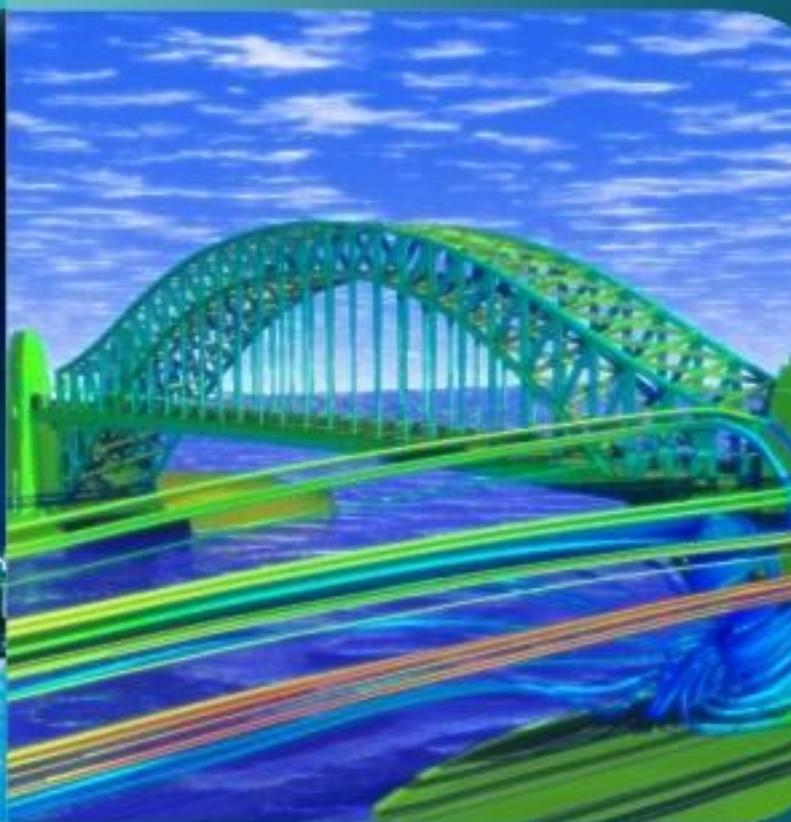




2010

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



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



**CABO SUSPENSO CARREGADO
TRANSVERSALMENTE**

CABO SUSPENSO CARREGADO TRANSVERSALMENTE

INTRODUÇÃO

A estrutura composta de um cabo suspenso de área A , composta de um material com Módulo de Elasticidade E , está submetido a cargas concentradas, conforme mostra a figura abaixo, apresentado por Beer e Johnson, na referência Mecânica Vetorial para Engenheiros, Vol. 1 - Estática. Pede-se determinar a máxima tensão no cabo e as reações nos apoios.

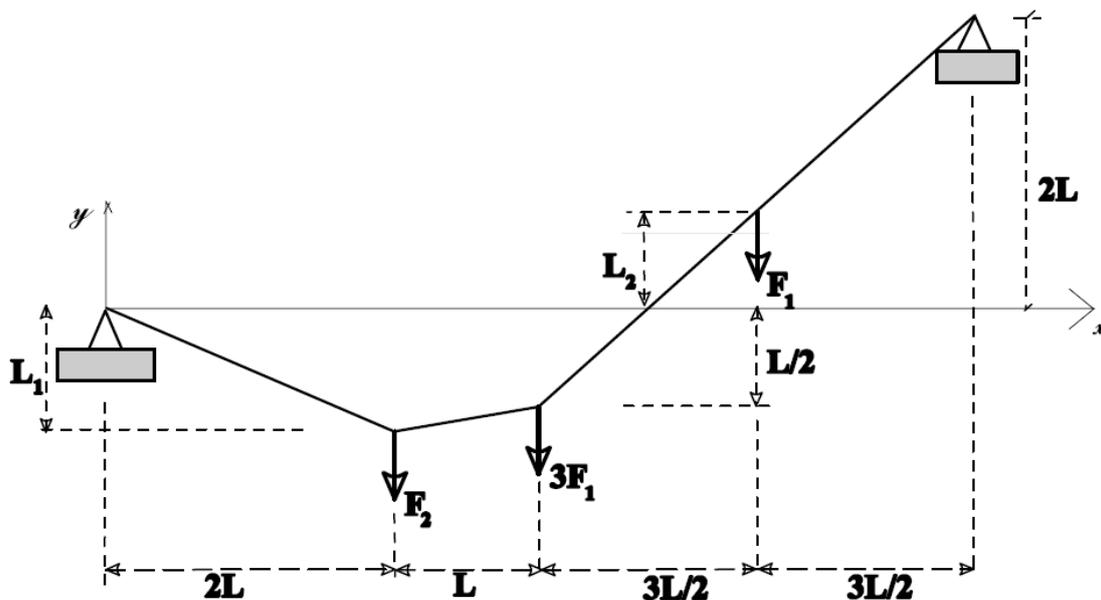


Figura 1 – Esquema do problema a ser solucionado.

PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

- Área da seção transversal do cabo: $A = 0,1\text{ft}^2$;
- $L = 10$ ft;
- $L_1 = 5,56$ ft;
- $L_2 = 5.83$ ft.

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

- Módulo de elasticidade do material do cabo: $20E6$ ksi.

CARGAS

- $F_1 = 4$ kips;
- $F_2 = 6$ kips.

Já que se trata de uma estrutura composta por cabos suspensos, utilizaremos o elemento STIF10 em sua análise, com uma solução iterativa fixando em três o número de substeps, com uma deformação inicial de 1E-8 para dar uma rigidez inicial ao cabo. A figura a seguir mostra a malha de elementos finitos utilizada.

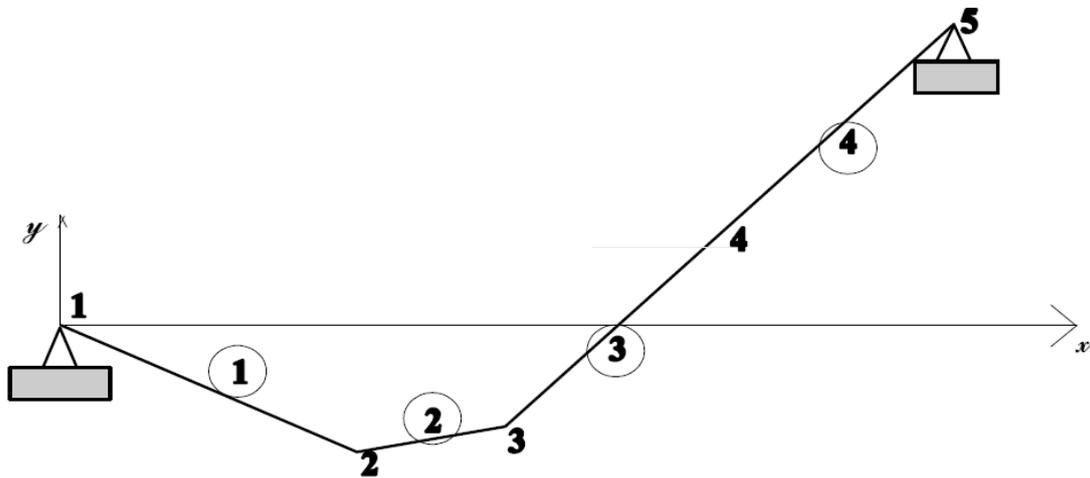


Figura 2 – Malha de elementos finitos utilizada.

ANEXO

A) LINK 10 – Elemento de barra tridimensional submetido apenas à tração ou apenas a compressão.

i. Descrição do elemento LINK 10:

LINK10 é um elemento tridimensional, não linear, com a possibilidade de atuar apenas na tração ou apenas na compressão. Com a opção de atuar apenas na tração, a rigidez é removida se o elemento é comprimido (simulando um cabo solto). A flexão não está incluída.

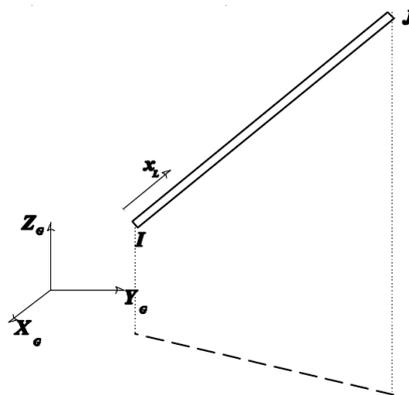


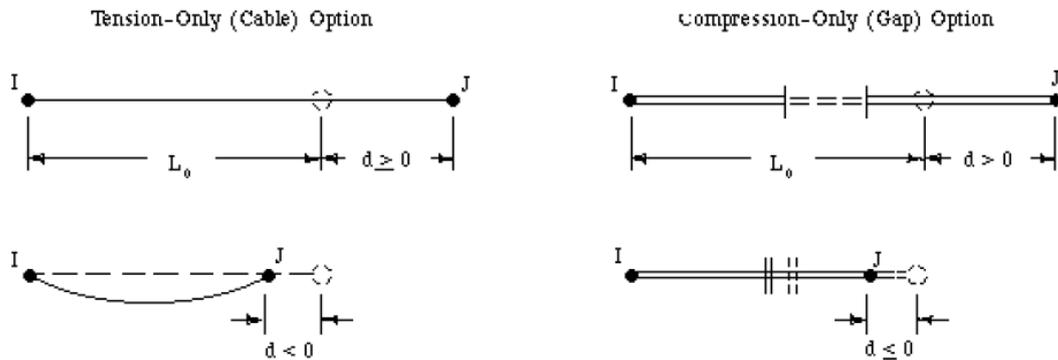
Figura 3 – Elemento LINK 10.

ii. **Características do elemento LINK 10:**

a. **Nome na biblioteca do ANSYS ED 9.0:** LINK 10;

b. **Nós:** 2 (i – j);

c. **Graus de liberdade:** 3 DOF - UX, UY e UZ, três translações segundo os eixos x y e z, respectivamente;

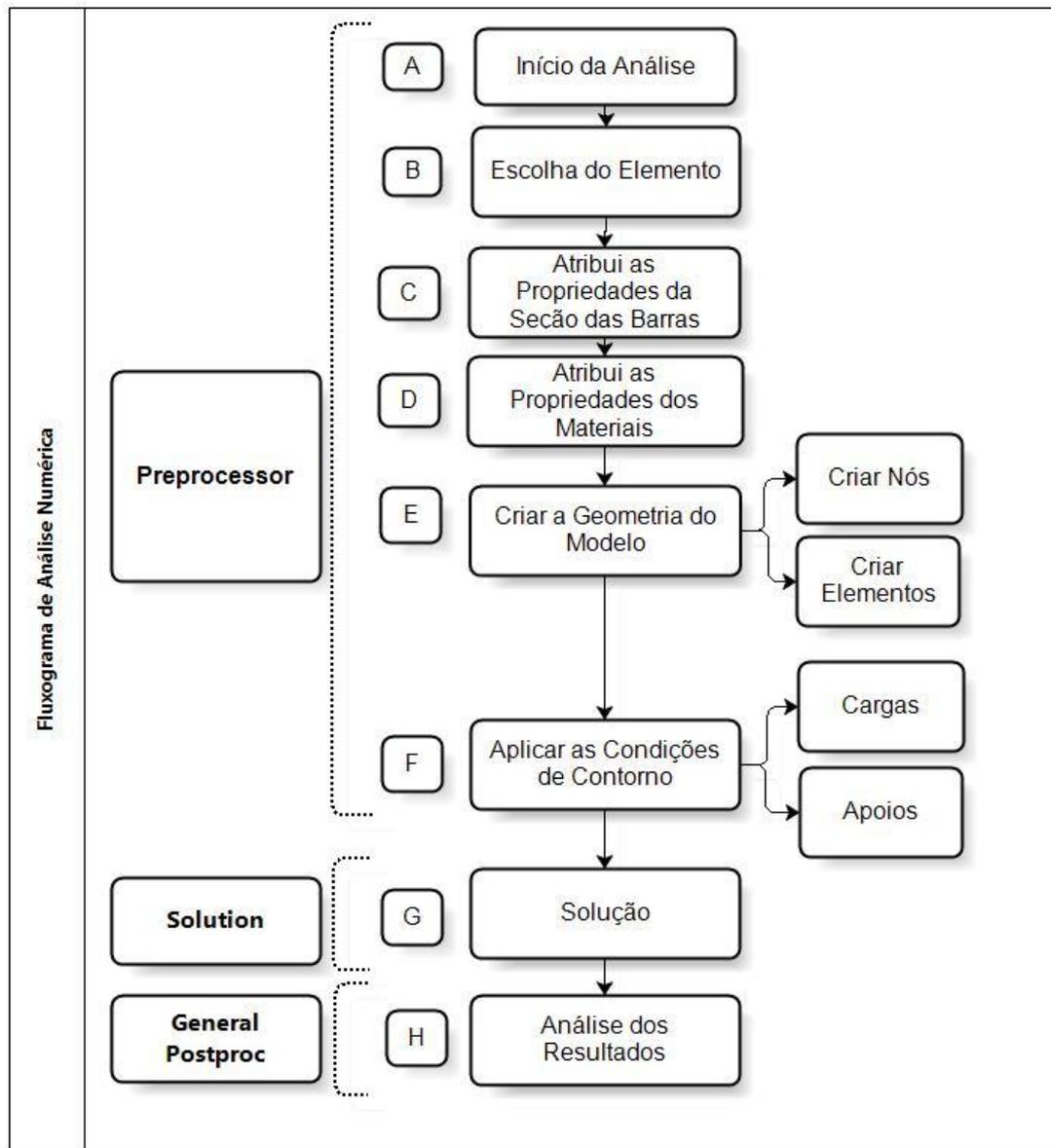


- KEYOPT (2) = 0 Sem rigidez associada ao cabo solto;
- KEYOPT (2) = 1 Pequena rigidez associada ao cabo solto para movimentos longitudinais;
- KEYOPT (2) = 2 Pequena rigidez associada ao cabo solto para movimentos longitudinais e perpendiculares (aplicáveis apenas com stress stiffening);
- KEYOPT (3) = 0 Opção de atuar com o cabo apenas na tração (cabo);
- KEYOPT (3) = 1 Opção de atuar com o cabo apenas na compressão (folga);
- Constantes Geométricas:
 - R_1 = área da seção transversal;
 - R_2 = ISTRN deformação inicial; Se ISTRN for negativo e KEYOPT(3) = 0, o cabo é inicialmente solto. Se ISTRN for positivo e KEYOPT(3) = 1, o cabo possui inicialmente uma folga.
- Propriedades dos Materiais: Comando MP, label, NSET, valor onde label é:
 - EX = Módulo de Elasticidade;
 - ALPX = Coeficiente de dilatação térmica;
 - DENS = Densidade;
- Cargas:
 - Admite prescrição nos deslocamentos: comandos D, DSYM e DK;
 - Admite cargas concentradas nos nós: comandos F, FK;
 - Para inserção de cargas de inércia (peso próprio, por exemplo) utilizar ACEL;
- Resultados: (os mais importantes fornecidos pelo programa)
 - Deslocamentos e deformações;

- Condição do elemento (tensão ou cabo solto, compressão ou folga), através da variável:
 - STAT = 1 Cabo em tração ou em compressão;
 - STAT = 2 Cabo solto ou folga aberta;
- Tensão normal ou axial $S(ALX) = LS(1)$;
- Esforços normais nas barras $MFOR(X) = SMISC(1)$;
- Restrições:
 - Comprimento do elemento deve ser positivo;
 - Área da seção transversal não deve ser negativa;
 - Se ISTRN = 0.0, a rigidez do elemento é incluída no primeiro substep;
 - O procedimento de solução é o seguinte: a condição do elemento no início do primeiro substep é determinada pelo dado de entrada da deformação inicial. Se este valor é negativo, para a opção de cabo em tração ou positivo para a opção de folga na compressão então a rigidez do elemento é adotada como nula para este substep. Se no final do substep STAT=2, é descartada a rigidez do elemento para o próximo passo. Se STAT=1, a rigidez do elemento é incluída no próximo passo. Se nenhum outro efeito está presente, a convergência ocorre caso o status não mude entre dois substeps consecutivos;
 - O elemento é não linear e requer uma solução iterativa. Substeps que não convergem não estão em equilíbrio;
 - A deformação inicial é utilizada no cálculo da matriz associada a stress stiffness, para a primeira iteração cumulativa. Stress stiffening deve sempre ser usado na solução de problemas envolvendo cabos em suspensão visando a estabilidade numérica.

RESOLUÇÃO

O procedimento de resolução pode ser demonstrado no seguinte fluxograma:



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: “**Exemplo – estrutura composta por cabo – LINK 10**”;
- ✓ 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: “**Cabo1**”;
- ✓ 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.

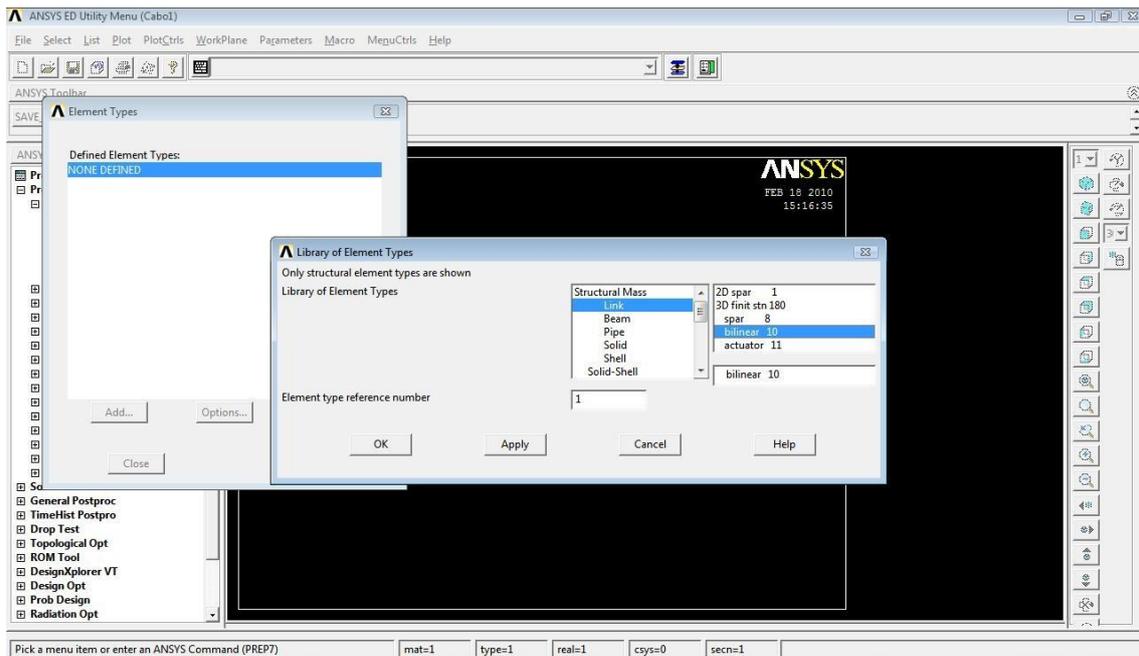
2. ENTRA NA FASE DE PRÉ-PROCESSAMENTO

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

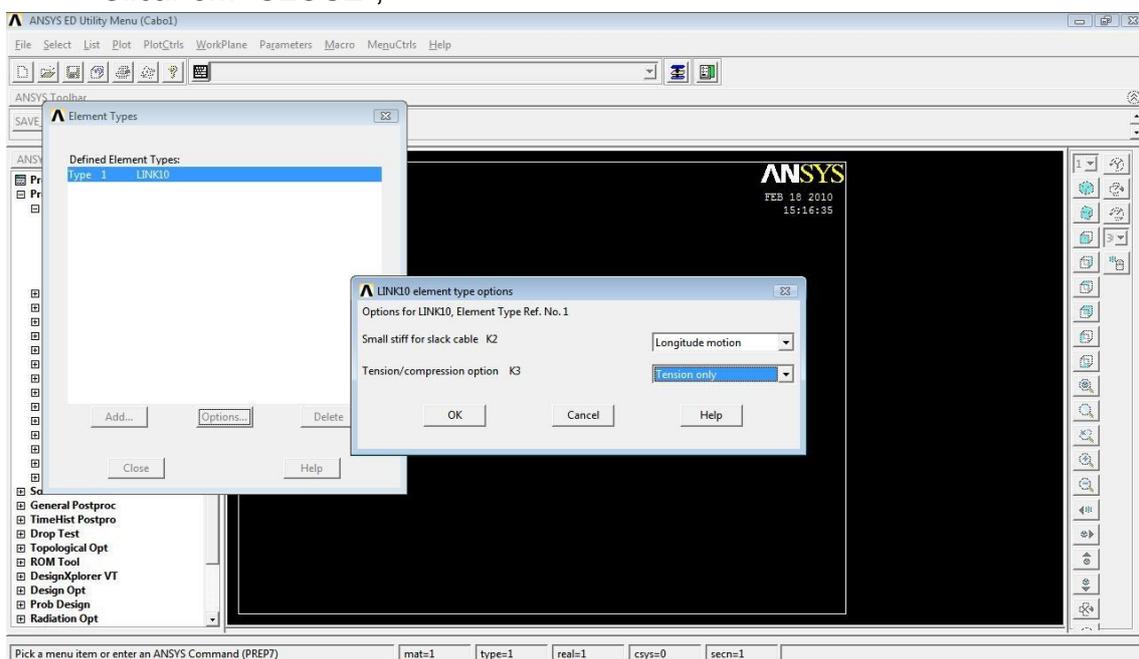
B

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 Link**”, “**3D bilinear 10**” e clicar em “OK”.



- ✓ Ainda na janela “Element Types”, clicar em “Options” (para o elemento LINK 10) e, na nova janela, seleccionar:
 - Options for LINK 10 K2 **Longitudinal Motion**
 - Small Stiff for slack cable K3 **Tension only**
- ✓ Clicar em “CLOSE”;

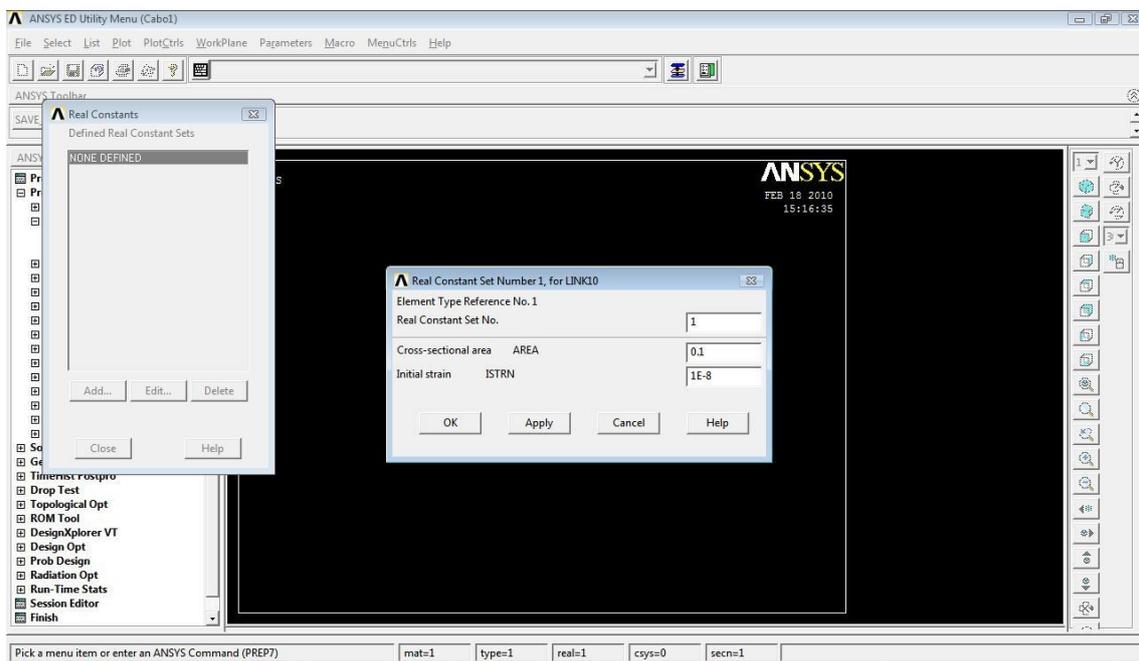


C

2.2. *Define as constantes geométricas da seção das barras que compõe o modelo:*

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

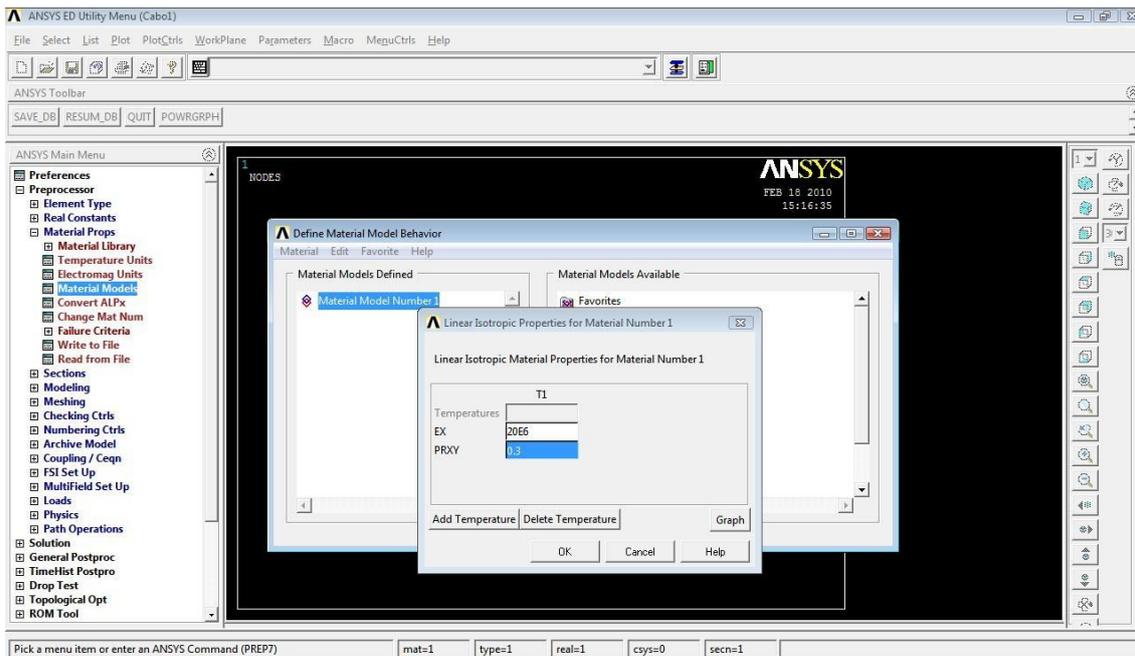
- ✓ Na nova janela que abrir, clicar em “Add...” para adicionar uma nova área de seção transversal;
- ✓ Uma nova janela se abrirá então selecionar o tipo de elemento em “Choose element type” e clicar em OK;
- ✓ A janela “Real Constants Set Number 1, for LINK 10” irá aparecer. Deve-se inserir:
 - Real Constant Set No. = 1
 - Cross-sectional Area AREA = 5.02654E-5
 - Initial Strain ISTRN = 1E-8
- ✓ Clicar em “OK”.
- ✓ Clicar em “CLOSE”.



D

2.3. *Define as propriedades do material que compõe as barras:*

- ✓ Dentro do “Preprocessor”, selecionar “Material Props”;
- ✓ Dentro do “Material Props”, selecionar “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 ira abrir. Inserir na lacuna “EX” o valor referente ao Módulo de Elasticidade do material e clicar em “OK”:
 - EX = 2.07E11;
 - PRXY = 0.3; (Coeficiente de Poisson)
- ✓ Fechar a janela “Define Material Model Behavior”.



E

2.4. Cria o modelo geométrico:

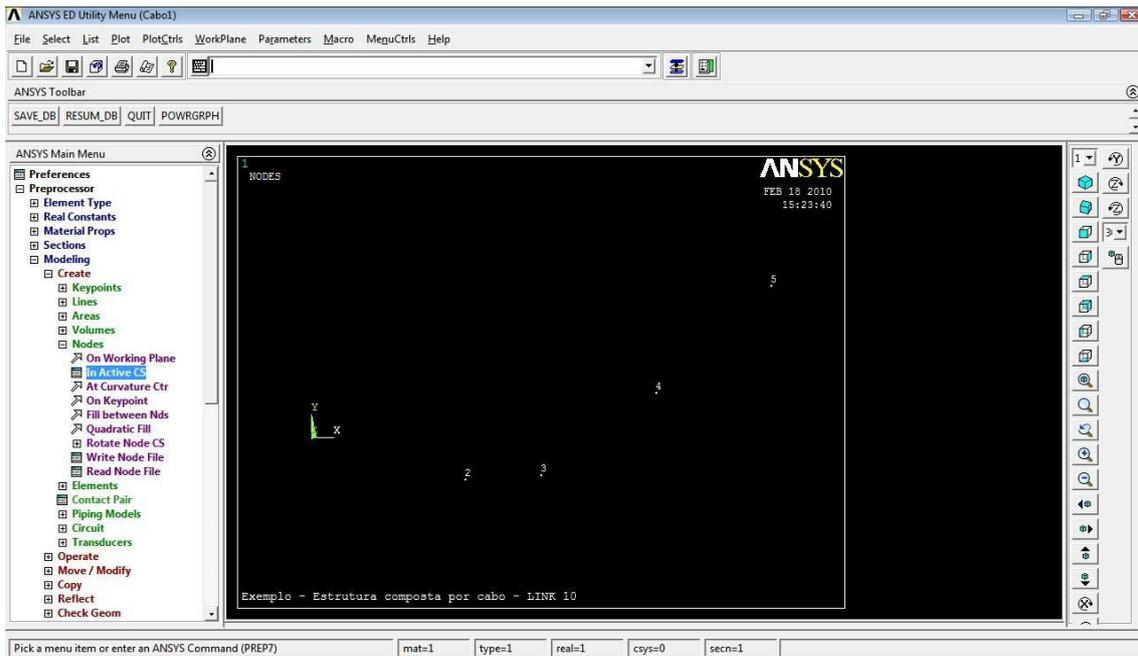
2.4.1. Numera nós e elementos:

- ✓ No ANSYS Utility Menu clicar em “PlotCtrls” e acessar a opção “Numbering”;
- ✓ Na nova janela que aparecer, seleccionar:
 - NODE Node Numbers ON
 - Elem-Attrib numbering Element Numbers
- ✓ Clicar em “OK”.

2.4.2. Cria os nós que compõe a malha de elementos finitos no sistema de coordenadas ativo:

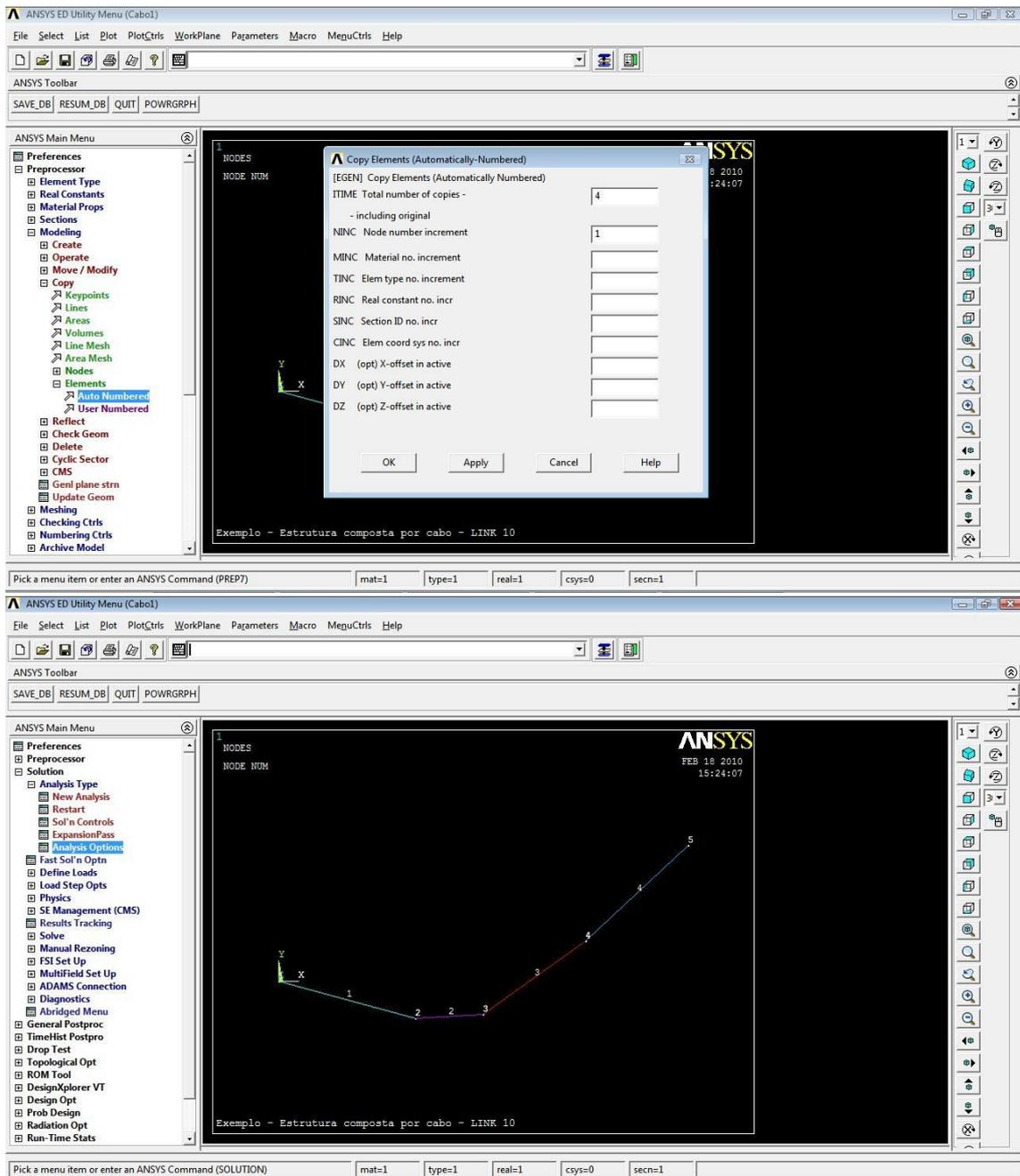
- ✓ Dentro do “Preprocessor” seleccionar “Modeling”, “Create”, “Nodes”, “In Active CS”;
- ✓ Na nova janela que abrir, inserir um número para o nó que será criado em “NODE Node Number” e as coordenadas X e Y;
- ✓ Para criar o primeiro nó:
 - NODE Node Number : **1;**
 - X,Y,Z Location in active CS : **X = 0 Y = 0;**
- ✓ Clicar em “APLY”;
- ✓ Para criar o próximo nó:
 - NODE Node Number : **2;**
 - X,Y,Z Location in active CS : **X = 20 Y = -5.56;**
- ✓ Clicar em “APPLY”;
- ✓ Para criar o próximo nó:
 - NODE Node Number : **3;**
 - X,Y,Z Location in active CS : **X = 30 Y = -5;**

- ✓ Clicar em “APPLY”;
- ✓ Para criar o próximo nó:
 - NODE Node Number : **4**;
 - X,Y,Z Location in active CS : **X = 45 Y = 5.83**;
- ✓ Clicar em “APPLY”
- ✓ Para criar o próximo nó:
 - NODE Node Number : **5**;
 - X,Y,Z Location in active CS : **X = 60 Y = 20**;
- ✓ Clicar em “APPLY”;



2.4.3. Cria os elementos:

- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Create”, “Elements”, “Auto Numbered”, “Thru Nodes”;
- ✓ Apontar os nós **1 e 2** e clicar em “OK”;
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Modeling”, “Copy”, “Elements”, “Auto Numbered”;
- ✓ Apontar o elemento 1 e completar a tabela:
 - ITIME (número total de cópias incluindo a original) = **4**;
 - NINC (incremento no número do nó) = **1**;
- ✓ Clicar em “OK”;

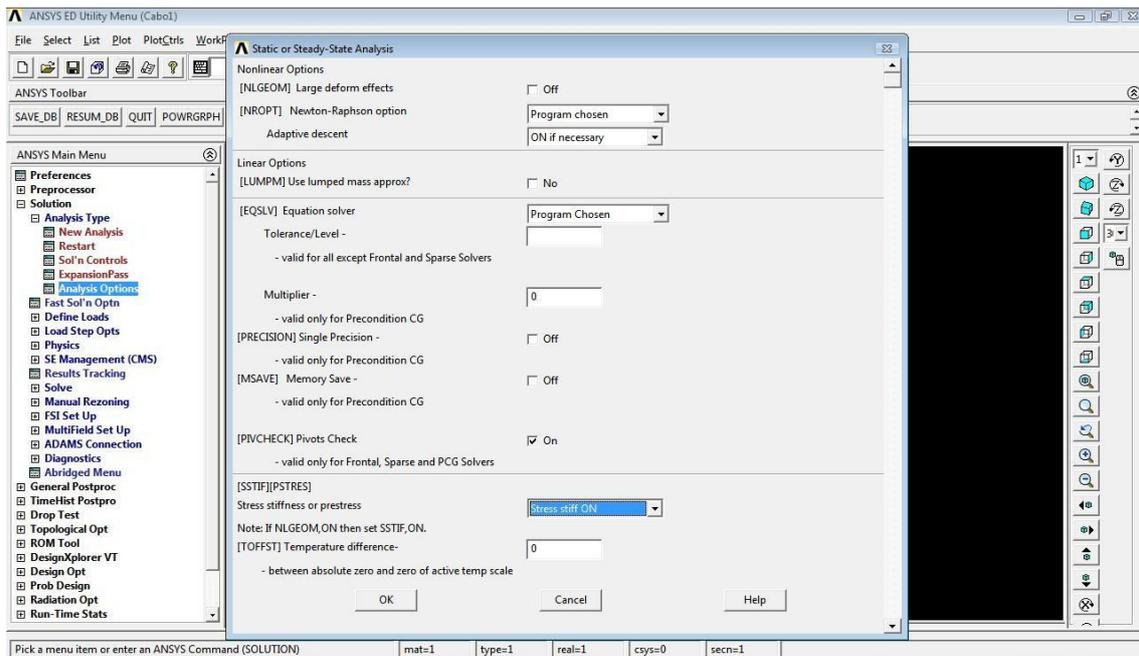


F

2.5. Aplicar as condições de contorno:

2.5.1. Fornece condição de contorno:

- ✓ Dentro do “Solution” clicar em “Unabridged Menu”;
- ✓ Ainda dentro do “Solution” clicar em “Analysis Type”, “Analysis Options”;
- ✓ Na janela “Static or Steady-State Analysis selecionar:
 - [SSTIF][PSTRES]
 - Stress stiffness or prestress **Stress Stiff ON;**
- ✓ Clicar em “OK”;

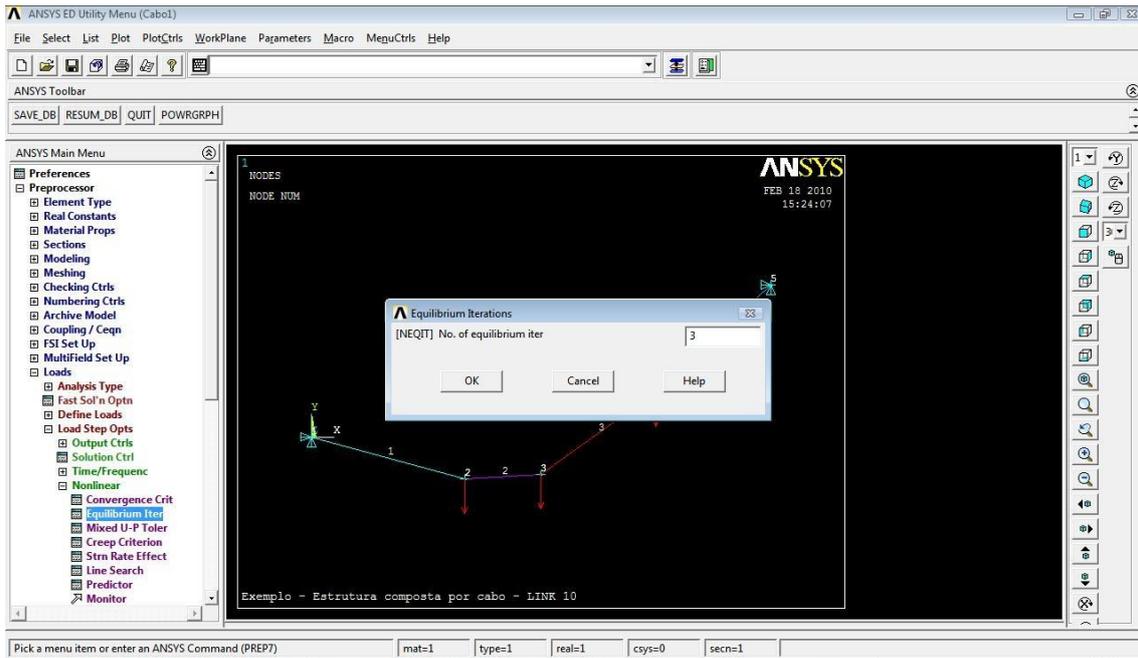


- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Loads”, “Define Loads”, “Apply”, “Structural”, “Displacement”, “On Nodes”;
- ✓ Na nova janela que abrir apontar os nós **1 e 5** e clicar em “APPLY”;
- ✓ Outra janela irá aparecer então selecionar no campo “DOFs to be constrained” a opção **ALLDOF** (irá restringir o movimento dos nós 1 e 5 em todas as direções) e clicar em “APPLY”;
- ✓ Na nova janela que abrir apontar os nós **2, 3 e 4** e clicar em “OK”;
- ✓ Outra janela irá aparecer então selecionar no campo “DOFs to be constrained” a opção **UZ** (irá restringir o movimento dos nós 2, 3 e 4 em todas as direções) e clicar em “OK”;

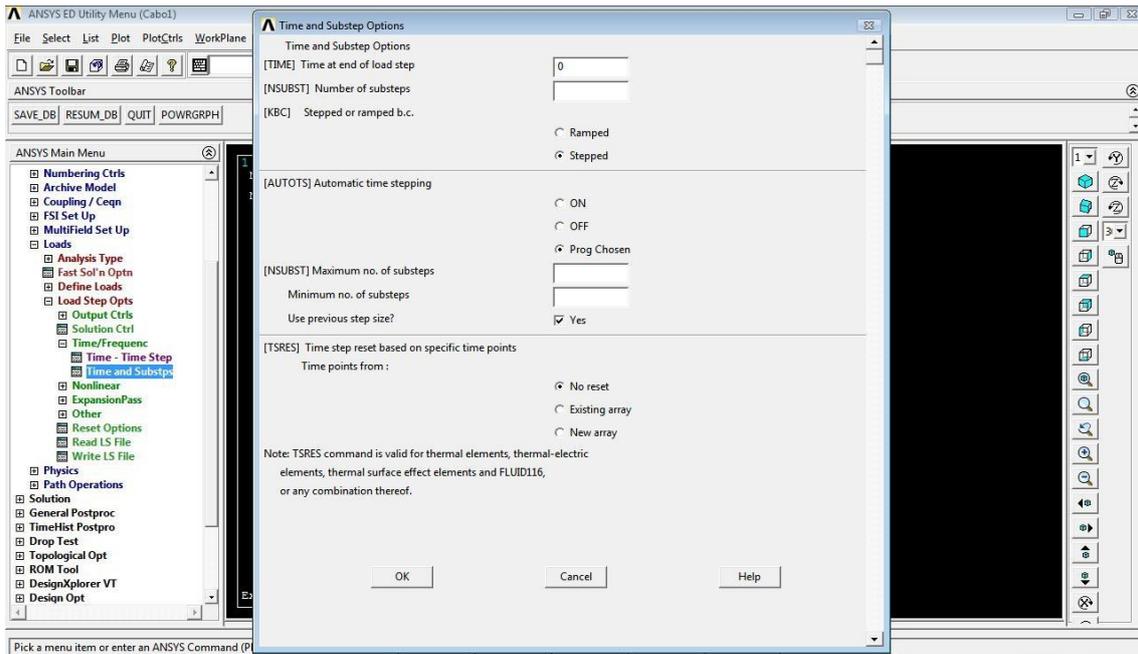
2.5.2. Aplicar as cargas:

- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Loads”, “Define Loads”, “Apply”, “Structural”, “Force/Moment”, “On Nodes”;
- ✓ Apontar o nó **2** e clicar em “APPLY”;
- ✓ Na nova janela inserir:
 - Direction of força/mom **FY**
 - VALUE Force/moment value **-6**
- ✓ Clicar em “APPLY”.
- ✓ Apontar o nó **3** e clicar em “APPLY”;
- ✓ Na nova janela inserir:
 - Direction of força/mom **FY**
 - VALUE Force/moment value **-12**
- ✓ Clicar em “APPLY”.
- ✓ Apontar o nó **4** e clicar em “OK”;
- ✓ Na nova janela inserir:

- Direction of força/mom **FY**
- VALUE Force/moment value **-4**
- ✓ Clicar em “OK”.
- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Loads”, “Load Step Opts”, “Nonlinear”, “Equilibrium Iter”;
- ✓ Na nova janela, inserir:
 - [NEQIT] Número de iterações de equilíbrio **3**
- ✓ Clicar em “OK”;



- ✓ Dentro do “Preprocessor” selecionar “Loads”, “Load Step Opts”, “Time Frequenc”, “Time & Substep Options”;
- ✓ Na nova janela selecionar:
 - [KBC] Stepped or ramped b.c. **Stepped**
- ✓ Clicar em “OK”;



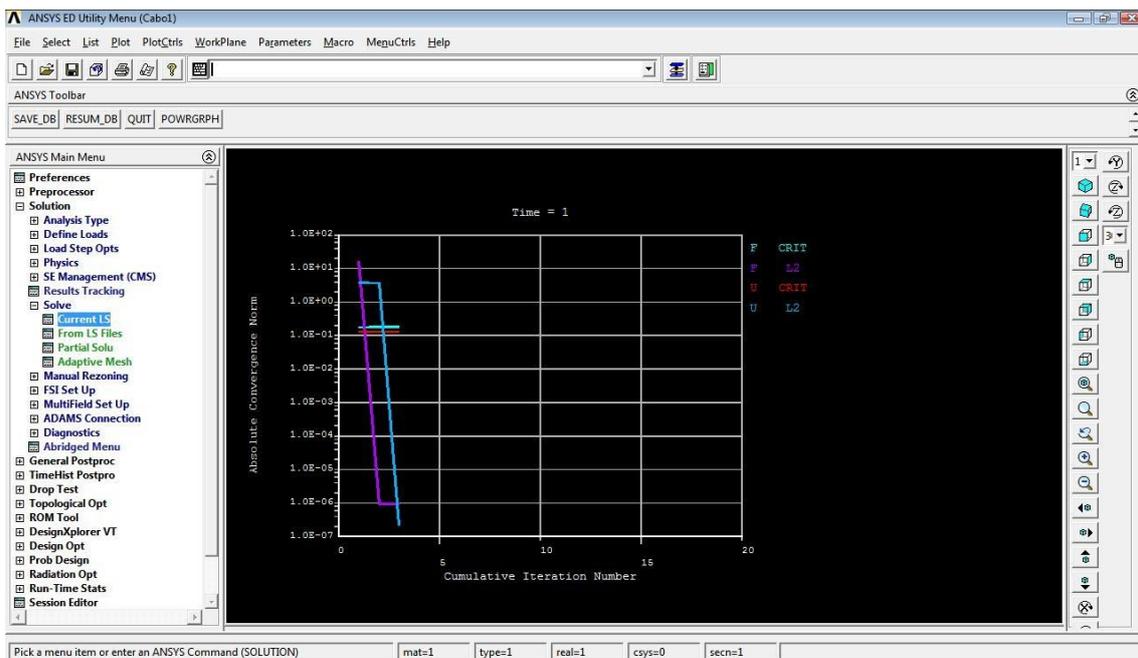
2.5.3. Salvando dados no arquivo Cabo1.db

- ✓ No ANSYS Toolbar clicar em “SAVE_DB”.

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”.



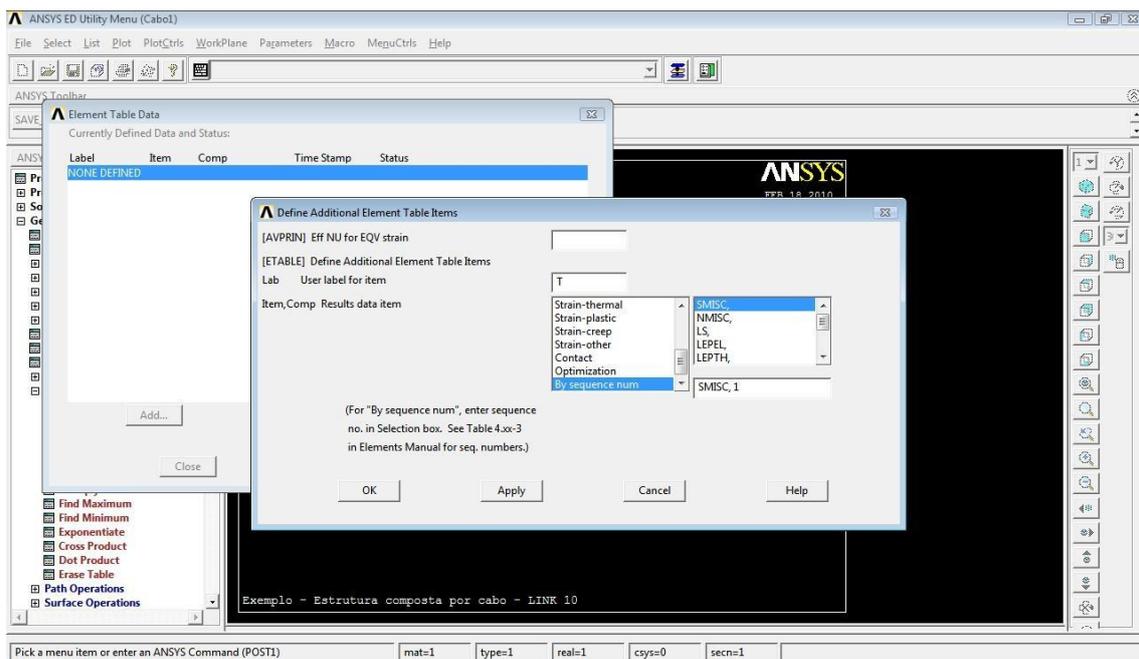
- ✓ No ANSYS Toolbar clicar em “SAVE_DB” para salvar os dados mais a solução no arquivo.

H

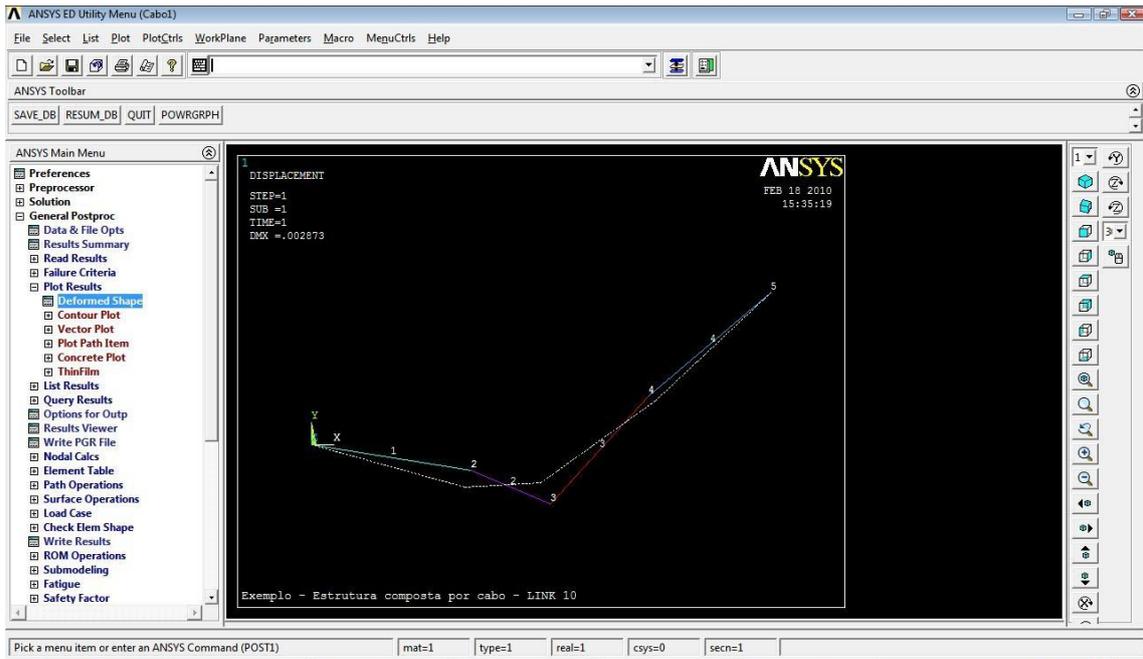
4. PÓS PROCESSAMENTO

4.1. Gera, lista e plota os resultados:

- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do “General Postproc” clicar em “Read Results”, “First Set” para recuperar, plotar e listar os resultados para o primeiro STEP de carga;
- ✓ Então, ainda dentro do “General Postproc” clicar em “Element Table”, “Define Table”, “Add”;
- ✓ Na nova janela, definir:
 - LAB **T**
 - Item, comp **By sequence number** **SMISC**
SMISC,1
- ✓ Clicar em “OK” (Define itens adicionais para a tabela de resultados).
- ✓ Após, verificar a listagem da tabela e clicar em “CLOSE”.



- ✓ 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”, selecionar a opção “Def+undeformed” e clicar em “OK”;

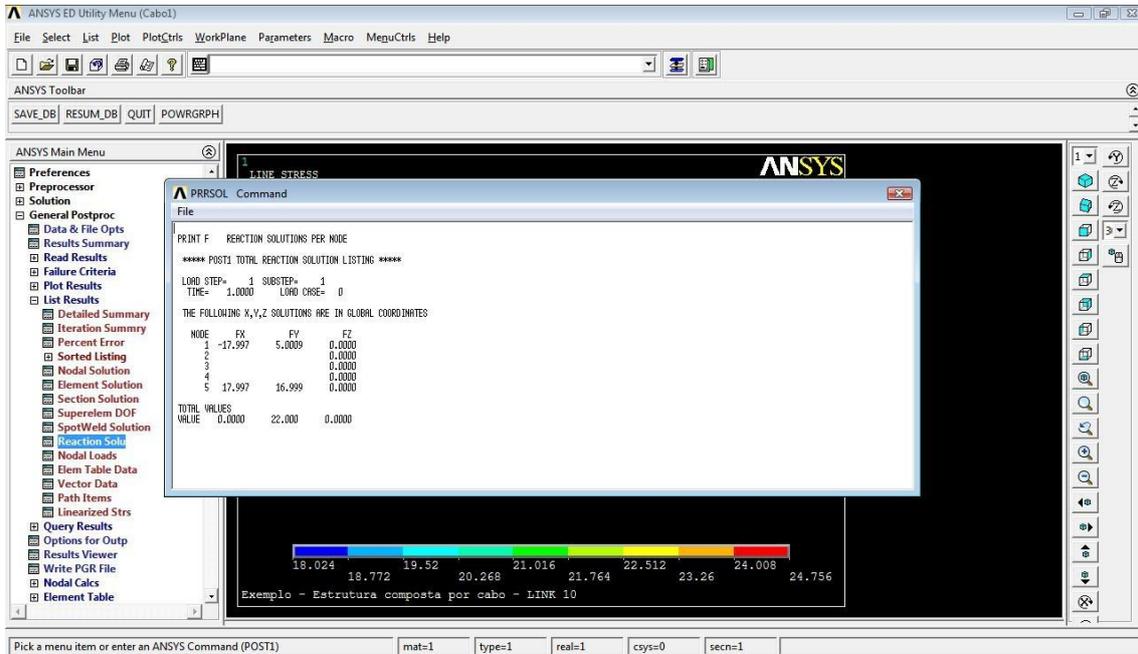


- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do “General Postproc” clicar em “Plot Results”, “Contour Plot”, “Line Elem Res” para plotar os resultados do elemento;
- ✓ Na janela “Plot Line-Element Results, selecionar:
 - LABI T
 - LABJ T
- ✓ Clicar em “OK”;

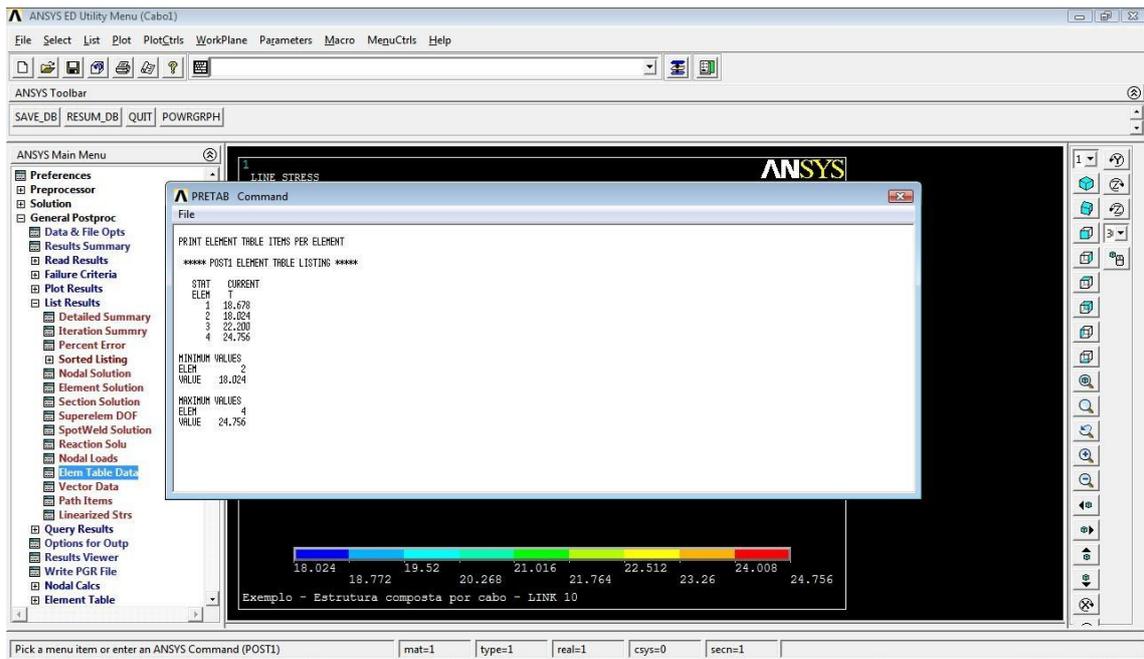


- ✓ Os resultados aparecerão em uma escala de cores;
- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do “General Postproc” clicar em “List Results”, “Nodal Solution” para listar os deslocamentos dos nós;
- ✓ Inserir na janela que abrir:

- Item, comp DOF solution All U's UCOMP
- ✓ 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 Forc F
- ✓ Clicar em “OK”;



- ✓ No ANSYS Main Menu dentro do “General Postproc” clicar em “List Results”, “Element Table Data” para listar o conteúdo da tabela obtida como comando “ETABLE” (“Element Table”, definido no início do pós processamento);
- ✓ Na janela “List Element Table Data”, seleccionar:
 - Lab 1-9 T
- ✓ Clicar em “OK”.



5.0 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”.

RESULTADOS

| REAÇÕES E FORÇAS APLICADAS | | |
|----------------------------|---------|--------|
| NÓ | F(X) | F(Y) |
| 1 | -17.997 | 5.009 |
| 2 | 0.0 | -6 |
| 3 | 0.0 | -12 |
| 4 | 0.0 | -4 |
| 5 | 17.997 | 16.991 |

| FORÇA DE TRAÇÃO NO CABO | |
|-------------------------|--------|
| ELEM. | T |
| 1 | 18.678 |
| 2 | 18.024 |
| 3 | 22.200 |
| 4 | 24.756 |