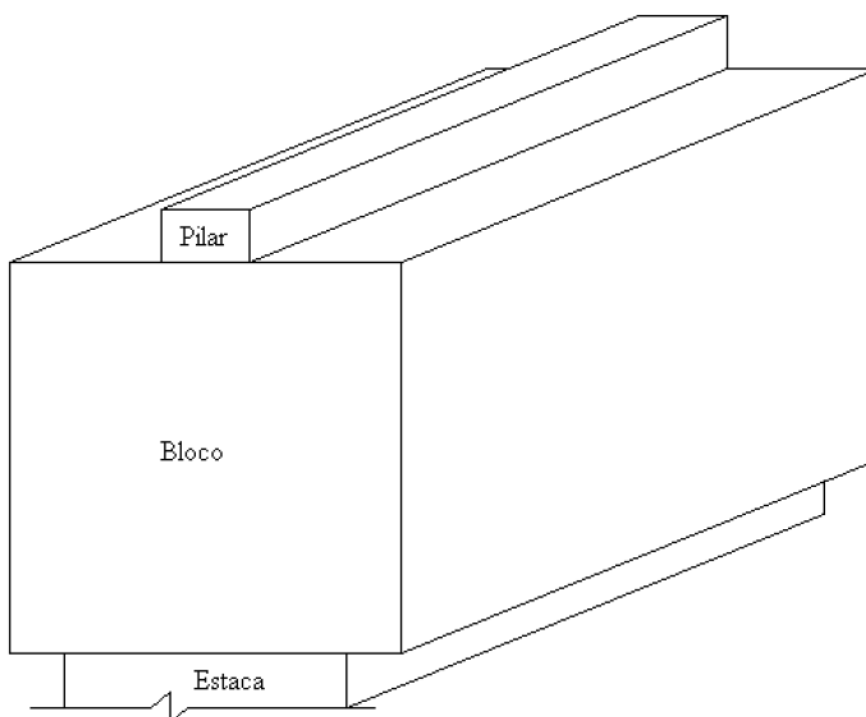


Figura 1 – Esquema de bloco de fundação.

Trata-se de uma estrutura tridimensional, porém, adotando-se algumas aproximações aplicáveis a esse problema, este bloco pode ser analisado através de um modelo bidimensional. Verificamos que o bloco possui uma das dimensões predominantes sobre as outras duas ao longo desta dimensão (comprimento). A seção transversal permanece constante. O carregamento (pilar) é constante ao longo de todo o comprimento do bloco e possuem componentes apenas no plano da seção transversal. Os apoios (estacas), por sua vez, também ocorrem ao longo do comprimento. Com sistemas de coordenadas vamos situar o eixo  $z$  ao longo do comprimento do bloco e os eixos  $x$  e  $y$  no plano da sua seção transversal.

Verificamos que nestas condições a componente de deformação ao longo do comprimento do bloco  $\epsilon_z$  é nula embora a tensão  $\sigma_z$  seja diferente de zero. As demais componentes de deformação  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  e  $\epsilon_{xy}$ , no plano  $xy$ , são nulas.

Estas são as características de um Estado Plano de Deformações, que pode ser analisado através de um modelo bidimensional composto apenas pela seção transversal do bloco (plano xy), conforma a figura 2. Como o modelo é simétrico em relação ao eixo y, podemos impor condições de contorno de simetria e utilizar o modelo apresentado na figura 3.

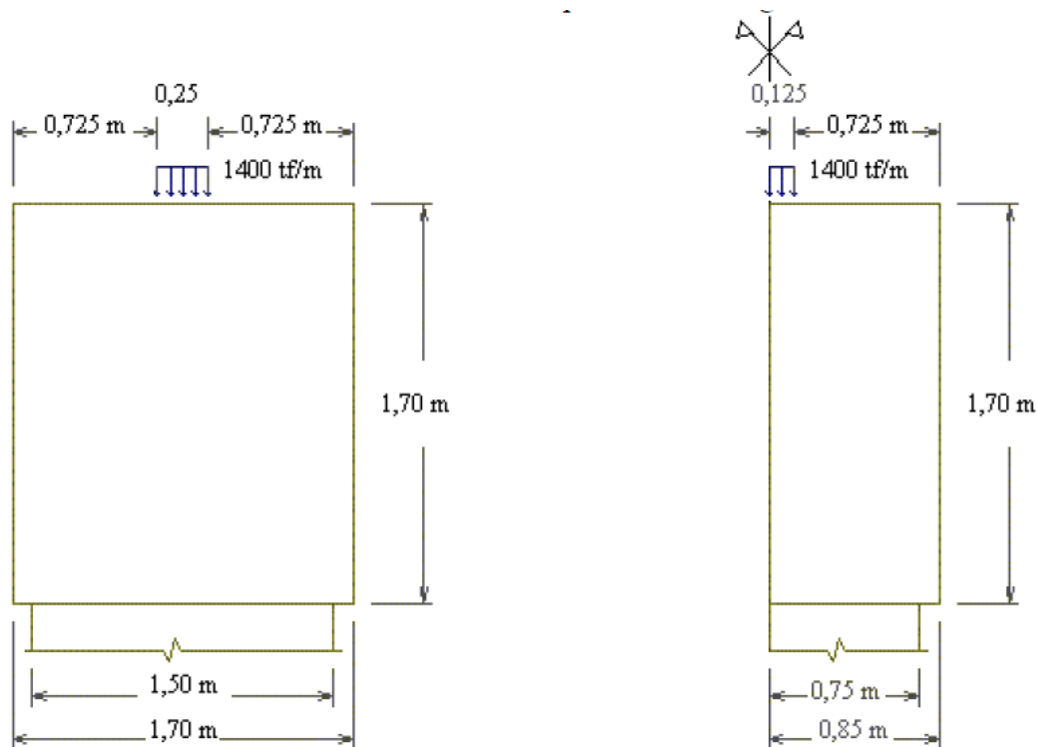


Figura 2 e Figura 3 – Seção transversal e modelo adotado.

Utilizaremos uma formulação cinemática, isto é os deslocamentos serão interpolados. Na escolha do elemento finito a ser utilizado verifica-se que o problema plano de deformações está bem definido no espaço  $(H_1(\Omega))^2$  e, portanto a interpolação a ser adotada para os campos de deslocamentos deve ser tal que garanta a continuidade de deslocamentos em todo o domínio do corpo  $\Omega$ , podendo suas derivadas serem descontínuas entre elementos. Pode-se escolher desde elementos de deformações constantes, como o triângulo de três nós e o quadrilátero de quatro nós, até elementos de ordem mais elevada, como o triângulo de seis nós e o quadrilátero de oito nós. A malha de elementos finitos deverá ser densificada nas regiões onde ocorre concentração de tensões. Nas regiões de imposição do carregamento distribuído, a malha também não deve ser pobre para garantir uma melhor distribuição das tensões.

### PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

- Modelo bidimensional utilizando estado plano de deformações;
  - Dimensões conforme a figura 3.

## PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

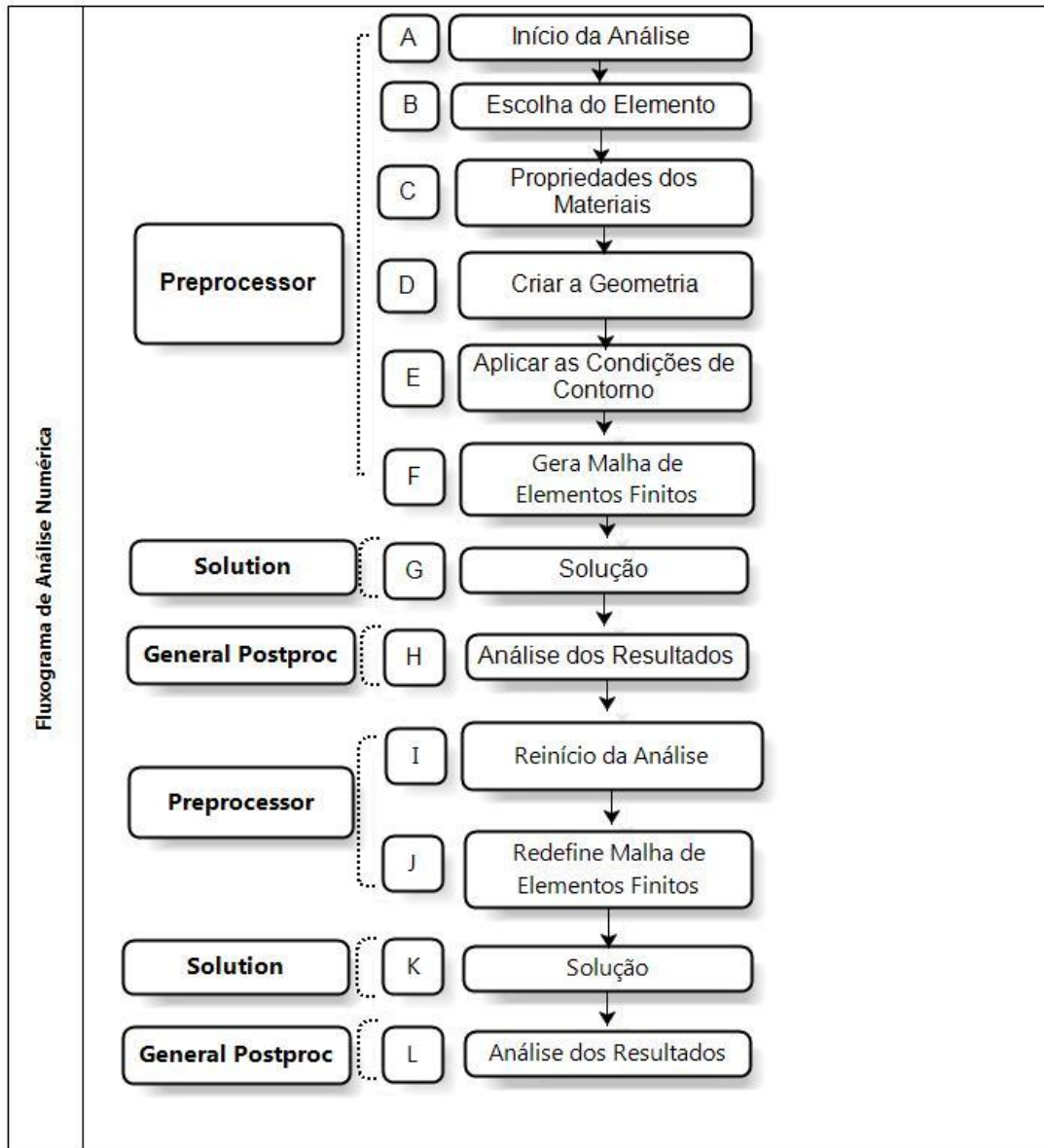
- Concreto Armado:
  - EX = Módulo de Elasticidade Longitudinal ou de Young:  $E = 2.5E6 \text{ tf/m}^2$ ;
  - NUXY = Coeficiente de Poisson = 0.2

## CARGAS

- Pilar:
  - Carga do pilar: 1400 tf/m

## 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: “**Bloco parcialmente carregado**”;
- ✓ 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: “**Bloco**”;
- ✓ 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

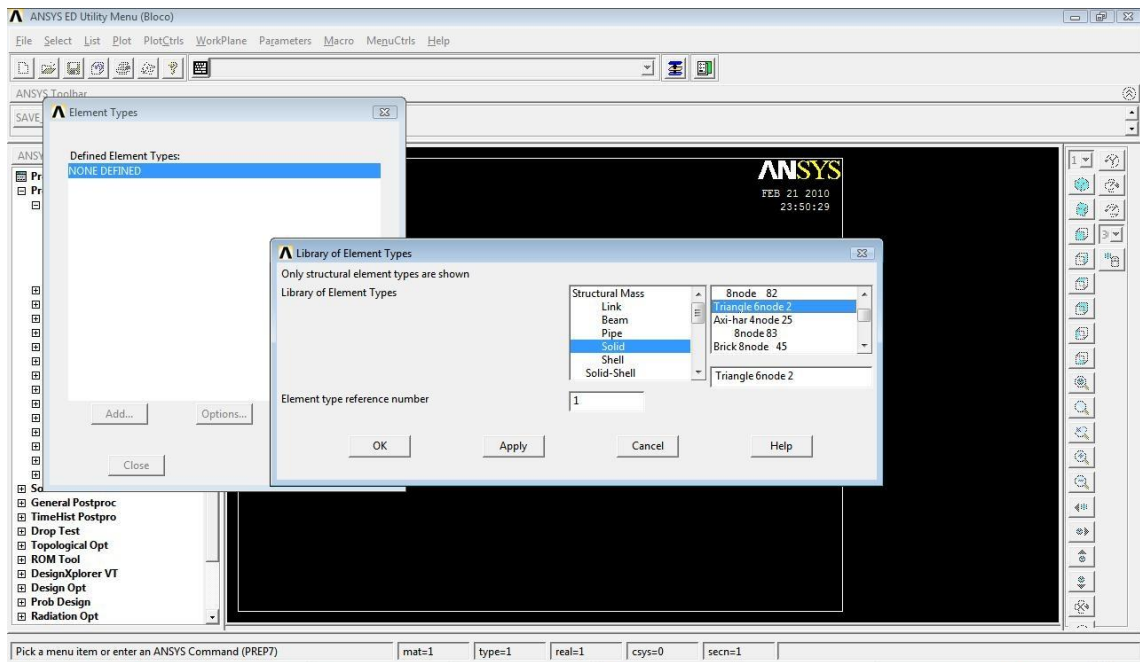
- ✓ No ANSYS Main Menu, clicar em “Preprocessor”.

B

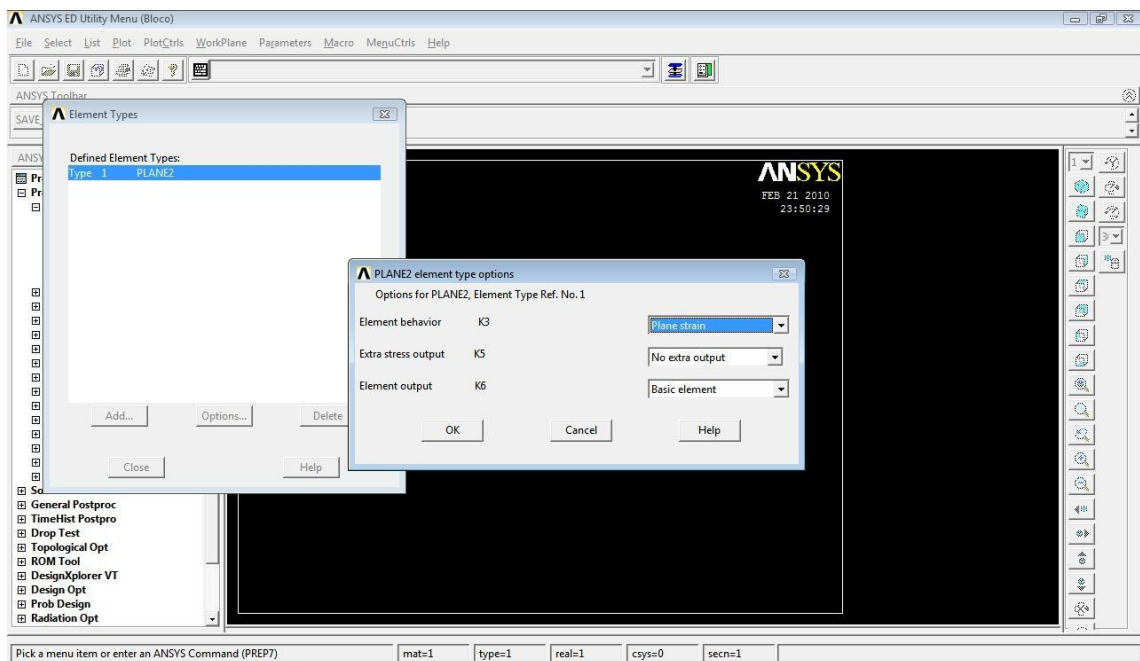
2.1. *Escolhe o tipo de elemento finito que será usado:*

- ✓ 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    Plane strain**
- ✓ Clicar em “OK”;

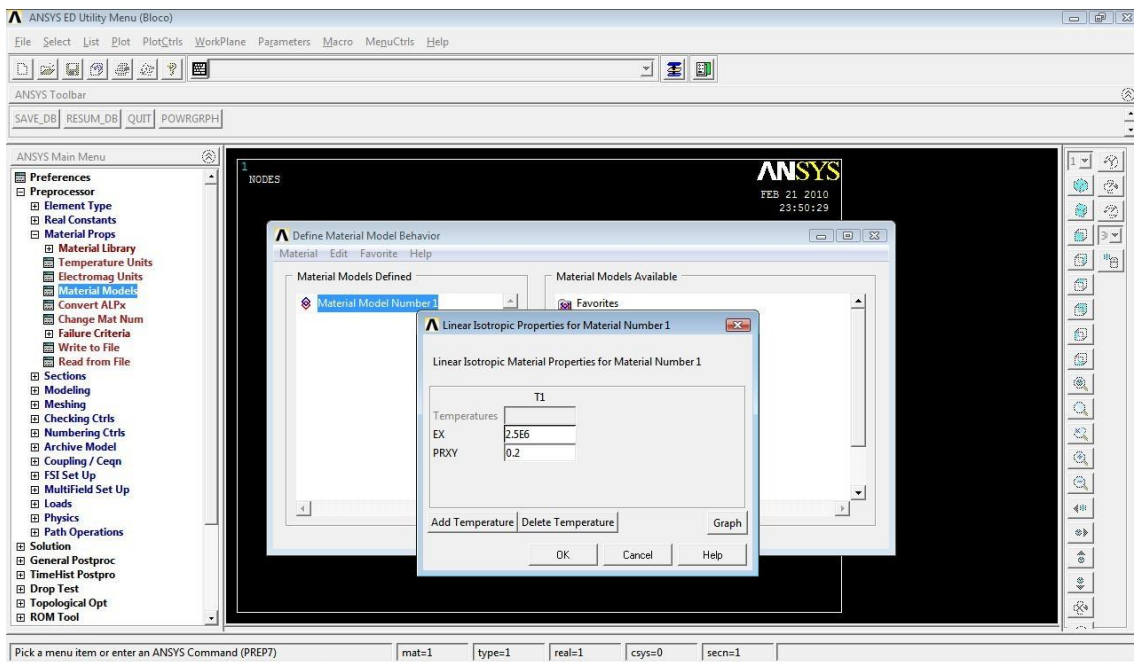


C

## 2.2. *Define 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” 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 = **2.5E6**;
  - PRXY = **0.2**;
- ✓ Fechar a janela “Define Material Model Behavior”.



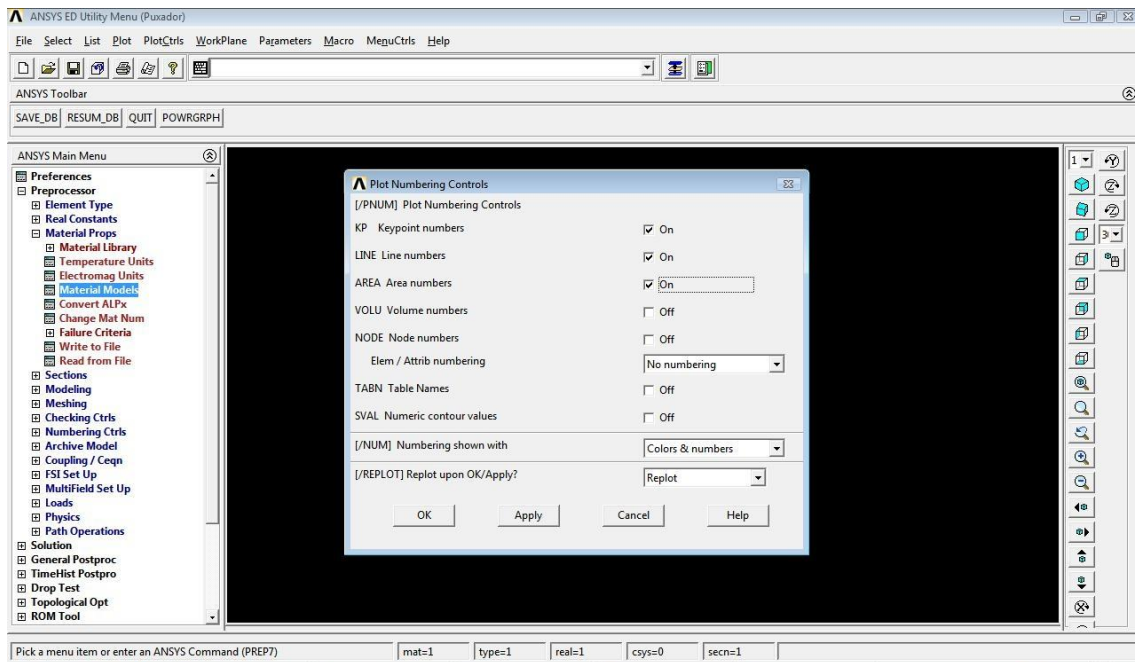
D

## 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:
  - Keypoints **ON**
  - Lines **ON**
  - AREA **ON**
- ✓ Clicar em “OK”.

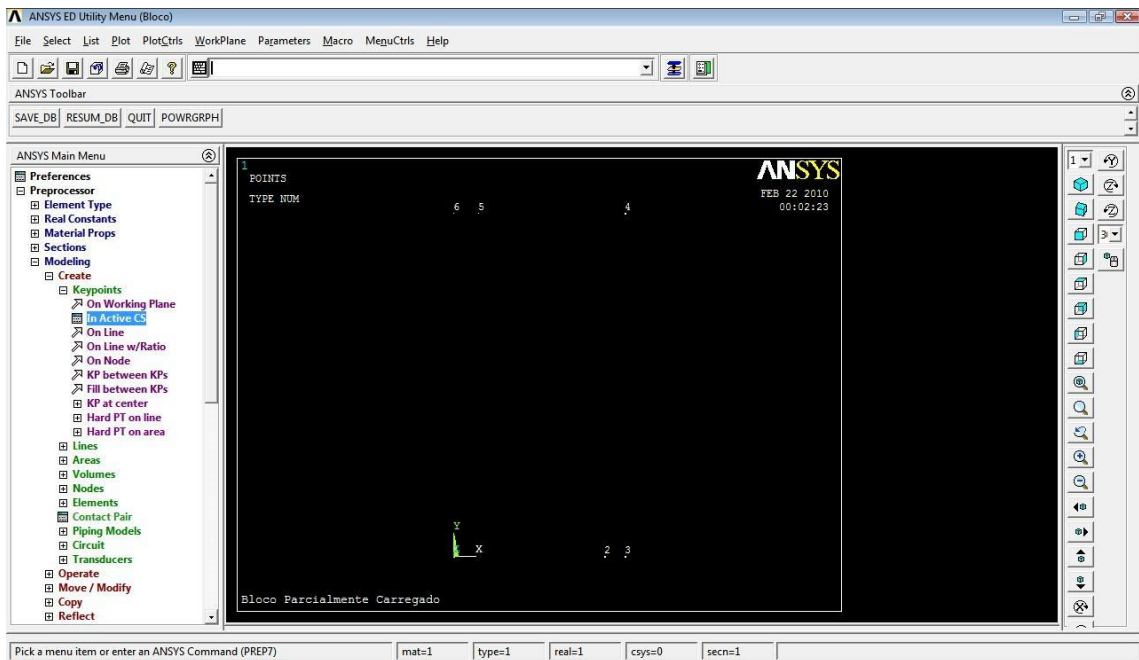




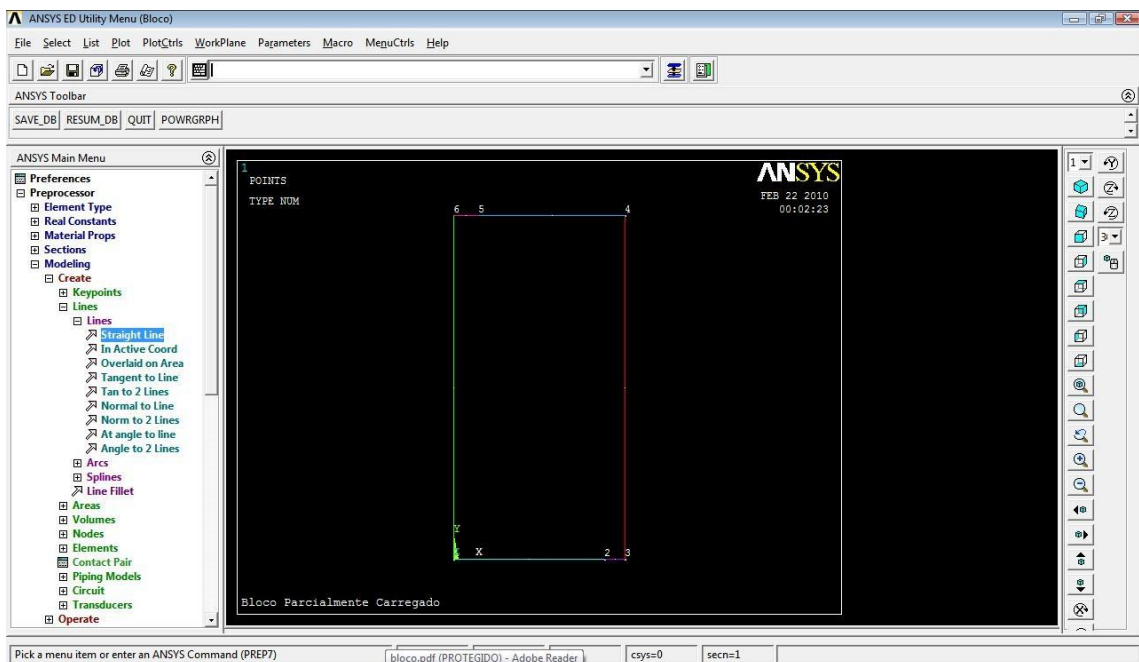
### 2.3.2. Cria o modelo geométrico:

- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Create”, “Keypoints”, “In Active CS”;
- ✓ Na nova janela que abrir, inserir um número para o keypoint que será criado em “NPT” e as coordenadas X e Y;
- ✓ Para criar o primeiro keypoint:
  - NPT Keypoint Number: **1**;
  - X,Y,Z Location in active CS : **X = 0**      **Y = 0**;
- ✓ Clicar em “APPLY”;
- ✓ Para criar o próximo keypoint:
  - NPT Keypoint Number: **2**;
  - X,Y,Z Location in active CS : **X = 0.75**      **Y = 0**;
- ✓ Clicar em “APPLY”;
- ✓ Para criar o próximo keypoint:
  - NPT Keypoint Number: **3**;
  - X,Y,Z Location in active CS : **X = 0.85**      **Y = 0**;
- ✓ Clicar em “APPLY”;
- ✓ Para criar o próximo keypoint:
  - NPT Keypoint Number: **4**;
  - X,Y,Z Location in active CS : **X = 0.85**      **Y = 1.7**;
- ✓ Clicar em “APPLY”;
- ✓ Para criar o próximo keypoint:
  - NPT Keypoint Number: **5**;
  - X,Y,Z Location in active CS : **X = 0.125**      **Y = 1.7**;
- ✓ Clicar em “APPLY”;
- ✓ Para criar o próximo keypoint:
  - NPT Keypoint Number: **6**;
  - X,Y,Z Location in active CS : **X = 0**      **Y = 1.7**;

- ✓ Clicar em “OK”;



- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Create”, “Lines”, “Straight Line”;
- ✓ Na nova janela que abrir, para criar as linhas:
- ✓ Apontar os keypoints 1 e 2 e clicar em “APPLY”;
- ✓ Apontar os keypoints 2 e 3 e clicar em “APPLY”;
- ✓ Apontar os keypoints 3 e 4 e clicar em “APPLY”;
- ✓ Apontar os keypoints 4 e 5 e clicar em “APPLY”;
- ✓ Apontar os keypoints 5 e 6 e clicar em “APPLY”;
- ✓ Apontar os keypoints 6 e 1 e clicar em “OK”;

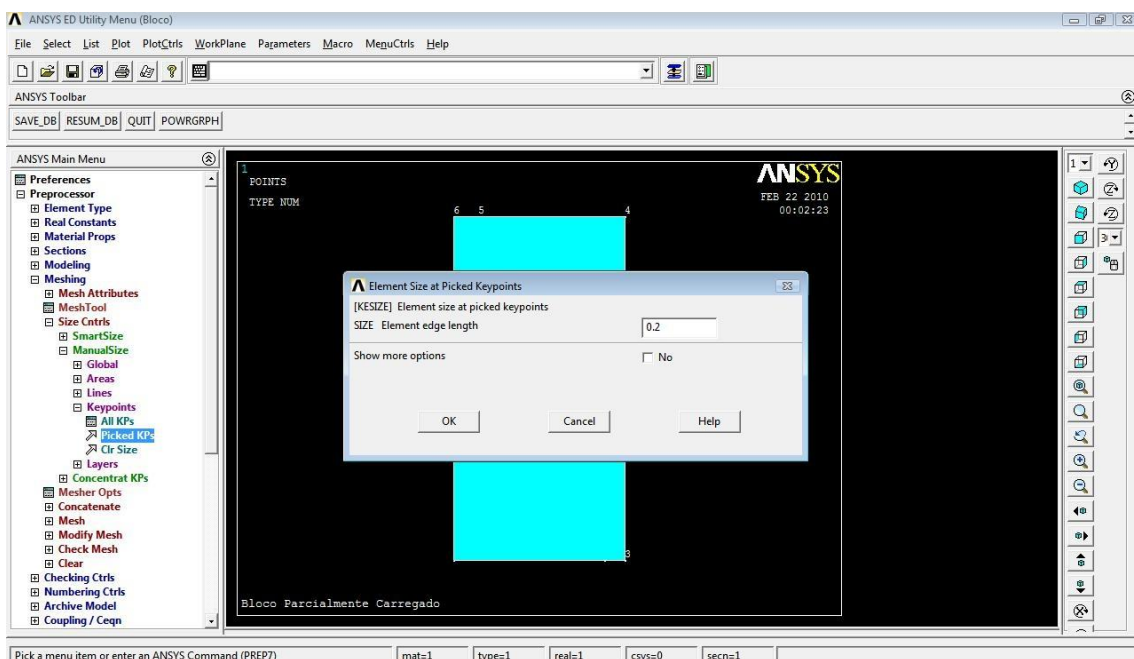


- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Create”, “Area”, “Arbitrary”, “Through KPs”;
- ✓ Na nova janela que abrir, apontar os keypoints 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 1;
- ✓ Clicar em “OK”.



### 2.3.3. Refinando a malha para os keypoints selecionados:

- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Meshing”, “Size Cntrl”, “Manual Size”, “Keypoints”, “Picked KPs”;
- ✓ Selecionar “PICK ALL”;
- ✓ Na nova janela, definir:
  - [KESIZE] SIZE 0.2
- ✓ Clicar em “OK”.



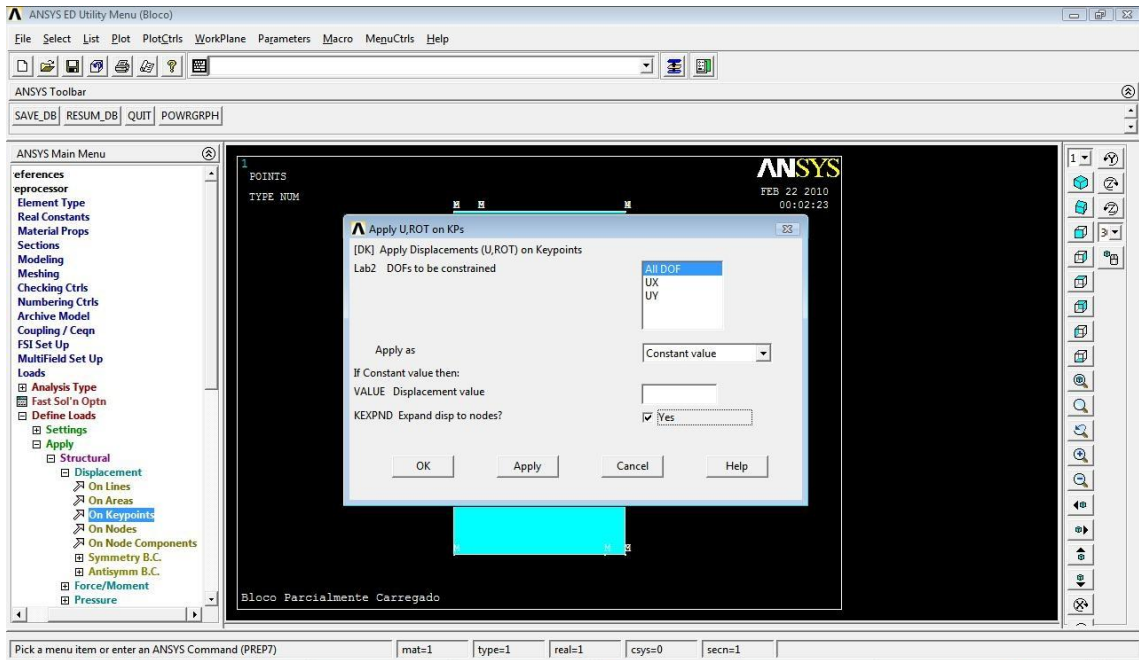
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Meshing”, “Size Cntrl”, “Manual Size”, “Keypoints”, “Picked KPs”;
- ✓ Apontar o Keypoint **4**;
- ✓ Na nova janela, definir:
  - [KESIZE] SIZE           **0.15**
- ✓ Clicar em “APPLY”;
- ✓ Apontar o Keypoint **5**;
- ✓ Na nova janela, definir:
  - [KESIZE] SIZE           **0.0625**
- ✓ Clicar em “APPLY”;
- ✓ Apontar o Keypoint **6**;
- ✓ Na nova janela, definir:
  - [KESIZE] SIZE           **0.0625**
- ✓ Clicar em “OK”;

E

## 2.4. **Aplicar as condições de contorno na modelagem sólida:**

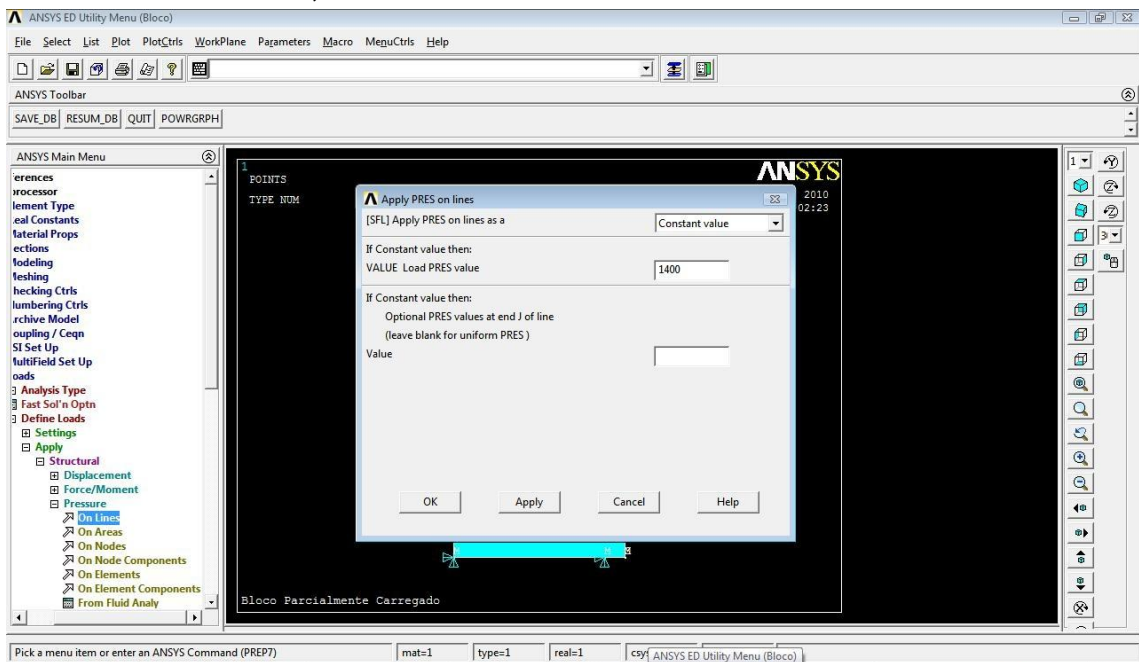
### 2.4.1. *Fornece condição de contorno:*

- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Loads”, “Define Loads”, “Apply”, “Structural”, “Displacement”, “Symmetry B.C.”, “On Lines”;
- ✓ Na nova janela que abrir apontar a linha **6** e clicar em “OK”;
  
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Loads”, “Define Loads”, “Apply”, “Structural”, “Displacement”, “On Keypoints”;
- ✓ Apontar os Keypoints **1 e 2** 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”;



### 2.4.2. Aplicar as cargas:

- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Loads”, “Define Loads”, “Apply”, “Structural”, “Pressure”, “On Lines.”;
- ✓ Apontar a linha 5 e clicar em “OK”;
- ✓ Na nova janela inserir o valor da carga a ser distribuída na linha:
  - VALUE        **1400**;
  - VALJ         **0**;
- ✓ Clicar em “OK”;



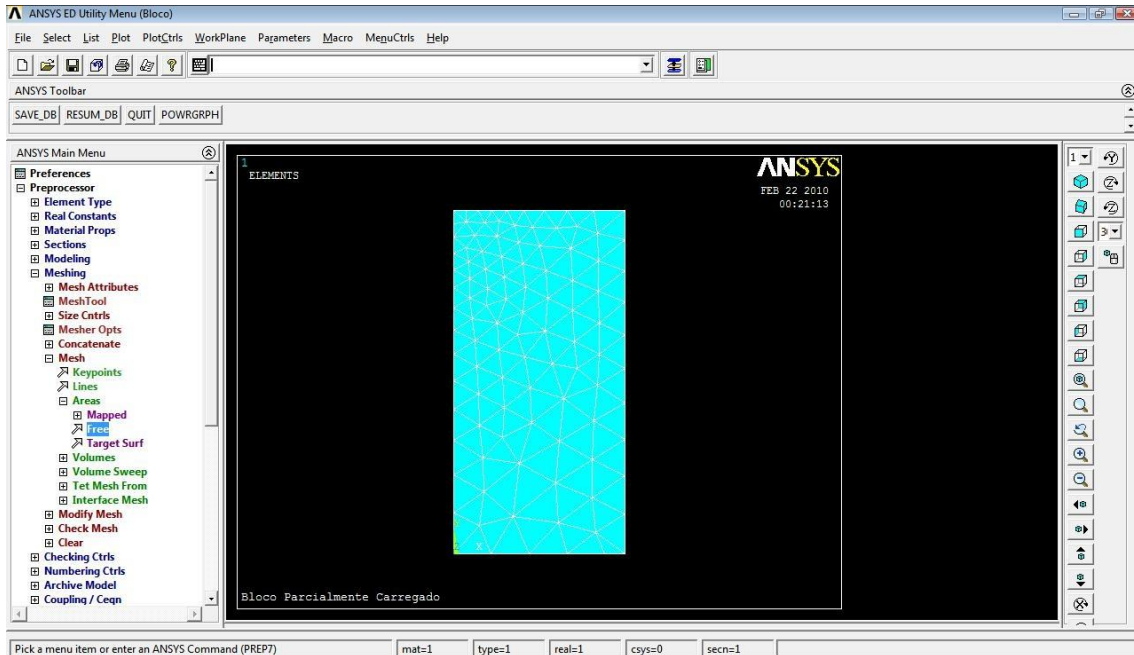
### 2.4.3. Salvando dados no arquivo Bloco.db

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

F

## 2.5. Gera a malha de elementos finitos:

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



G

## 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.

H

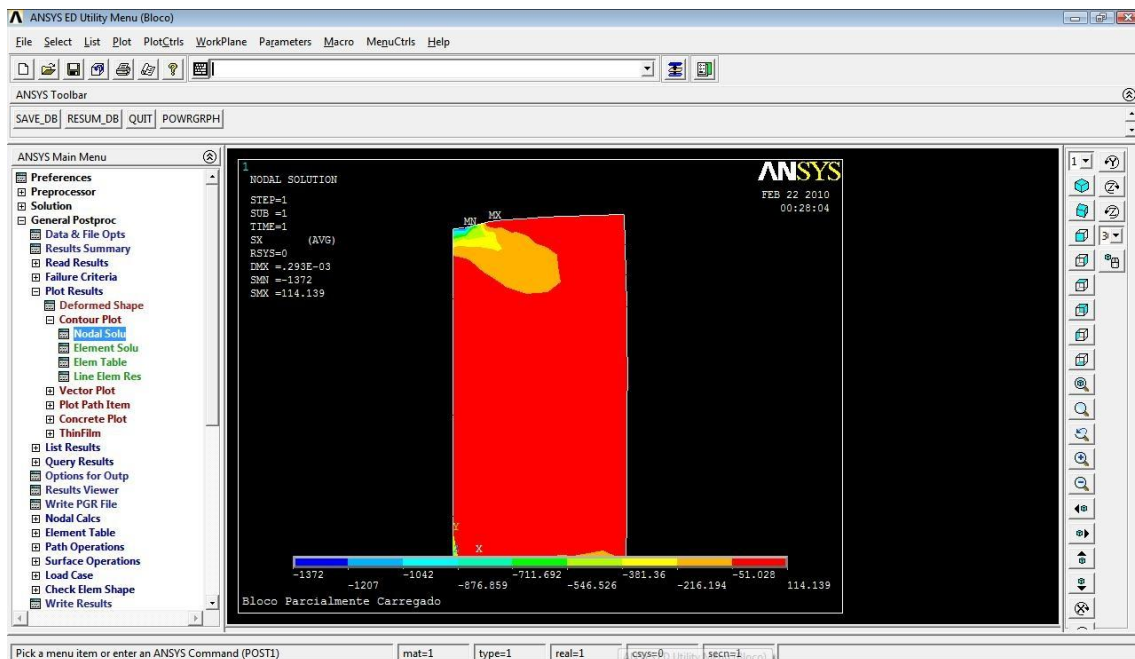
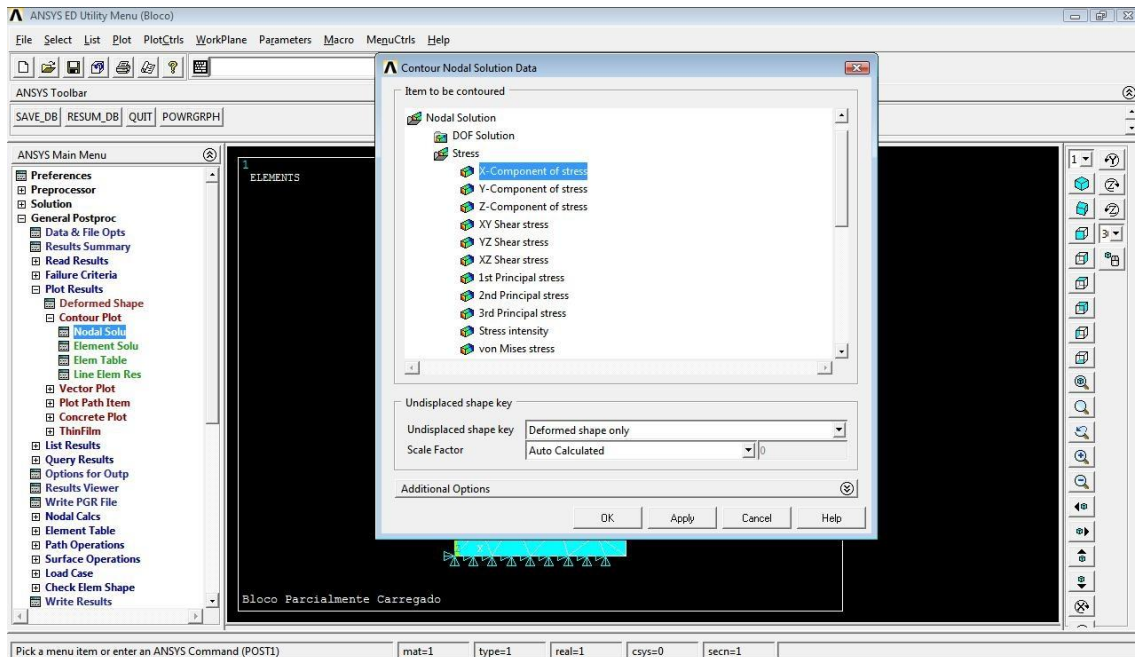
## 4. PÓS PROCESSAMENTO

### 4.1. Gera, lista e plota os resultados:

- ✓ No “ANSYS Main Menu” dentro do “General Postproc” clicar em “Plot Results”, “Contour Plot”, “Nodal Solu”;
- ✓ Selecionar:
  - “STRESS”;



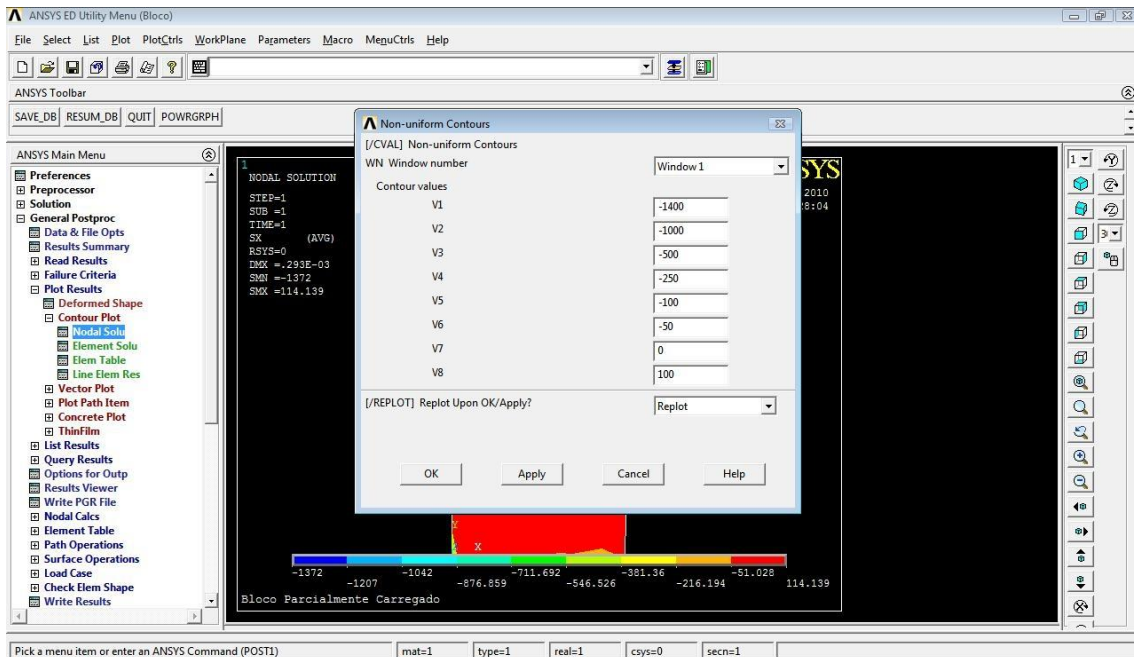
- X – Component of stress.
- ✓ Clicar em “OK”;



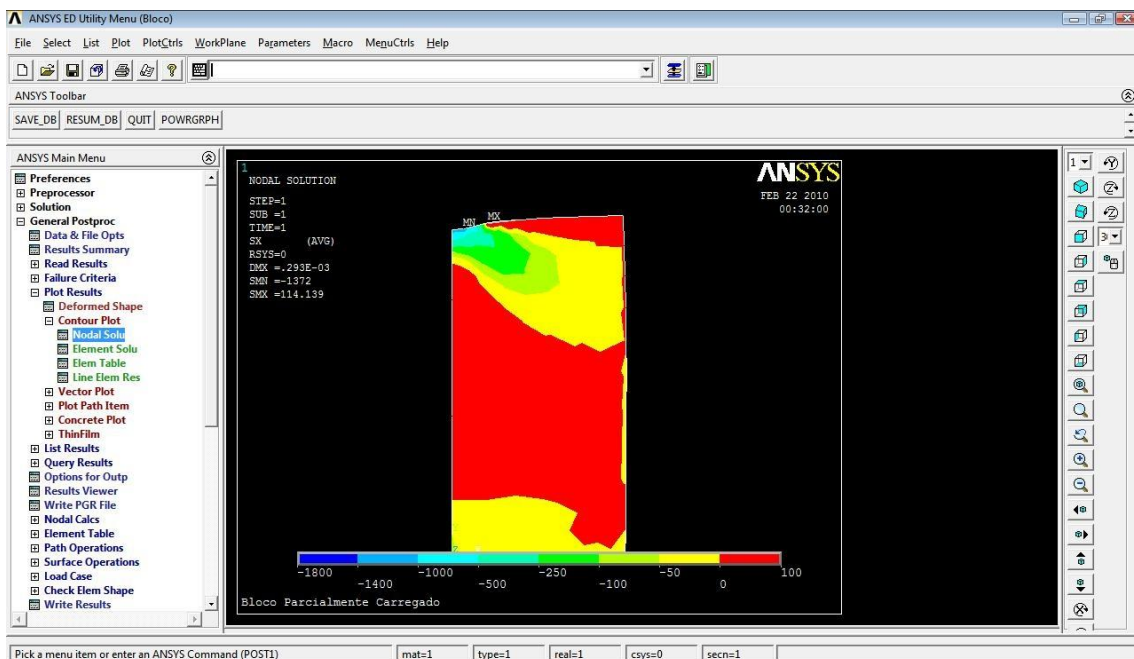
- ✓ Para modificar a escala de cores ir no “ANSYS Utility Menu”, “Plot Ctrls”, “Style”, “Contours”, “Non-uniforme contours”, “Contour value” e preencher a tabela:

- -1400;
- -1000;
- -500;
- -250;
- -100;
- -50;

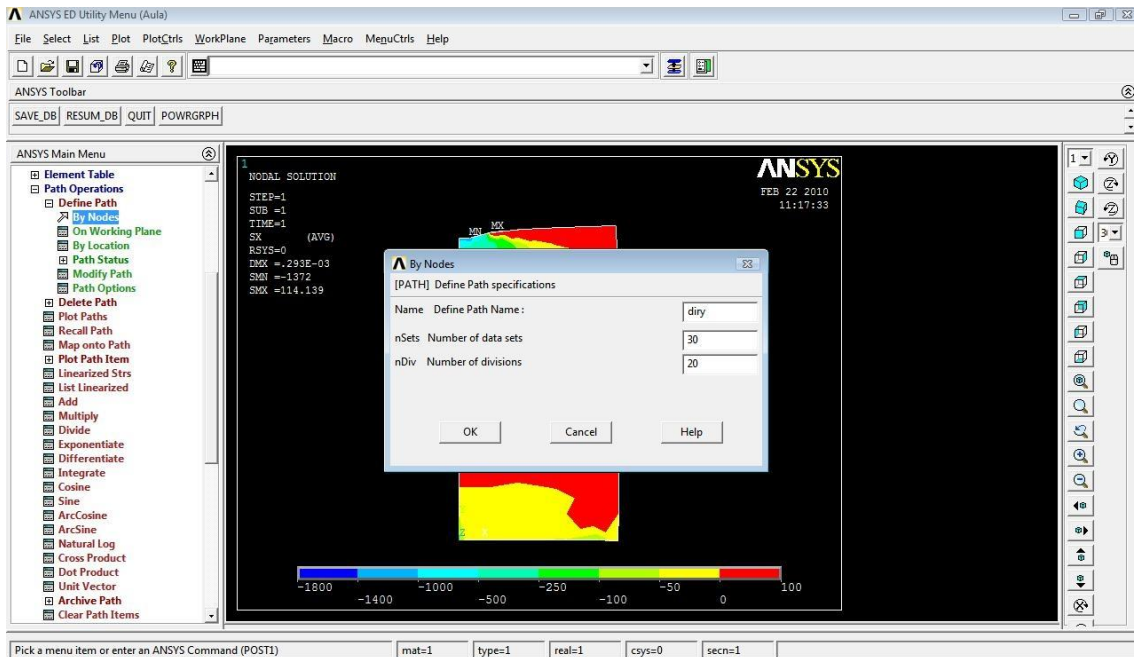
- 0;
- 100.
- ✓ Clicar em “OK”;



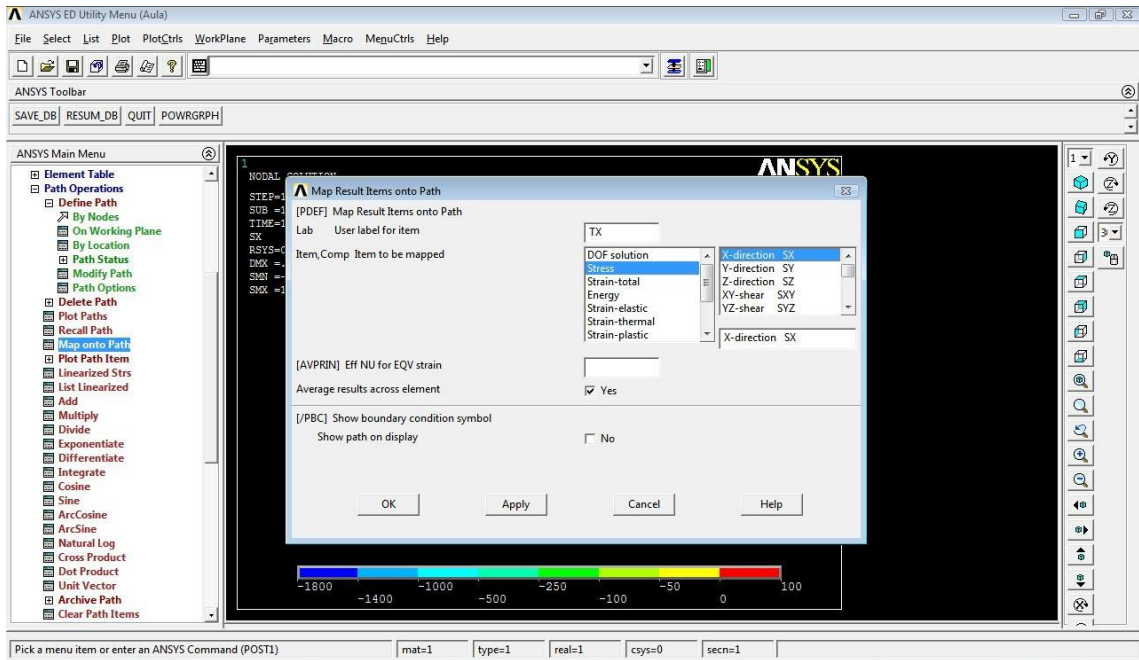
- ✓ No “ANSYS Main Menu” dentro do “General Postproc” clicar em “Plot Results”, “Contour Plot”, “Nodal Solu”;
- ✓ Selecionar:
  - “STRESS”;
  - X – Component of stress.
- ✓ Clicar em “OK”;



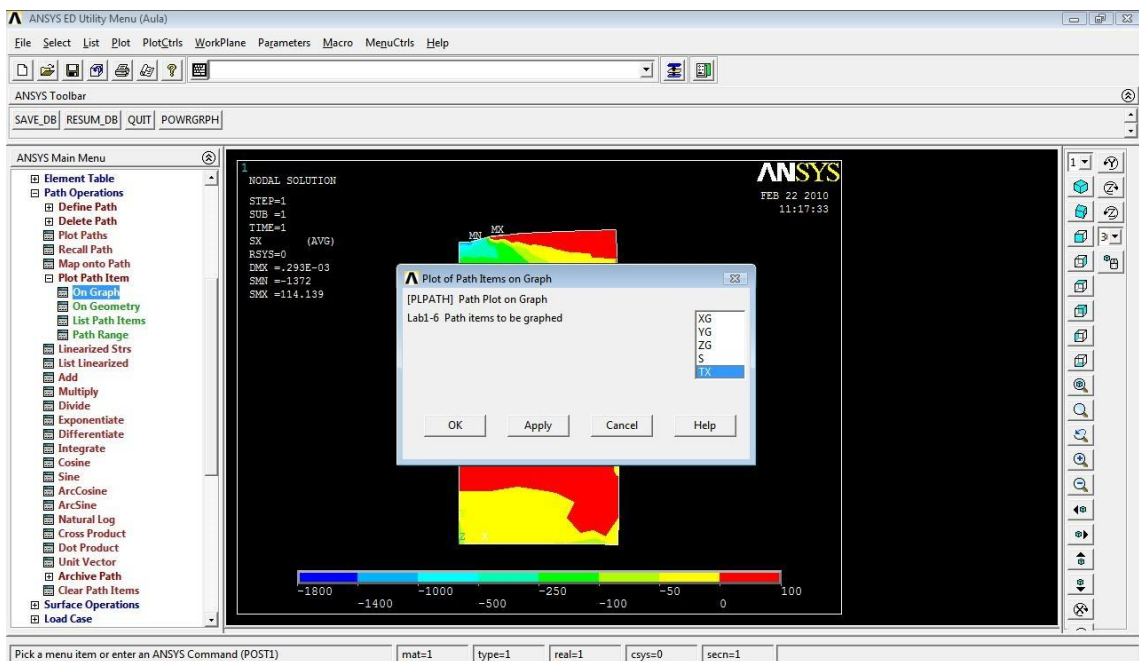
- ✓ No “ANSYS Main Menu” dentro do “General Postproc” clicar em “Path Operation”, “Define Path”, “By nodes +”; (cria um “caminho”, de um nó até outro, onde se desejam plotar resultados).
  - Apontar os nós **1** e **46** e clicar em “OK”;
  - Na nova janela, [PATH], definir:
    - Name: **dir y;**
    - nSets: **30;**
    - nDiv: **20;**
- ✓ Clicar em “OK”;



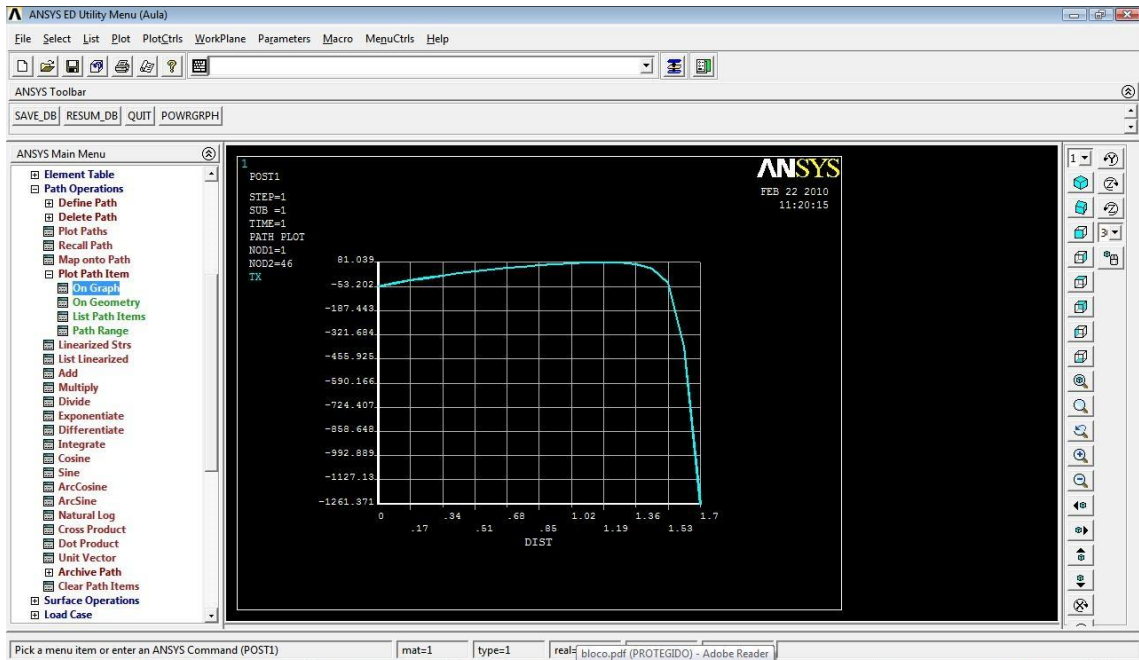
- ✓ Dentro do “General Postproc” clicar em “Path Operation”, “Define Path”, “Map onto path”;
- ✓ Na nova janela inserir:
  - Lab **TX;**
  - Item, comp **Stress;**
  - **X – direction – SX;**
- ✓ Clicar em “OK”



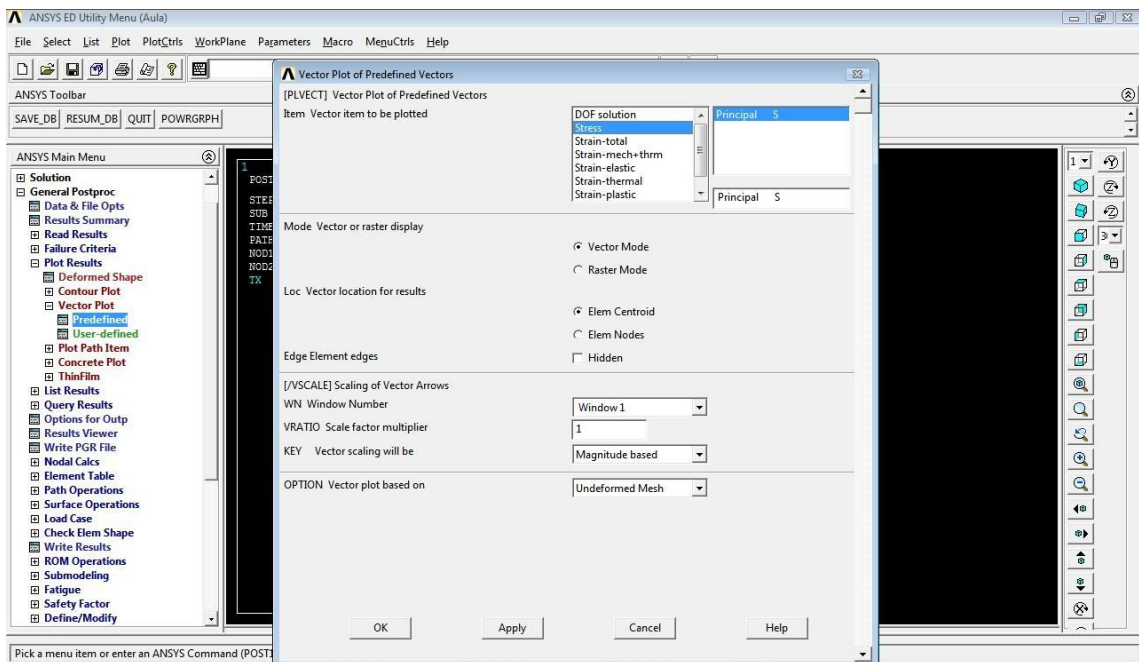
- ✓ Dentro do “General Postproc” clicar em “Path Operation”, “Plot Path Item”, “On Graph”;
- ✓ Na janela, selecionar “TX” e clicar em “OK”;



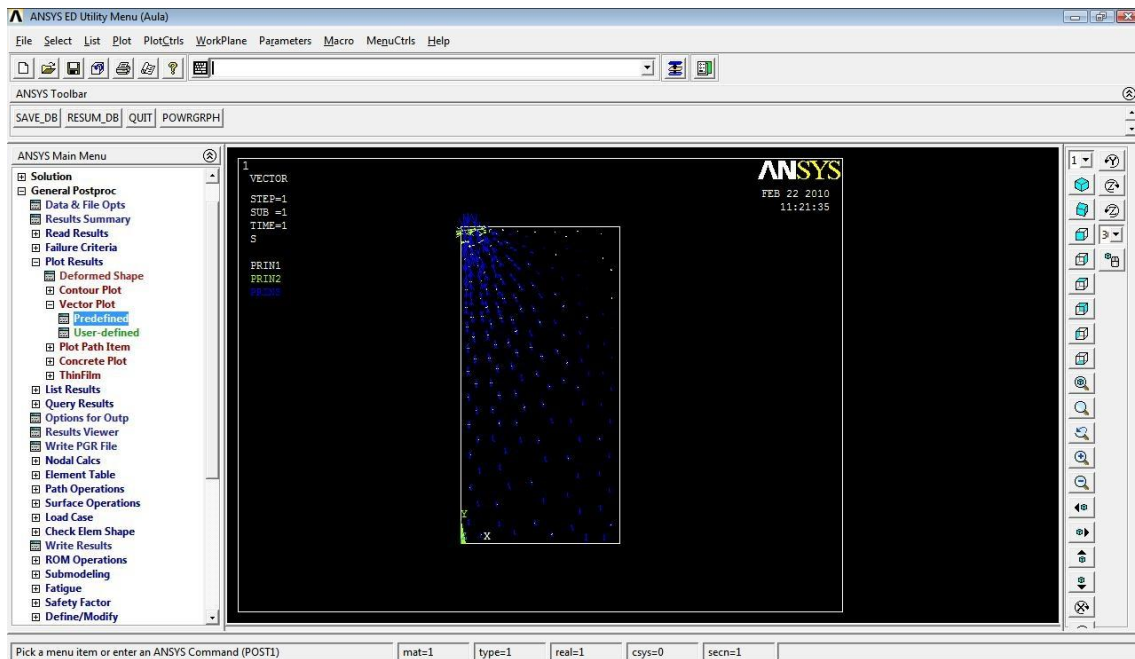
- ✓ O programa plotará em um gráfico o valor da tensão na direção de X entre os nós 1 e 46 selecionados anteriormente;



- ✓ Dentro do “General Postproc” clicar em “Plot Results”, “Vector Plot”, “Predefined”;
- ✓ Na nova janela, selecionar “Stress”, “Principal S” e clicar em “OK”.







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

I

### 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 “Bloco.db”.

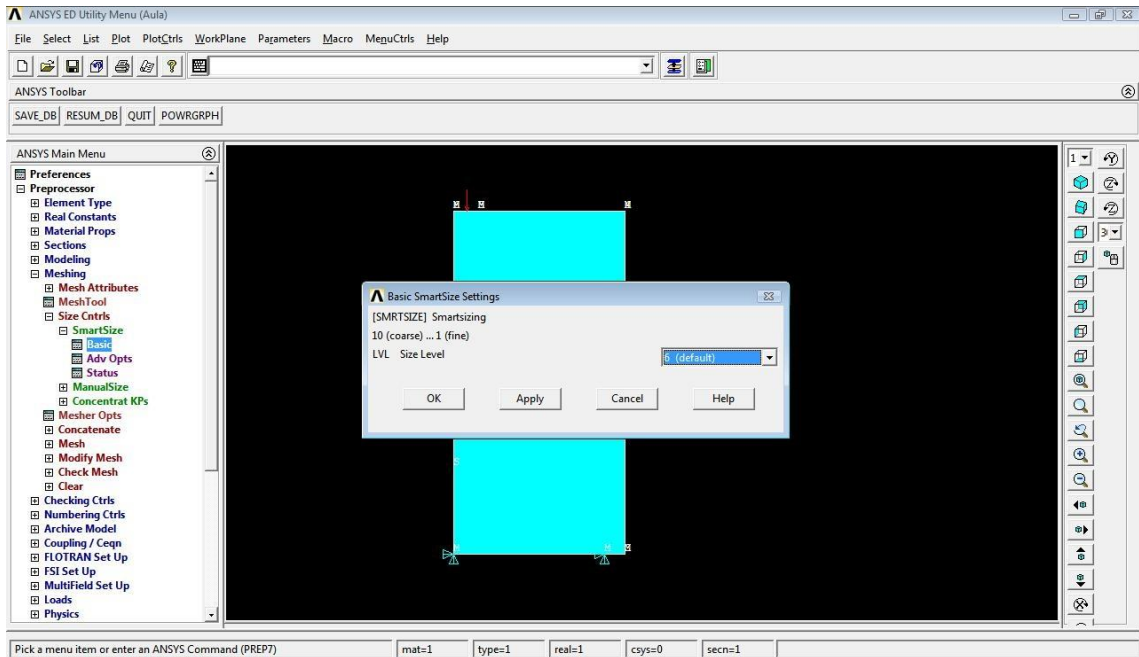
J

### 6. ENTRA NO PRÉ-PROCESSAMENTO

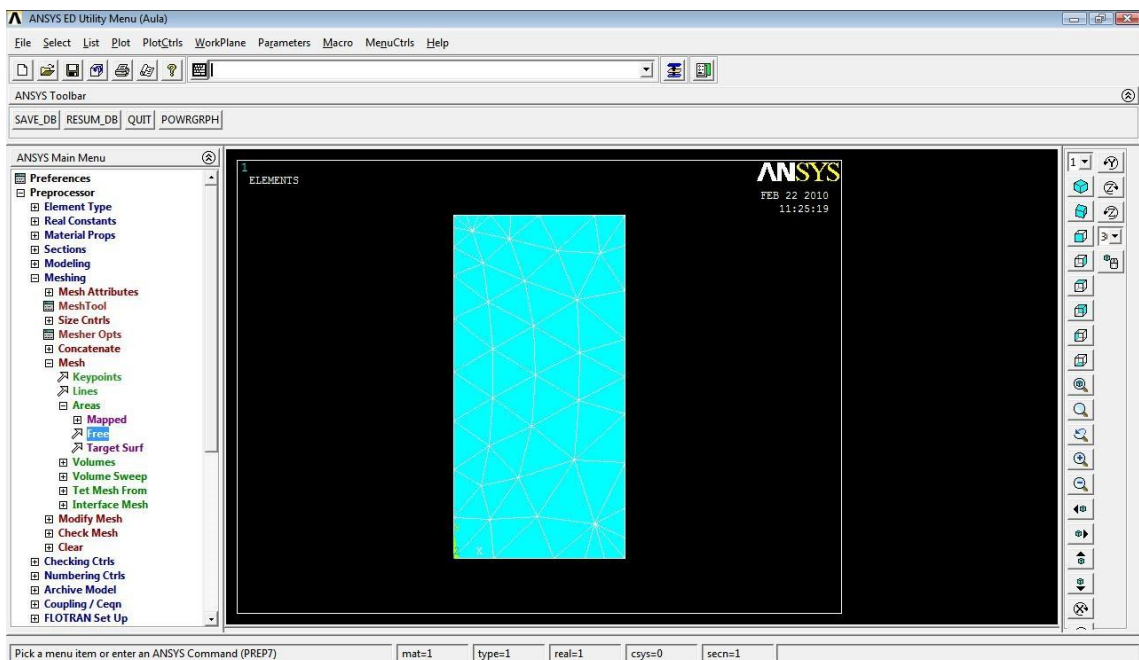
#### 6.1. *Definindo uma nova densidade para a malha de elementos finitos:*

- ✓ No “ANSYS Main Menu” dentro do “Preprocessor” clicar em “Meshing”, “Size Cntrl”, “Smart Size”, “Basic”;
- ✓ Selecionar nível:
  - LVL **6 (default)**;
- ✓ Clicar em “OK”;





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



K

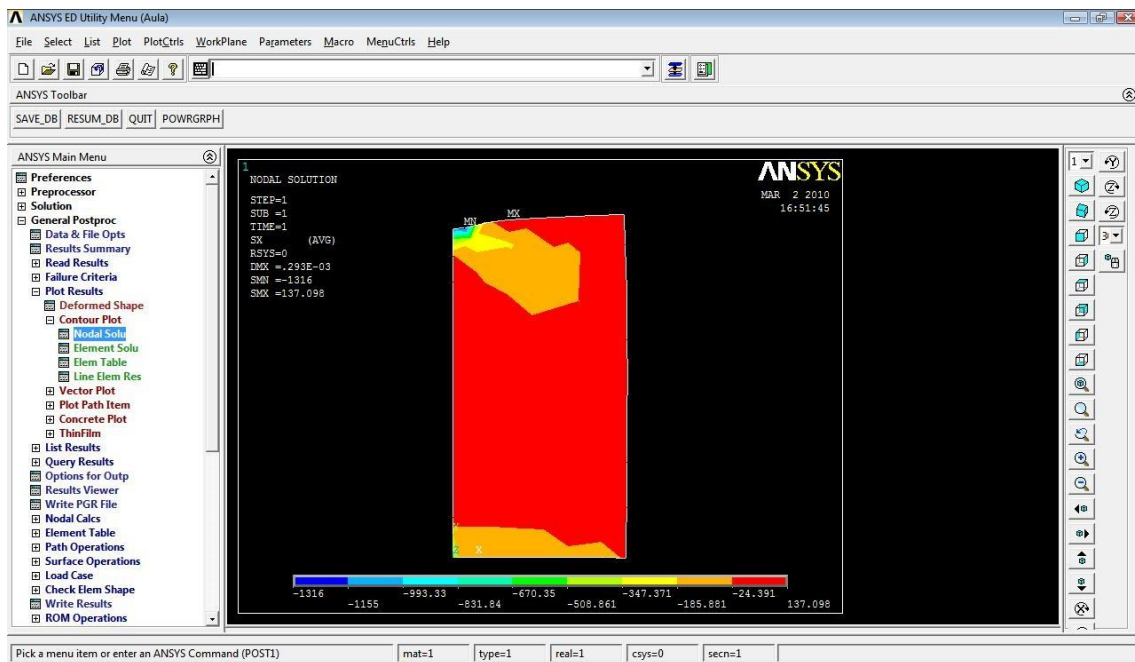
## 7. SOLUÇÃO

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

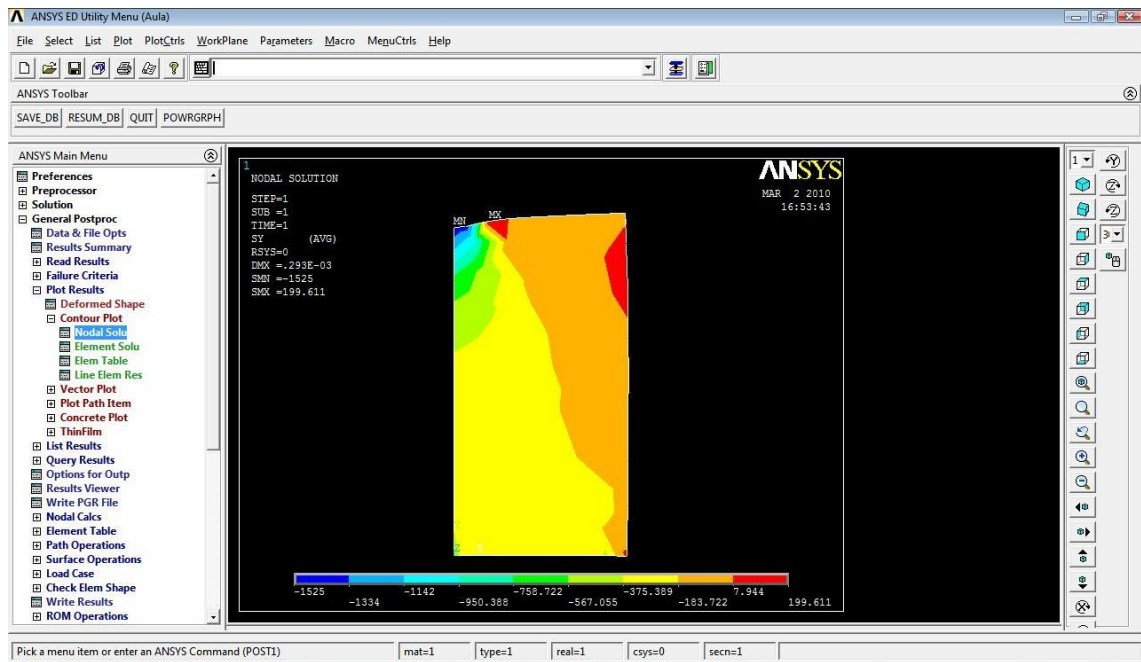
## 8. PÓS PROCESSAMENTO

### 4.1. Gera, lista e plota os resultados:

- ✓ No “ANSYS Main Menu” dentro do “General Postproc” clicar em “Plot Results”, “Contour Plot”, “Nodal Solu”;
- ✓ Selecionar:
  - “STRESS”;
    - **X – Component of stress.**
- ✓ Clicar em “OK”;



- ✓ No “ANSYS Main Menu” dentro do “General Postproc” clicar em “Plot Results”, “Contour Plot”, “Nodal Solu”;
- ✓ Selecionar:
  - “STRESS”;
    - **Y – Component of stress.**
- ✓ Clicar em “OK”;



## 9. 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”.

## CONCLUSÃO

Podemos observar no modelo proposto que neste tipo de estrutura ocorrem concentrações de tensões nas regiões de contato pilar x bloco e bloco x estaca. Verificamos também que a redistribuição de tensões ao longo do bloco gera tensões de tração na direção X em algumas regiões do bloco. Estas características devem ser cuidadosamente observadas para garantir um correto dimensionamento do bloco e suas armaduras.

A figura a seguir apresenta o artigo “Erro no Morumbi poderia gerar tragédia”, publicado no jornal Folha de São Paulo em 6 de abril de 1997. Neste artigo é relatado um erro de projeto nos blocos de apoio das colunas de sustentação da arquibancada do Estádio Morumbi em São Paulo. Estes blocos foram executados sem armaduras horizontais, resultando no aparecimento de fissuras nas regiões onde ocorrem as tensões de tração, devido às redistribuições de tensão.

A concentração de tensões ocorre em diversas estruturas como, por exemplo, pilares com estreitamento da seção. Estes pilares, embora sejam estruturas tridimensionais, também podem ser modelados planos (bidimensionais) considerando a ocorrência do Estado Plano de Tensões.



Figura 4 - Artigo Folha de São Paulo.