



Universidade de Brasília

Faculdade do Gama

PROJETO FINAL

Disciplina: ANÁLISE ESTRUTURAL MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Discente:

ARTHUR NOGUEIRA DE MENEZES – 19/0044837

RENATO SANTOS FERNANDES DE MEDEIROS – 19/0116293

Relatório de Análise de Convergência Utilizando o Método dos Elementos Finitos no Ansys Mechanical APDL

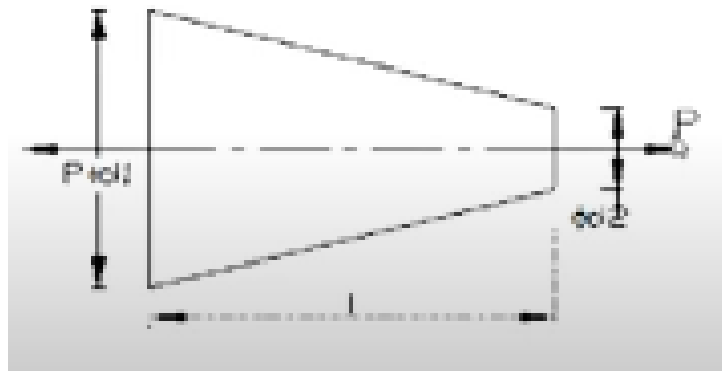
1. Introdução

Este relatório apresenta uma análise de convergência utilizando o método dos elementos finitos para avaliar o deslocamento de uma peça cônica submetida a uma carga axial. O estudo compara a solução analítica, obtida pelo teorema da deflexão, com soluções numéricas geradas pelo software Ansys Mechanical APDL. O objetivo é verificar a precisão dos resultados computacionais e sua convergência conforme o refinamento da malha.

A análise de convergência é essencial em problemas de elementos finitos, pois garante que os resultados obtidos sejam independentes da discretização do modelo. À medida que a malha é refinada, espera-se que os valores calculados se aproximem da solução analítica ou exata, proporcionando maior confiabilidade ao estudo.

2. Metodologia

A peça analisada é um modelo cônico com diâmetro de 40 mm na extremidade esquerda e 20 mm na extremidade direita, com um comprimento total de 300 mm. Uma carga de 10 kN é aplicada na extremidade direita. O material utilizado possui um módulo de elasticidade de 20 GPa e coeficiente de Poisson de 0.3, assim como mostrado na figura a seguir:



Nota: Para uma haste cônica sob carregamento axial, a **deflexão teórica** é:

$$\delta = \frac{4PL}{(\pi E d_1 d_2)}$$

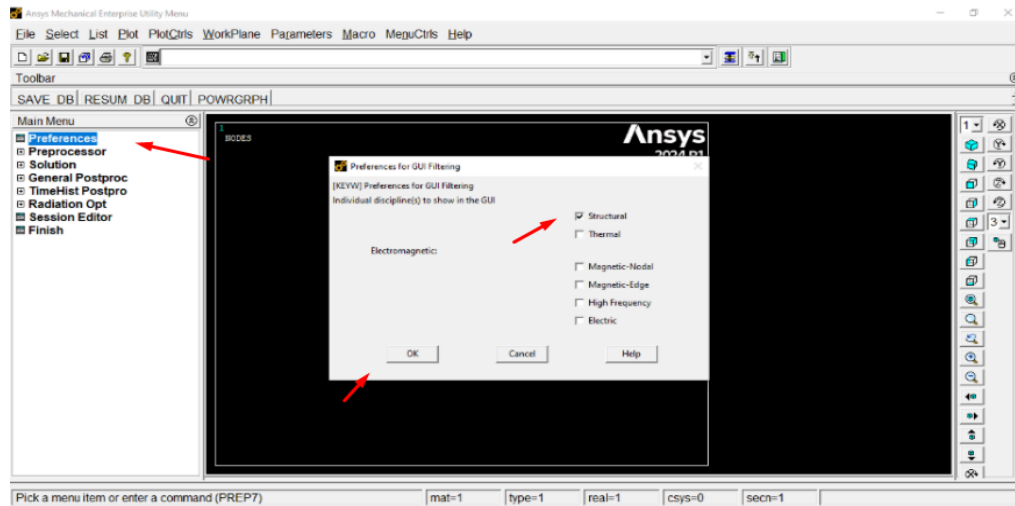
A solução analítica para o deslocamento foi determinada como sendo **0,2387 mm**. Para efeito de comparação, foram realizadas simulações no Ansys utilizando diferentes números de elementos na malha: **1, 2, 4 e 8 elementos**.

A modelagem seguiu os seguintes passos no Ansys Mechanical APDL:

1. Configuração Inicial

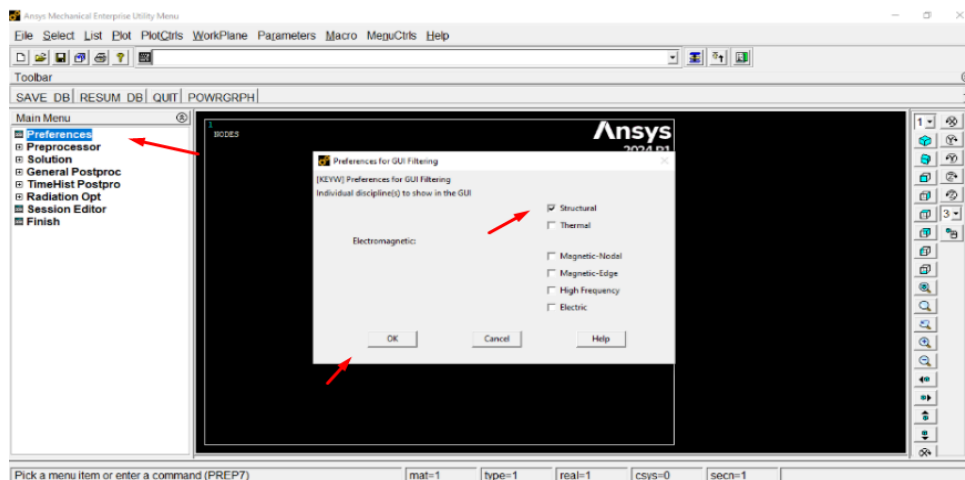
1. Abra o Ansys e siga os comandos a seguir:

- **Preferences -> Structural -> OK**



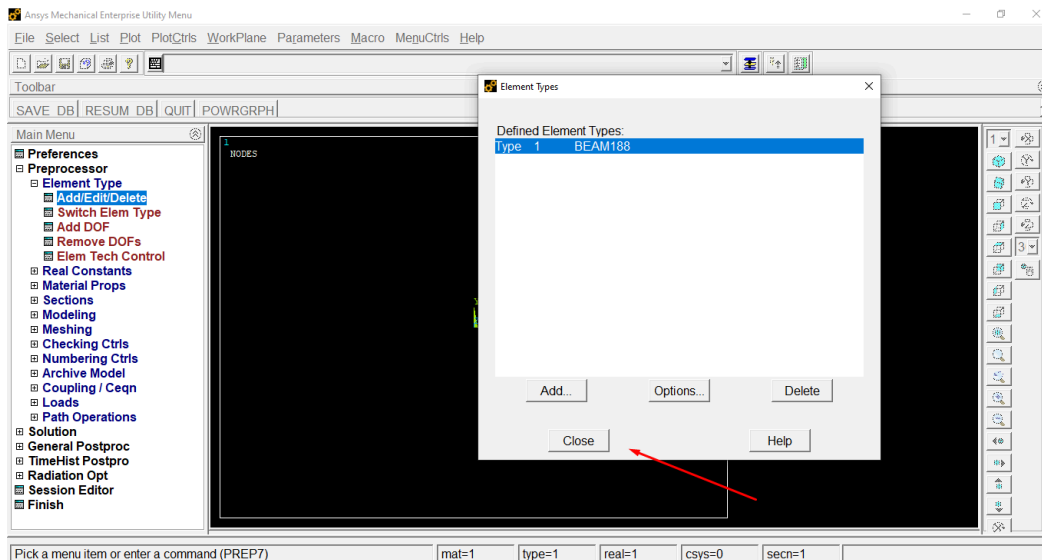
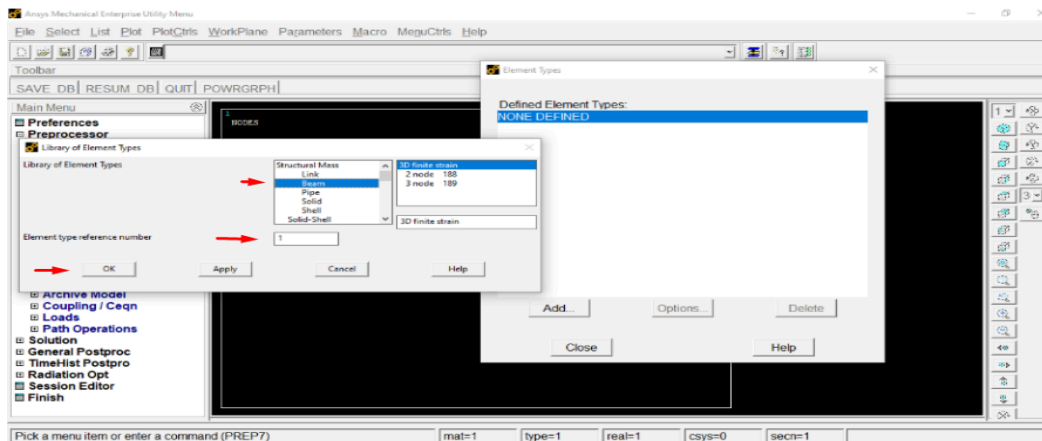
- Define-se o tipo de elemento:

■ **Preprocessor -> Element Type -> Add/Edit/Delete -> Add**



- Em "Library of Element Types", selecione "Beam".

- Em "Element type reference number", digite 1.
- Após, Clique em **OK** e depois **Close**.



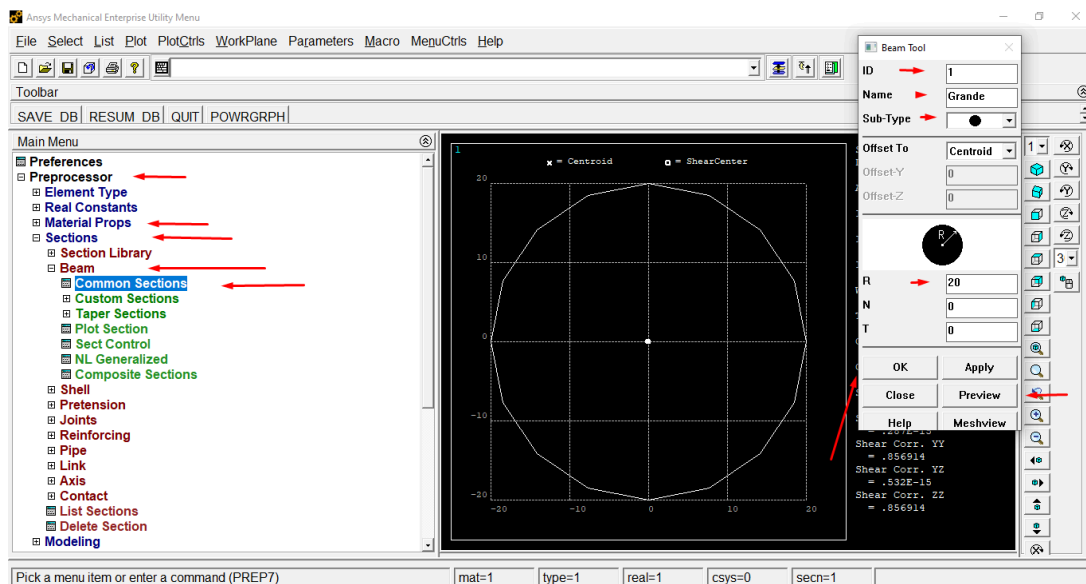
2. Definição das Propriedades do Material

1. Defina um modelo elástico, linear e isotrópico:
 - **Preprocessor -> Material Props -> Material Models -> Structural -> Linear -> Elastic -> Isotropic**

3. Definição da Geometria do Modelo Cônico

1. Definir o raio da extremidade esquerda (20 mm):

- **Preprocessor -> Material Props -> Sections -> Beam -> Common Sections**
- Insira os valores conforme a imagem de referência.
- Clique em **Preview** e depois **Apply**.
- Este é o raio esquerdo do modelo cônico

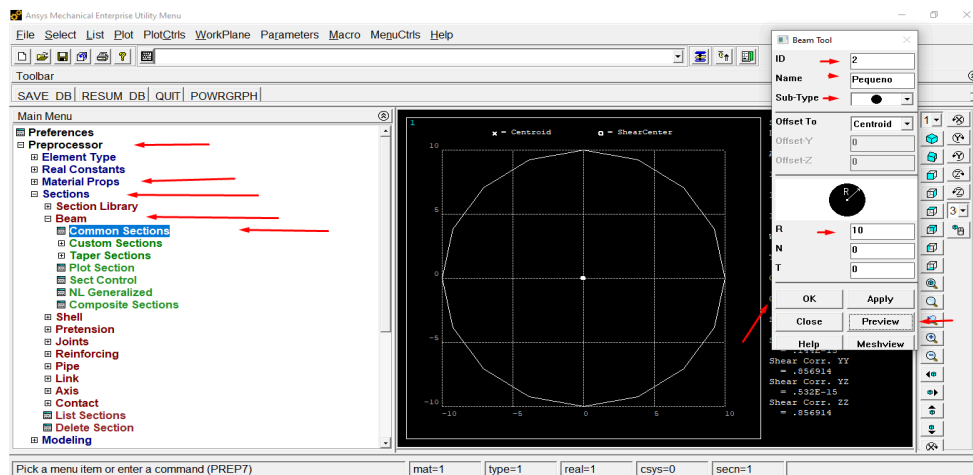


2. Definir o raio da extremidade direita (10 mm):

- **Preprocessor -> Material Props -> Sections -> Beam -> Common Sections**
- Insira os valores conforme a imagem de referência.
- Clique em **Preview** e depois **Apply**.

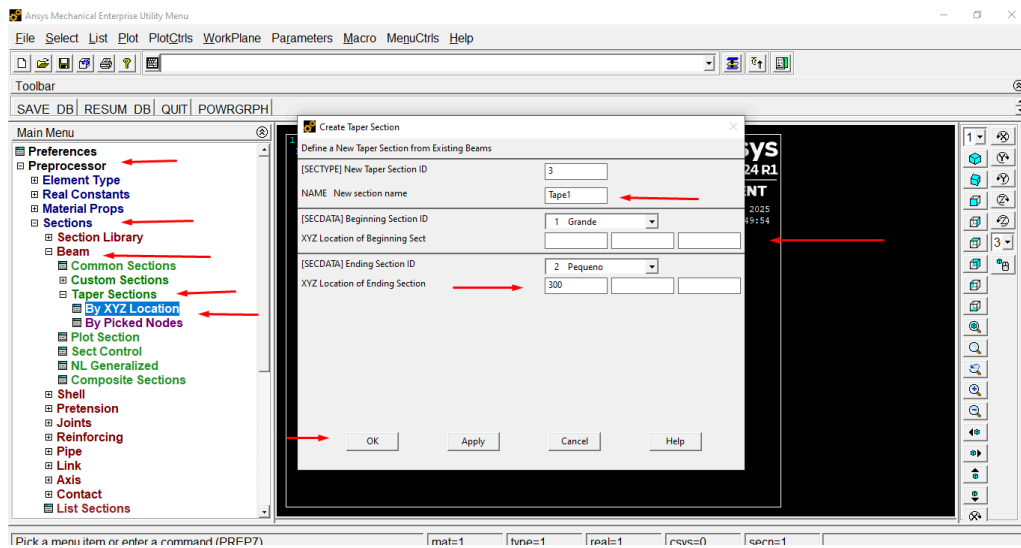
3. Agora cria-se o raio do modelo cônico localizado na extrema direita, com raio 10 mm

- Preprocessor -> Material Props -> Sections -> Beam -> Common Sections
- Na caixa de diálogo:
- Escreve-se os valores e opções dado na imagem abaixo para “ID”, “Name”, “R”
- Após isso:
- Preview -> Apply



4. Selecionar as seções cônicas extremas:

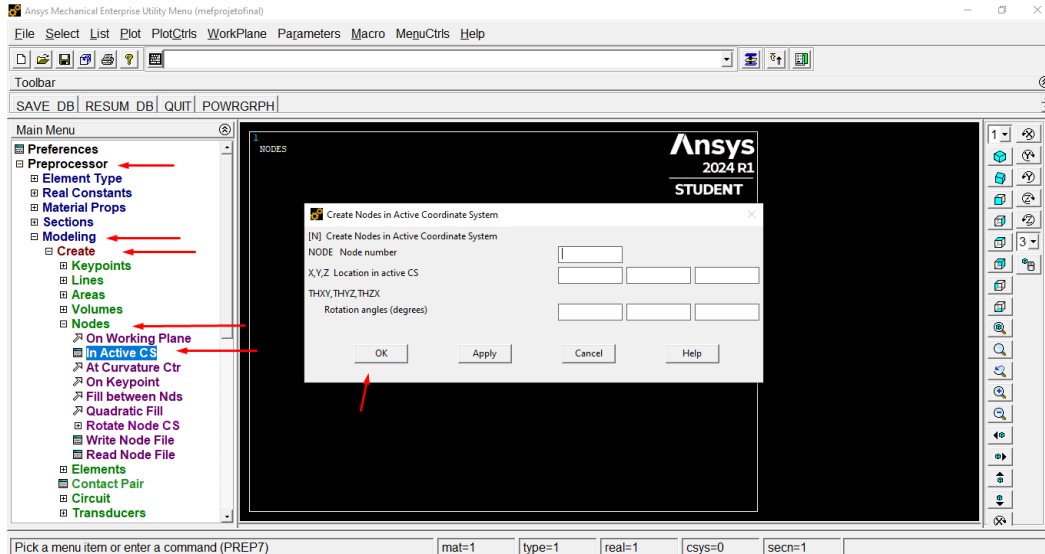
- **Preprocessor -> Sections -> Beam -> Taper Sections -> By XYZ Location**
- Definir a origem (0,0,0) para a seção esquerda.
- Definir a posição da seção direita a **300 mm** de distância.
- Na imagem abaixo, preenche-se os valores conforme especificado.



4. Criação dos Nós e Elementos

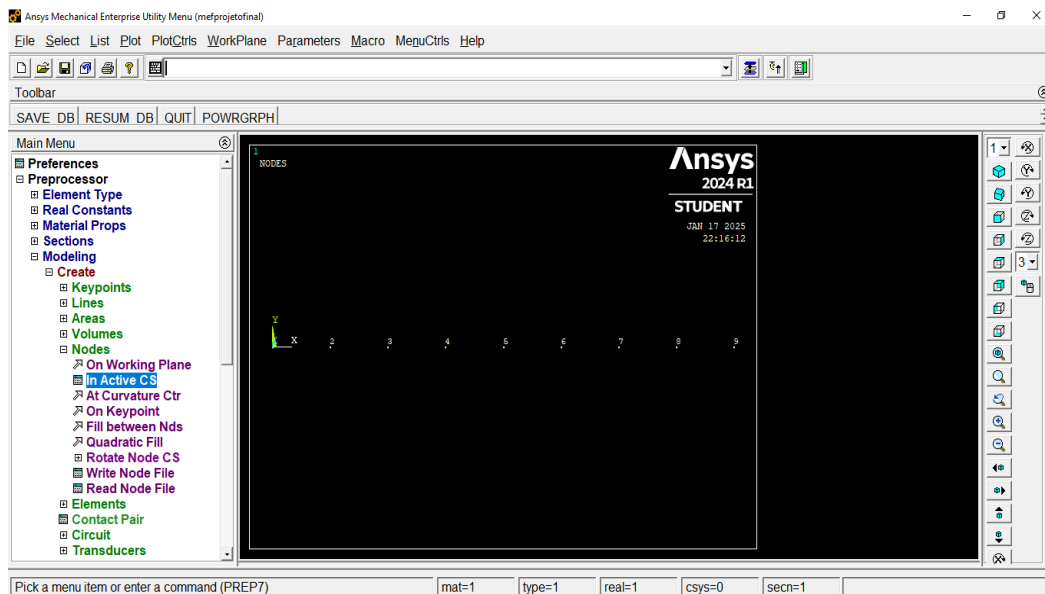
1. Criar os 8 elementos distribuídos ao longo dos **300 mm**:

- **Preprocessor -> Modeling -> Create -> Nodes -> In Active CS**
- Criar **9 nós** espaçados em **37,5 mm** cada.
- O primeiro nó será dado na origem, que por padrão não é necessário escrever valor nenhum



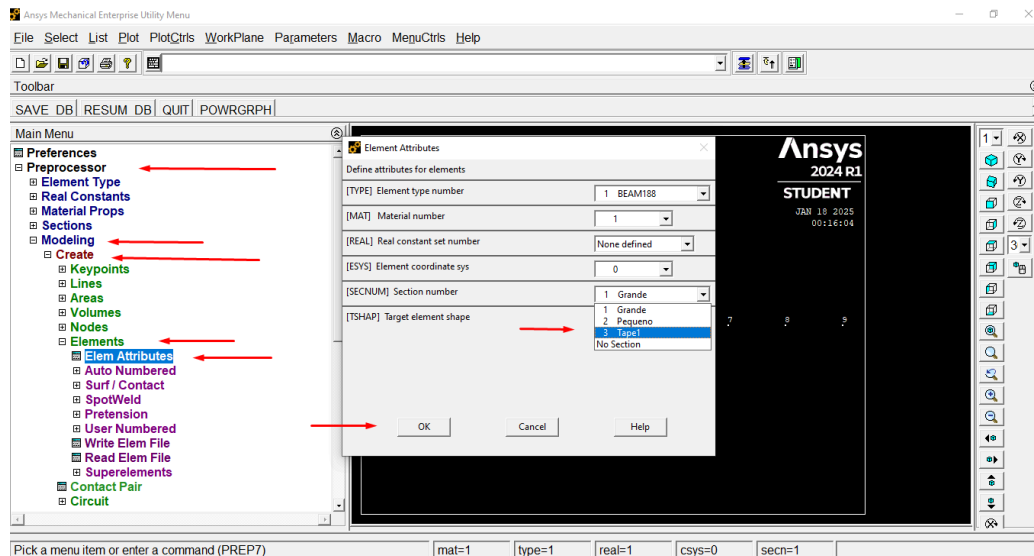
2. Para os nós seguintes, soma-se 37,5 na primeira caixa da opção “X,Y,Z Location in active CS”

- Obtém-se assim 9 nós com espaçamento de 37,5 mm entre eles

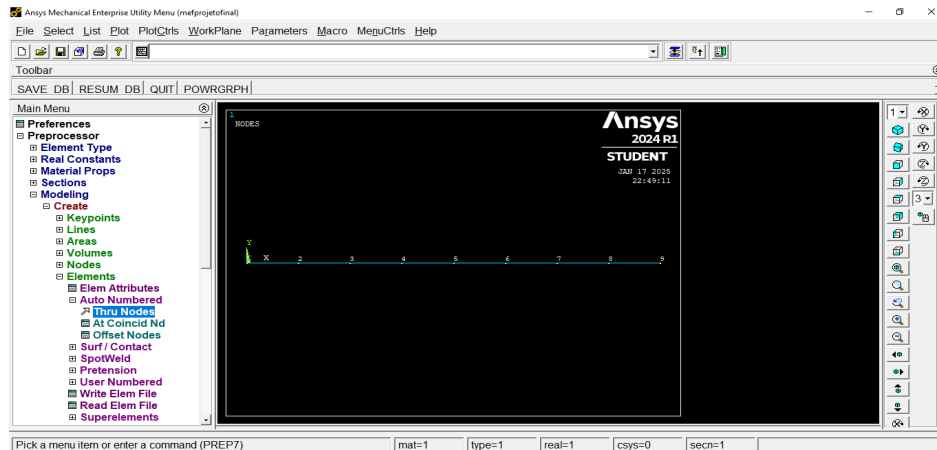


3. Criar elementos conectando os nós:

- **Preprocessor -> Modeling -> Create -> Elements -> Elem Attributes**
- Selecionar a seção "Tape1" criada anteriormente e clicar em **OK**.



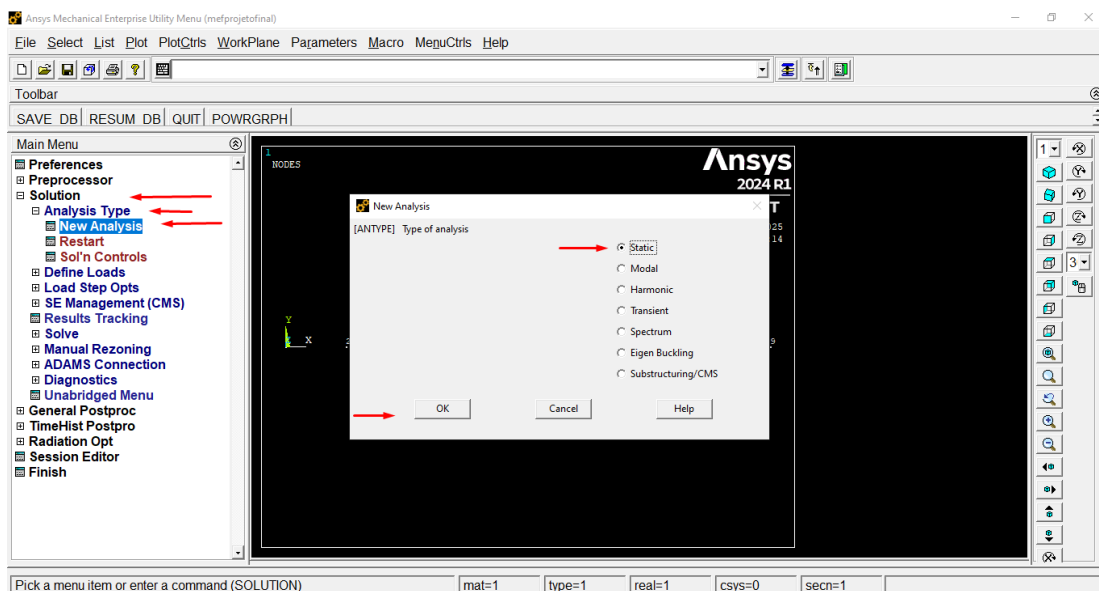
- **Preprocessor -> Modelling -> Create -> Elements -> Auto Numbered -> Thru Nodes**
- Assim, seleciona-se o par de elementos “1” e “2” e digita-se “Apply”
- Repete-se este procedimento até os elementos estarem criados, conforme na imagem a seguir.
- O resultado são 8 elementos e 9 nós, espaçados com uma distância de 37,5 mm.



5. Definição da Análise e Aplicação de Condições de Contorno

1. Definir a análise como estática:

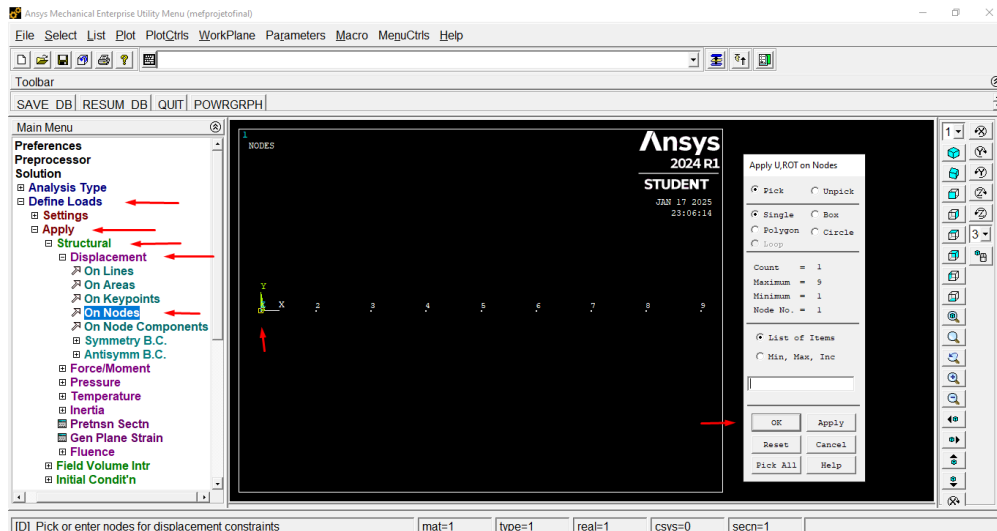
- **Solution -> Analysis Type -> New Analysis -> Static -> OK**



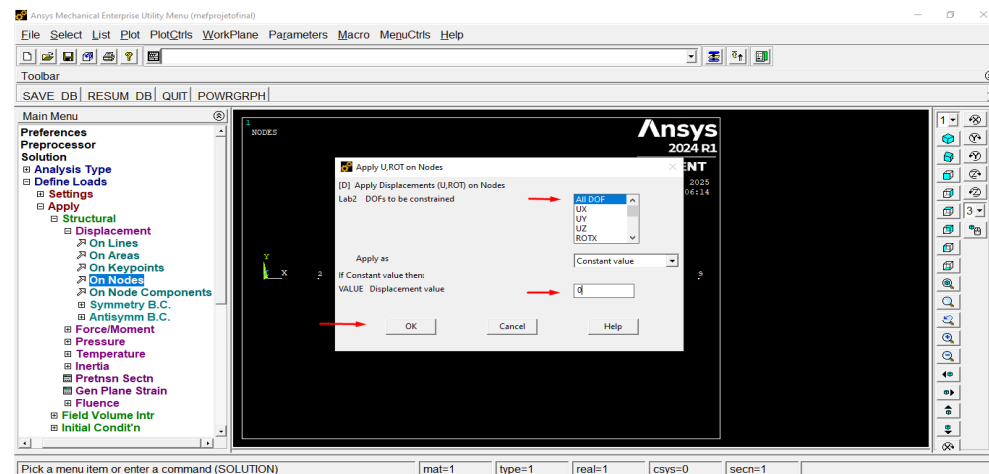
2. Aplicar as condições de contorno:

- **Fixar o nó esquerdo:**

- **Solution -> Define Loads -> Apply -> Structural -> Displacement -> On Nodes**
- **Selecionar o nó 1 e clicar em OK**

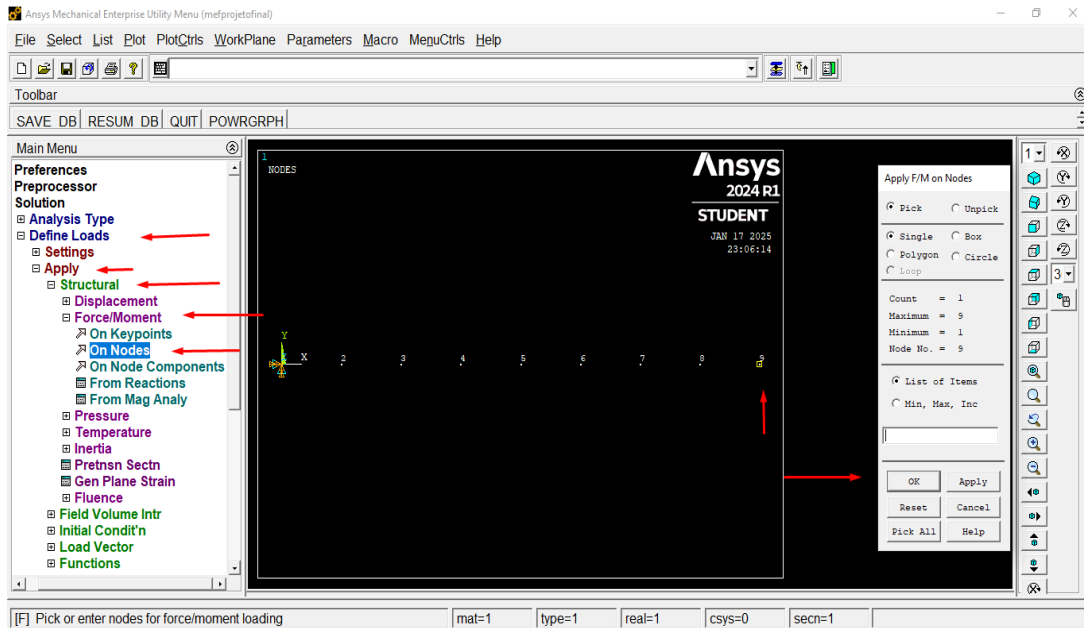


- **Escolher ALL DOF e definir valor 0.**

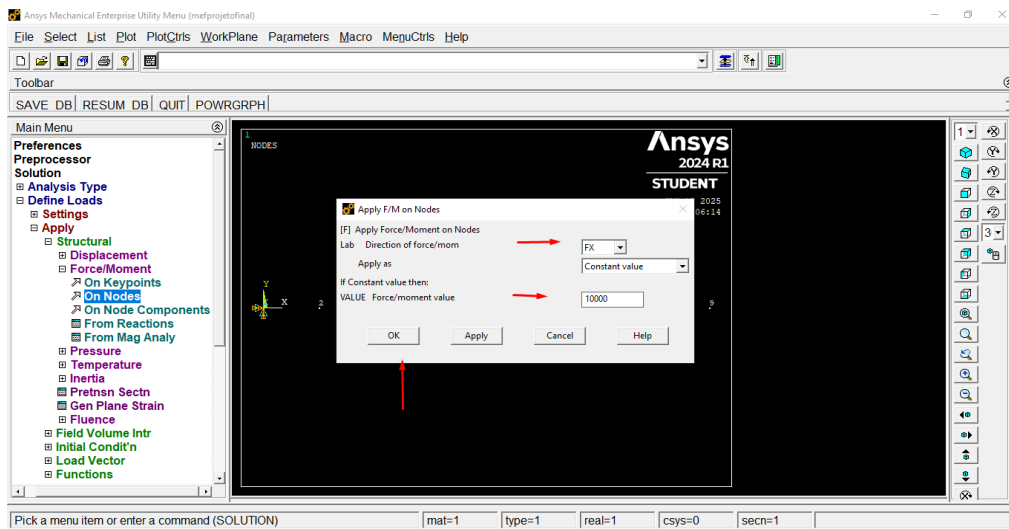


- **Aplicar a força axial de 10 kN no nó direito:**
 - **Solution -> Define Loads -> Apply -> Structural -> Force/Moment -> On Nodes**

- Seleccionar o nó 9 e clicar em **OK**.



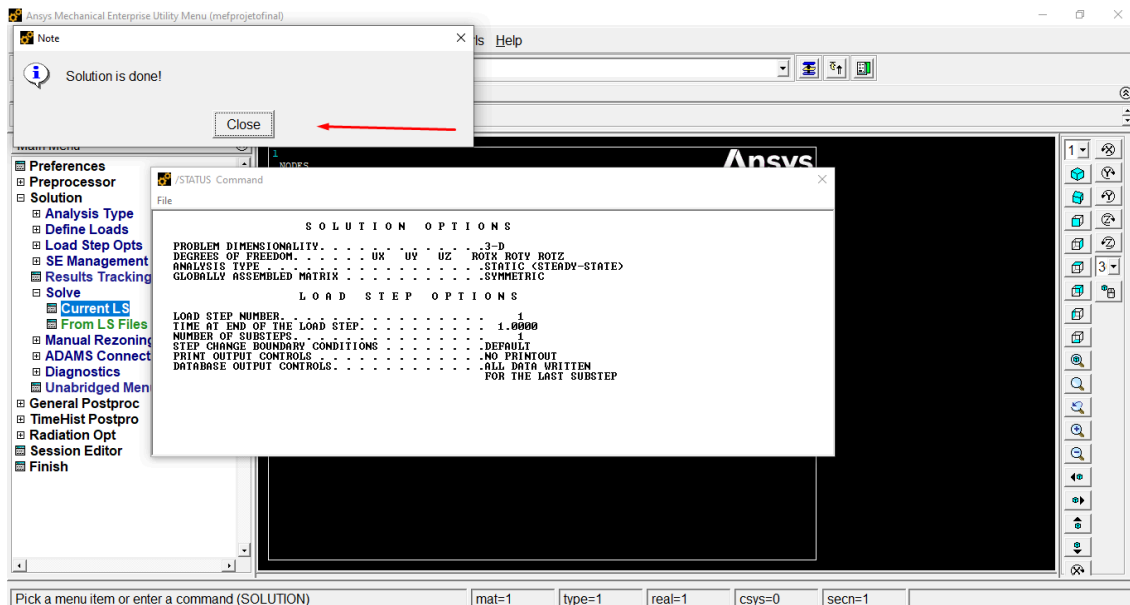
- Definir **FX** como direção da força e inserir **10000**.
- Clicar em **OK**.



3. Resolver o problema:

- **Preprocessor -> Solution -> Solve -> Current LS -> OK**

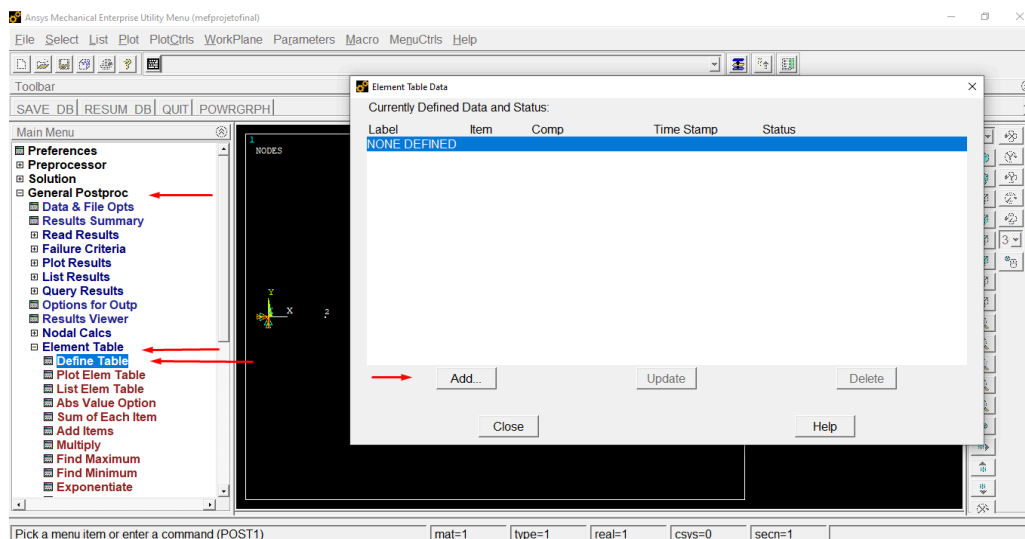
- Deve aparecer a mensagem: **"Solution is done!"**



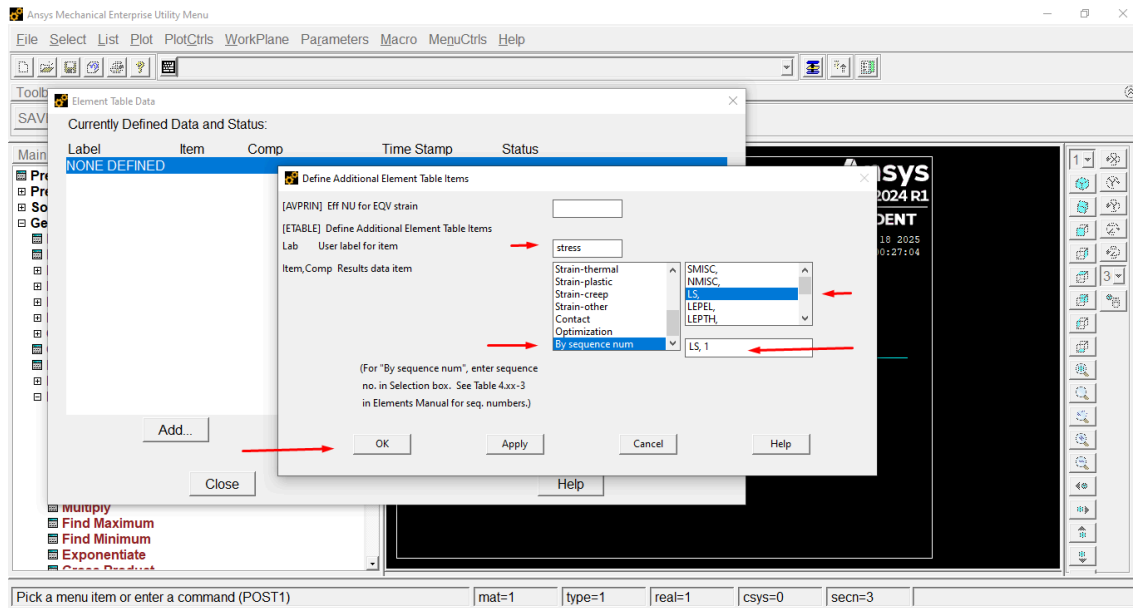
6. Visualização dos Resultados

1. Criar a tabela de tensão:

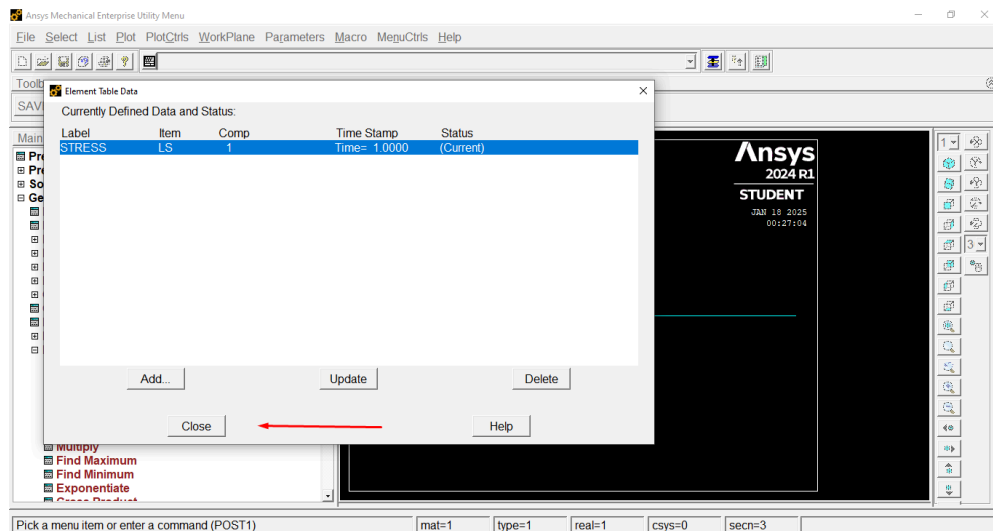
- **General Postproc -> Element Table -> Define Table -> ADD**



- No campo **User label for item**, digitar "**stress**".
- Em **Item, Comp Results data item**, selecionar "**By sequence num**".
- Selecionar **LS** e adicionar **1**.
- Clicar em **OK**.

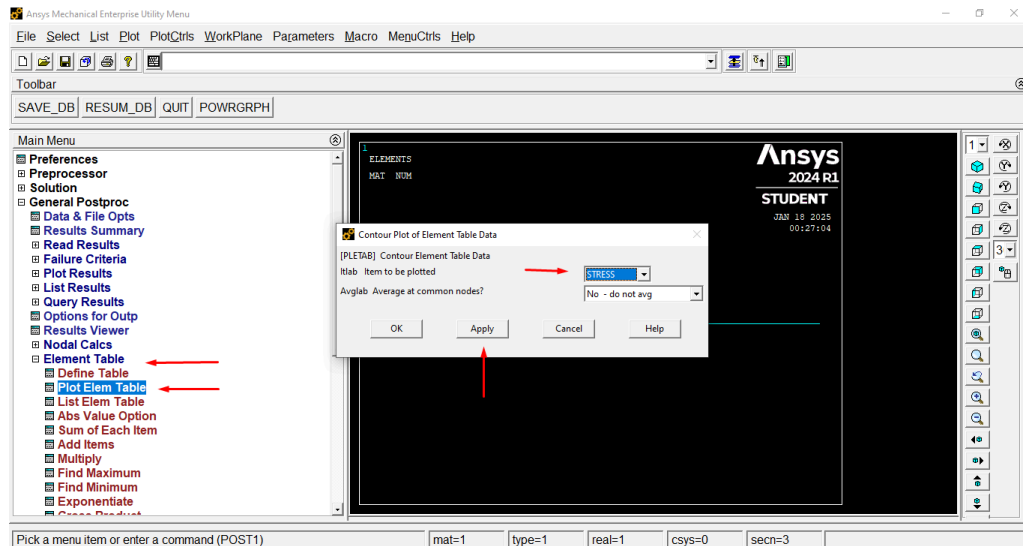


- A tabela foi criada, pode-se sair desta caixa de diálogo

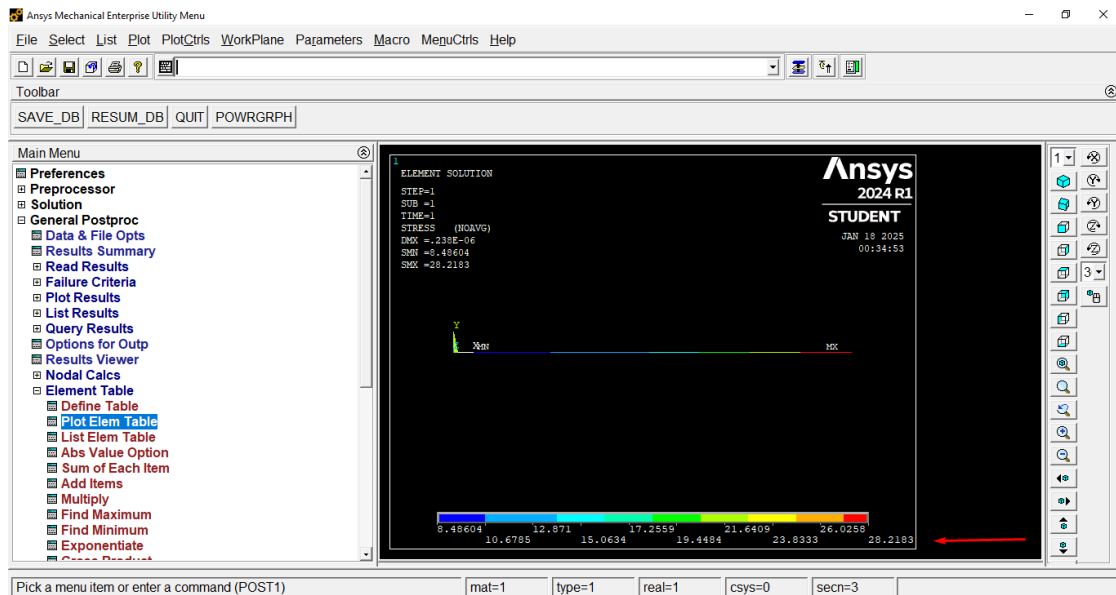


2. Visualizar os resultados:

- **General Postproc -> Element Table -> Plot Elem Table**
- **Selecionar STRESS -> Apply.**

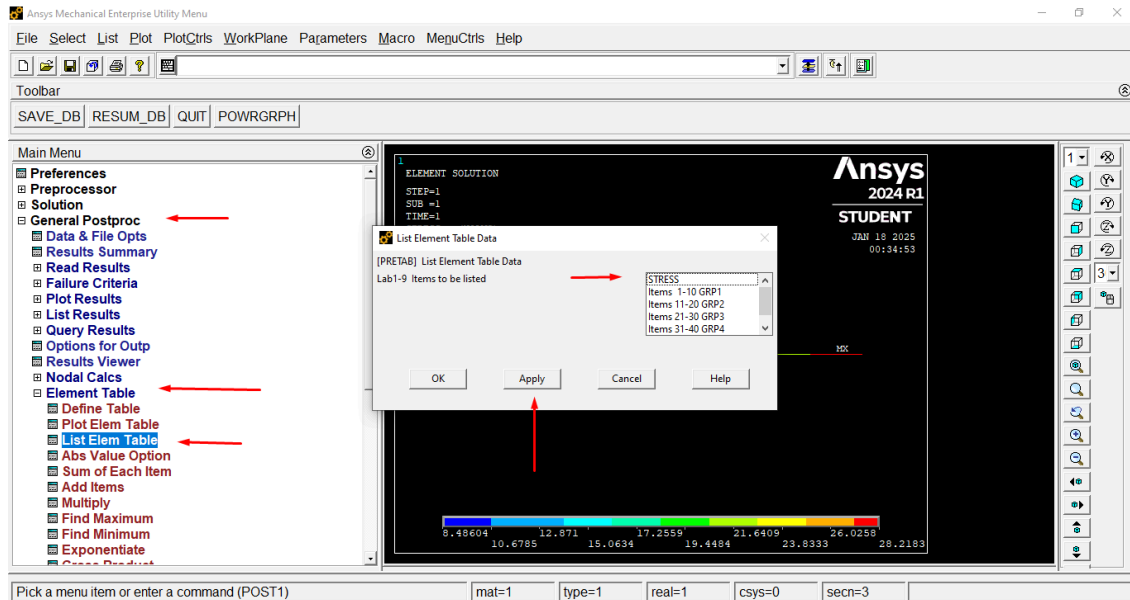


- **Observa-se a tensão máxima de 28,2183 MPa.**

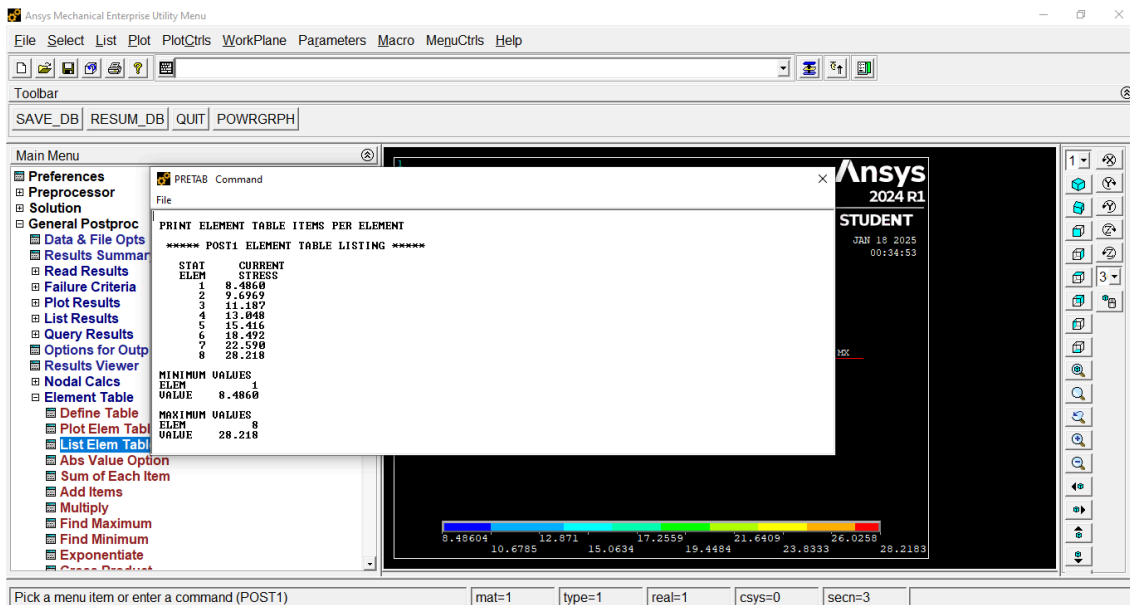


- Para visualizar os valores em tabela:
 - **General Postproc -> Element Table -> List Elem Table**

■ Seleccionar **STRESS** -> Apply.

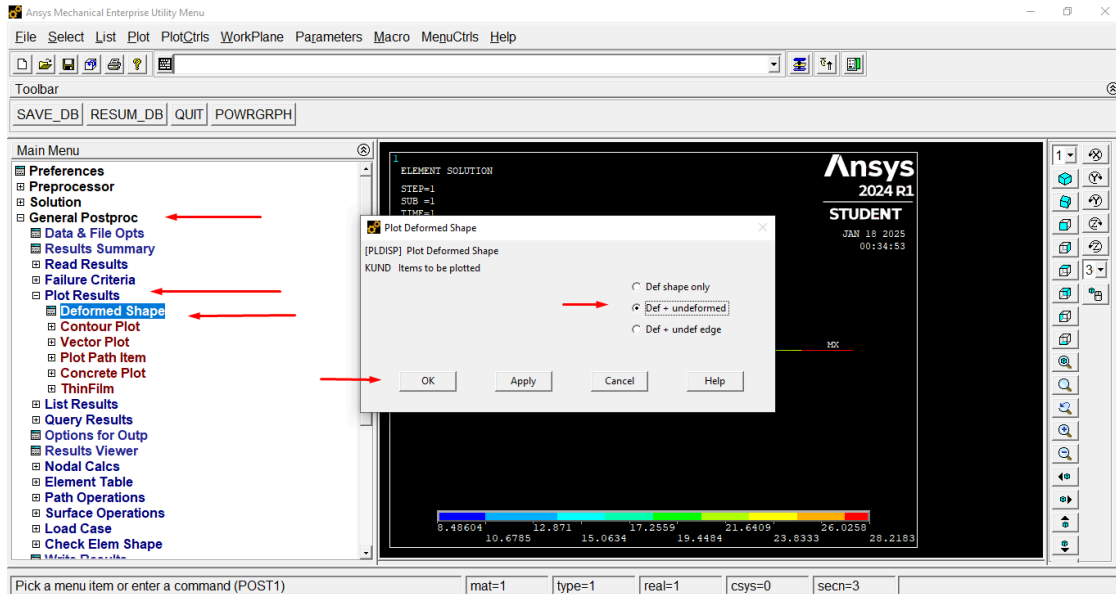


■ O valores de tensão máxima é dado para 8 nós, na tabela abaixo

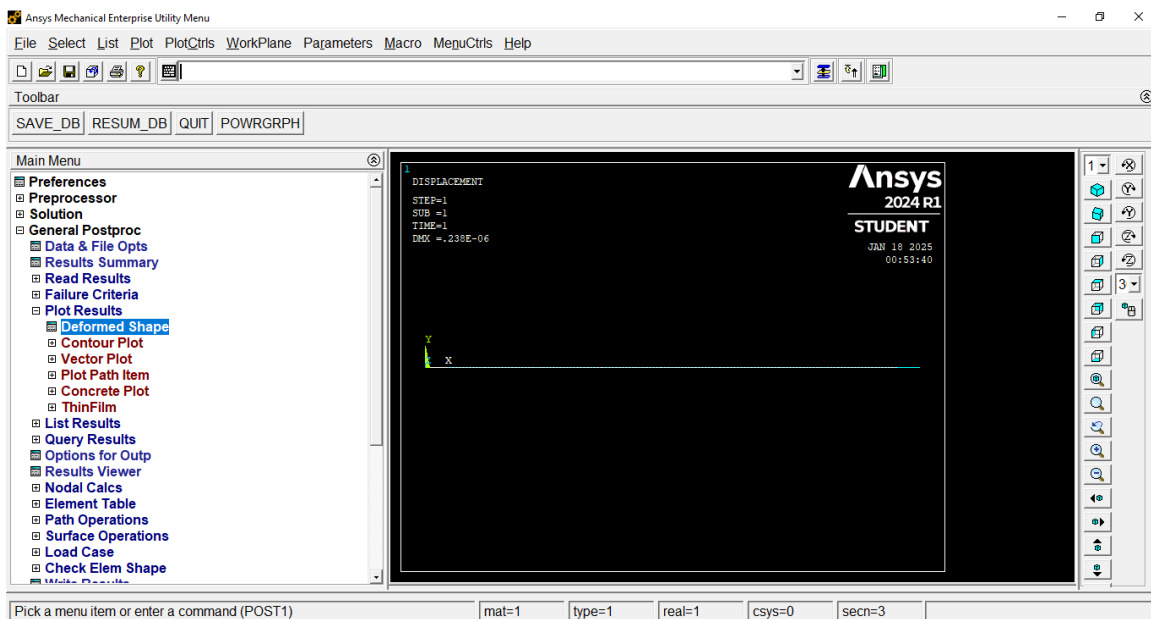


3. Visualizar o deslocamento:

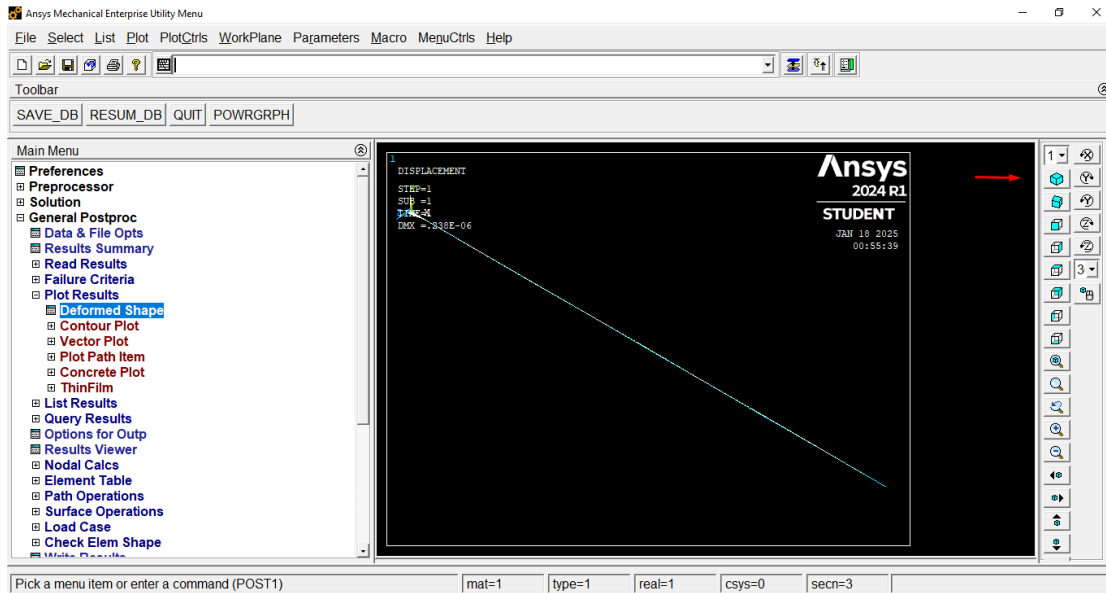
- **General Postproc -> Plot Results -> Deformed Shape -> Def + undeformed -> OK.**



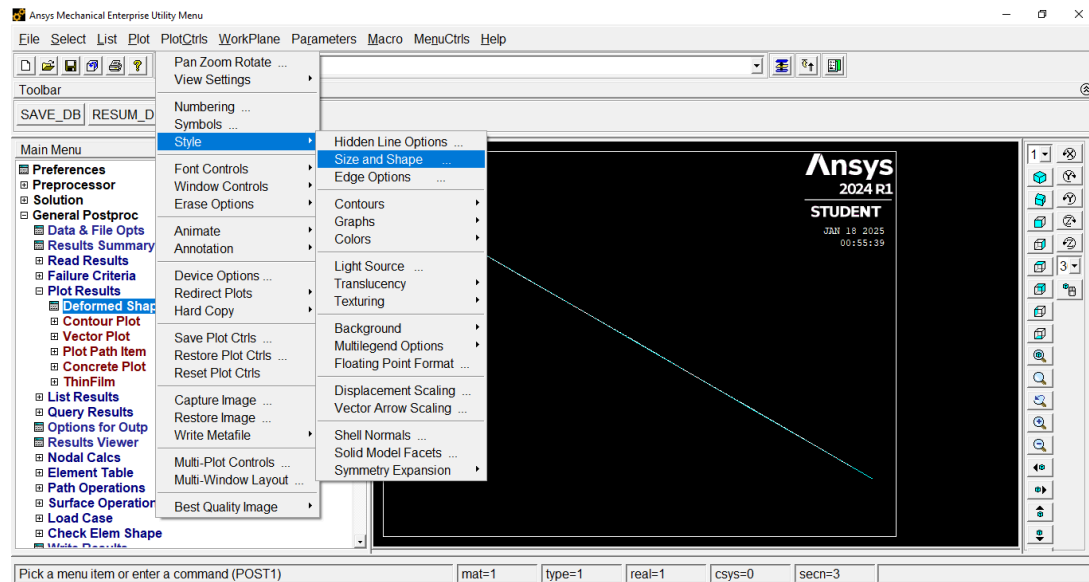
- A parte branca representa o modelo sem deformação, e a azul o modelo deformado.



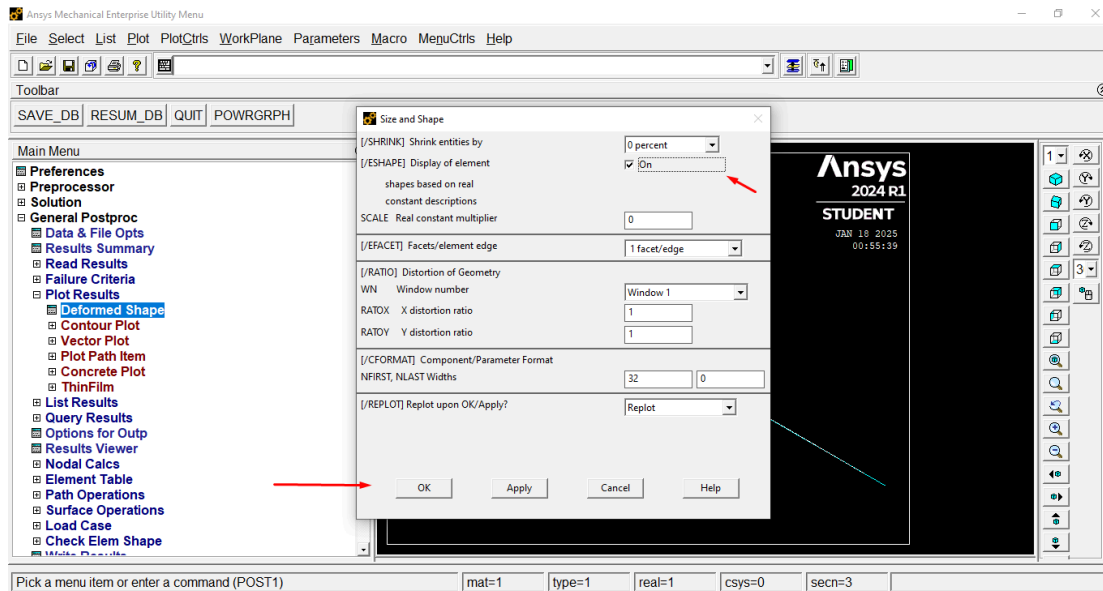
- Para mudar para visão isométrica:



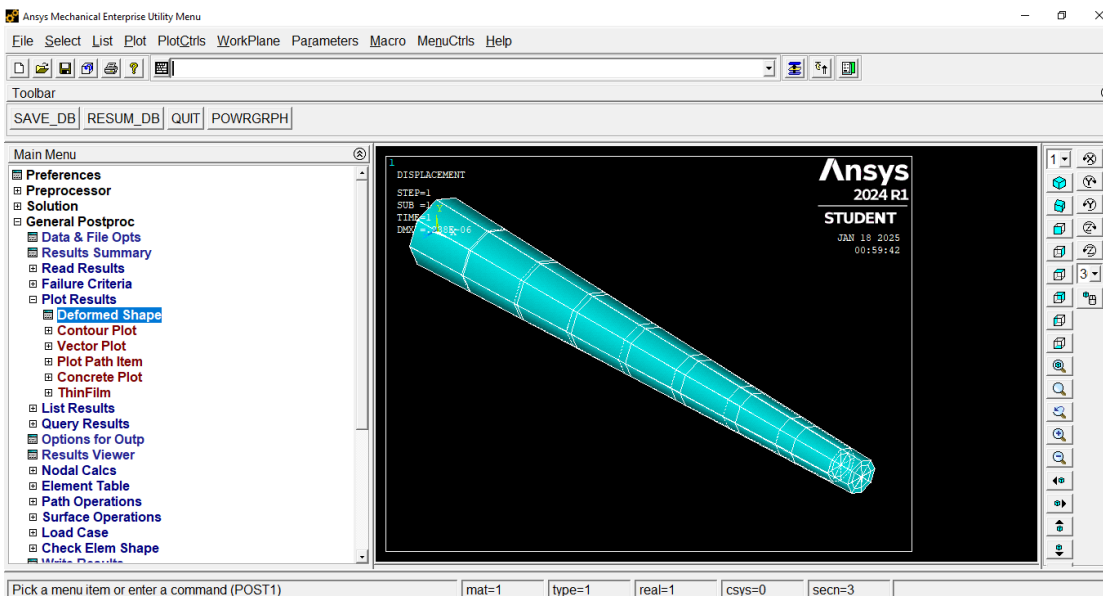
■ PlotCtrls -> Style -> Size and Shape



- Em **Display of element**, selecione **On** e clique em **OK**.

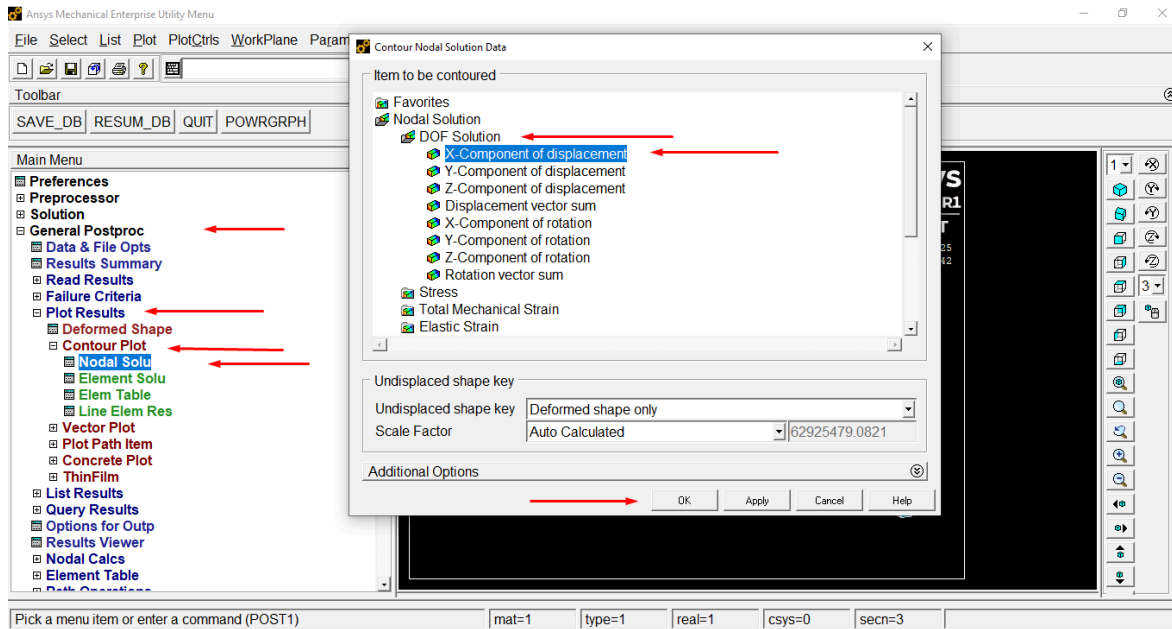


- Neste formato, observa-se níveis diferentes de extensão para os diferentes nós do modelo

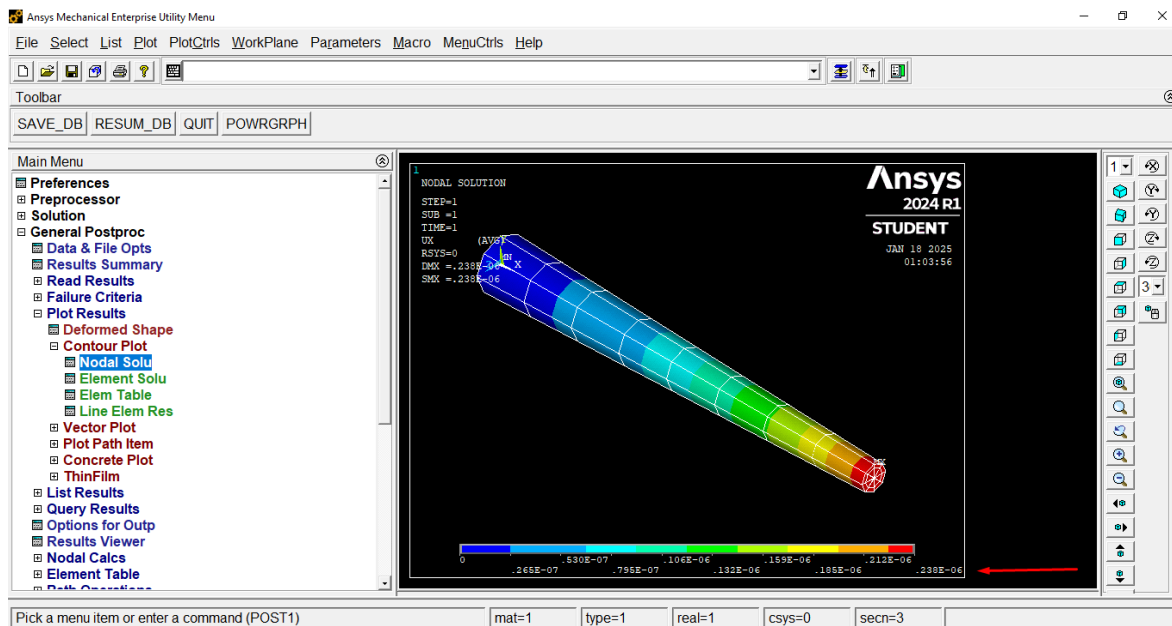


4. Visualizar os deslocamentos nodais:

- General Postproc -> Plot Results -> Contour Plot -> Nodal Solu -> DOF Solution -> X-Component of displacement -> OK.



- O deslocamento máximo observado para 8 elementos (9 nós) é 0,238 mm.



5. Salvar os resultados para análise posterior em um bloco de notas.

```
PRINT U      NODAL SOLUTION PER NODE

***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****

LOAD STEP=      0  SUBSTEP=      1
TIME=      1.0000      LOAD CASE=      0

THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM

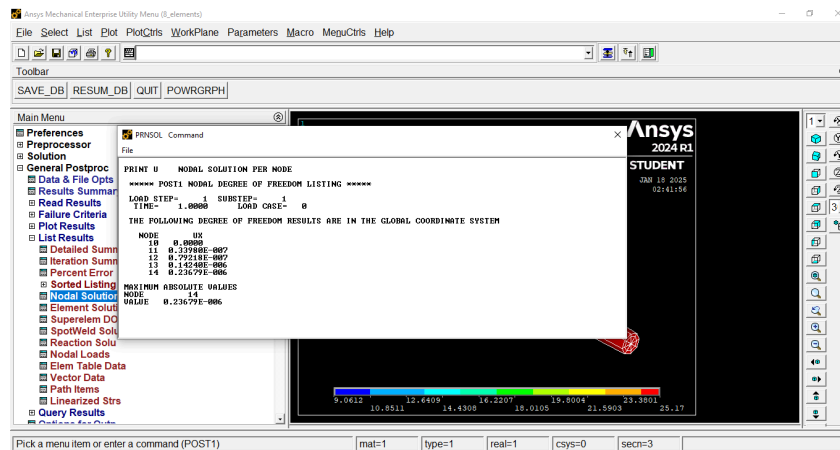
      NODE      UX
      1      0.0000
      2      0.15911E-007
      3      0.34093E-007
      4      0.55068E-007
      5      0.79533E-007
      6      0.10844E-006
      7      0.14311E-006
      8      0.18547E-006
      9      0.23838E-006

MAXIMUM ABSOLUTE VALUES
NODE      9
VALUE      0.23838E-006
```

7. Novo Modelo para 4 elementos

1. A análise a seguir será feita reduzindo-se de 8 elementos para 4 elementos. Todos os procedimentos descritos anteriormente, desde a criação dos nós, elementos, seções transversais, distâncias e demais valores, serão exatamente iguais aos descritos anteriormente. A única diferença será que em vez de 8 elementos, serão criados apenas 4 elementos, com um espaçamento agora de 300 dividido por 4, sendo igual a 75 mm.
2. Após realizar todos os procedimentos descritos acima, é feita uma análise do deslocamento máximo, em função de 4 nós.

- **General Postproc -> List Results -> Nodal Solution**

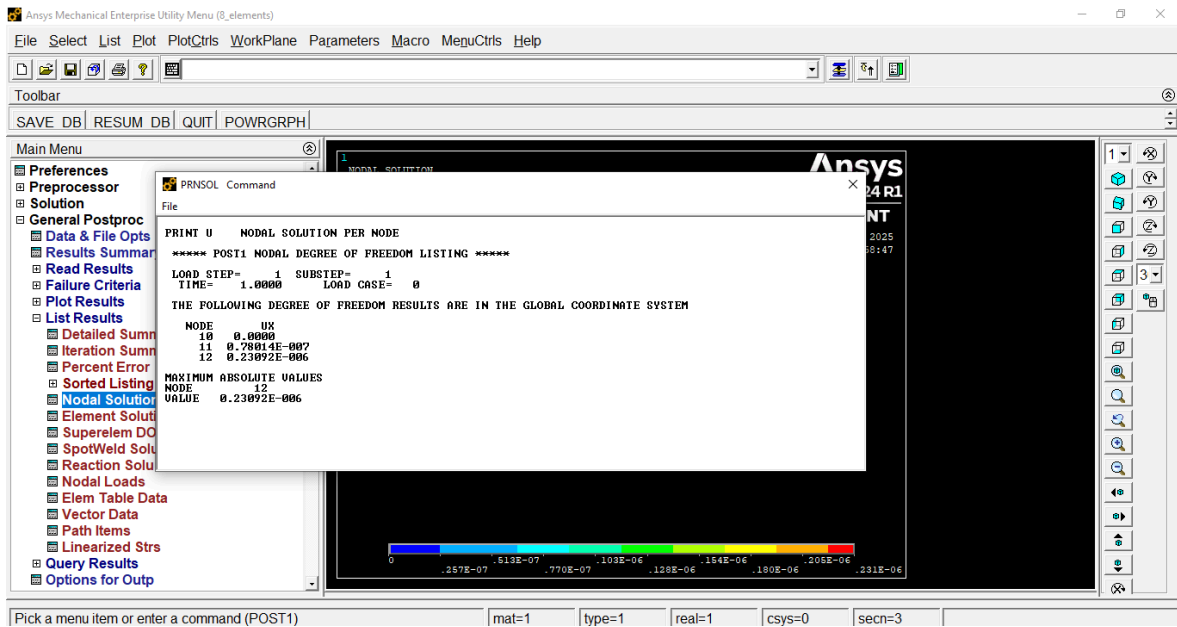


- Observa-se que para 4 elementos, o deslocamento máximo obtido pelo Ansys Mechanical APDL obtido foi de 0,2367 mm
- Os resultados foram salvos para serem visualizados posteriormente.

8. A seguir, será realizada uma análise com 2 elementos.

1. Para isso, será feito todos os passos descritos anteriormete, desde a criação de nós, elementos, seções transversais, distâncias entre seções transversais e etc. A diferença neste momento será devido ao número de elementos, que neste caso será criado apenas 2 elementos.
2. Após descrito todo o passo a passo, para 2 elementos, será listado os resultados do deslocamento máximo em função do número de nós.

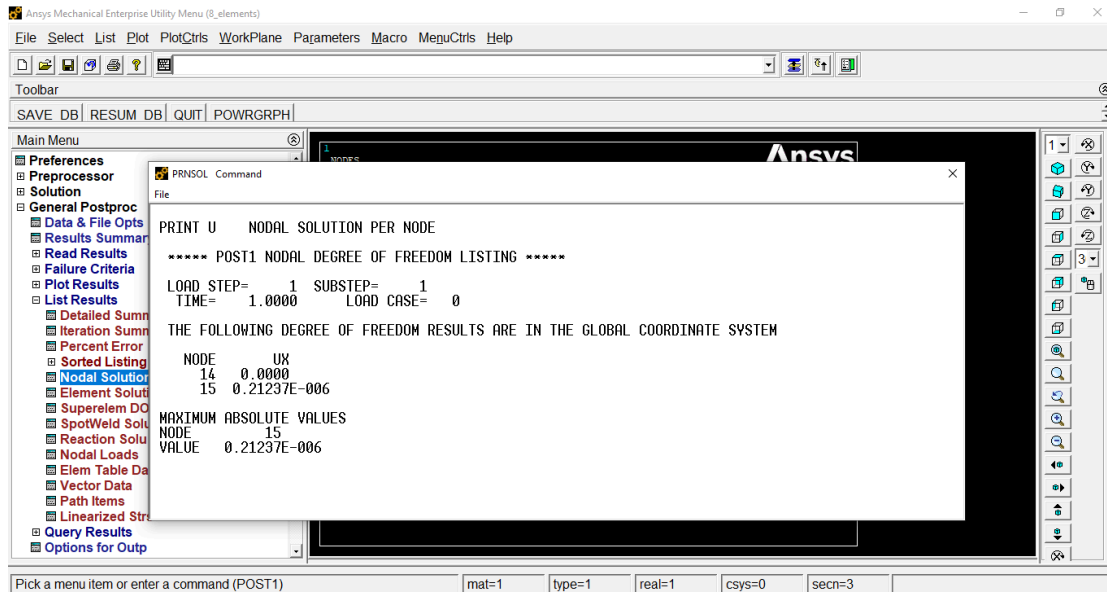
- **General Postproc -> List Results -> Nodal Solution**



3. Observa-se que para 2 elementos, a distância máxima obtida pelo Ansys Mechanical APDL foi de 0,2309 mm

9. A mesma análise será feita para 1 elemento apenas, utilizando-se apenas 2 nós.

1. Para isso, é realizado todo o procedimento descrito anteriormente de criação de nós, elementos, seções transversais, distâncias entre raio maior e raio menor, condições de contorno e etc.
2. Após todos os passos descritos anteriormente concluídos, é analisado o deslocamento máximo em função do número de nós (que neste caso será apenas 2 nós)



3. Observa-se que o deslocamento máximo para apenas 1 elemento foi de: 0,2123 mm

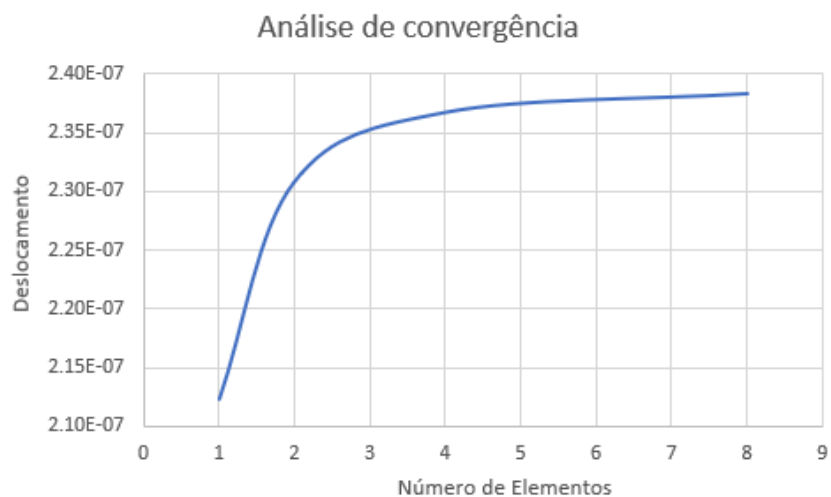
3. Resultados

A tabela abaixo apresenta os deslocamentos máximos obtidos para cada malha testada:

Número de Elementos	Deslocamento Máximo (mm)
1	0,2123
2	0,2309
4	0,2370
8	0,2383

Observa-se que conforme o número de elementos aumenta, o deslocamento máximo se aproxima da solução analítica de **0,2387 mm**, indicando que a malha está convergindo para um resultado mais preciso.

A partir dos dados, foi criada uma curva exponencial para visualizar a tendência de convergência. O gráfico gerado mostra que o deslocamento converge para um valor próximo ao analítico conforme o refinamento da malha.



4. Discussão

A análise realizada demonstra a importância do refinamento da malha em simulações numéricas utilizando o método dos elementos finitos. Uma malha grosseira pode introduzir erros significativos, enquanto um refinamento excessivo pode aumentar o custo computacional sem ganhos consideráveis em precisão.

Os resultados indicam que:

- Para **apenas 1 elemento**, a diferença em relação à solução analítica é significativa.
- Com **2 elementos**, já há uma melhora considerável, reduzindo o erro relativo.
- Para **4 elementos**, o deslocamento já se aproxima bastante do valor analítico.
- Com **8 elementos**, a diferença em relação à solução analítica é mínima, mostrando que a malha convergiu para um resultado confiável.

Dessa forma, verifica-se que o refinamento progressivo da malha resulta em maior precisão, confirmando a eficiência do método numérico empregado.

5. Conclusão

Os resultados obtidos confirmam a convergência do método dos elementos finitos no Ansys Mechanical APDL.

O estudo demonstra a importância do refinamento da malha para a precisão dos resultados em análises estruturais, destacando que uma malha inadequada pode resultar em erros significativos. Assim, recomenda-se sempre realizar uma análise de convergência ao utilizar o método dos elementos finitos.

6. Referências

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING MODELING AND FINITE ELEMENT ANALYSIS -LABORATORY (16ME6DCMFE). [s.l: s.n.]. Disponível em: https://bmsce.ac.in/Content/ME/MFELAB_manual_Jan2019_Updated_28_1_2019.pdf