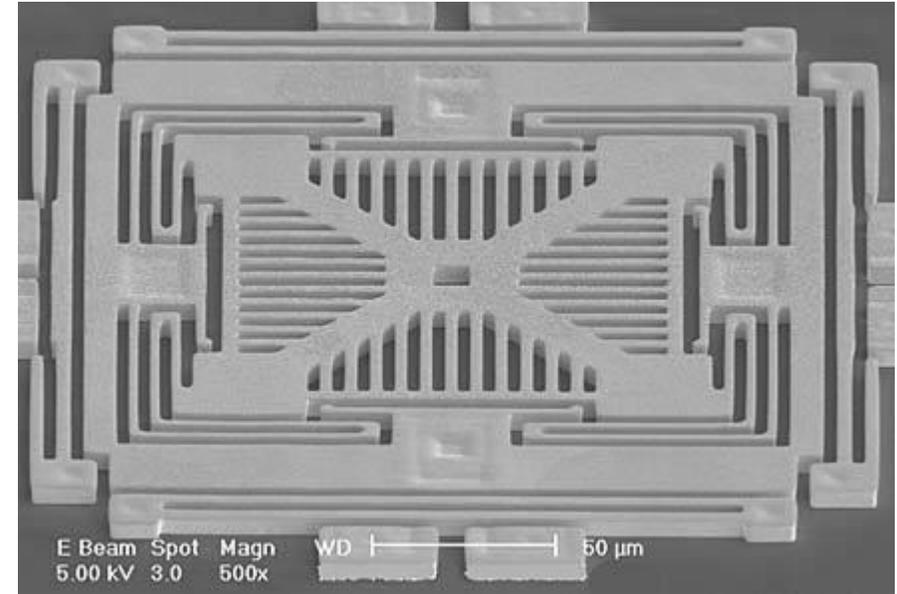
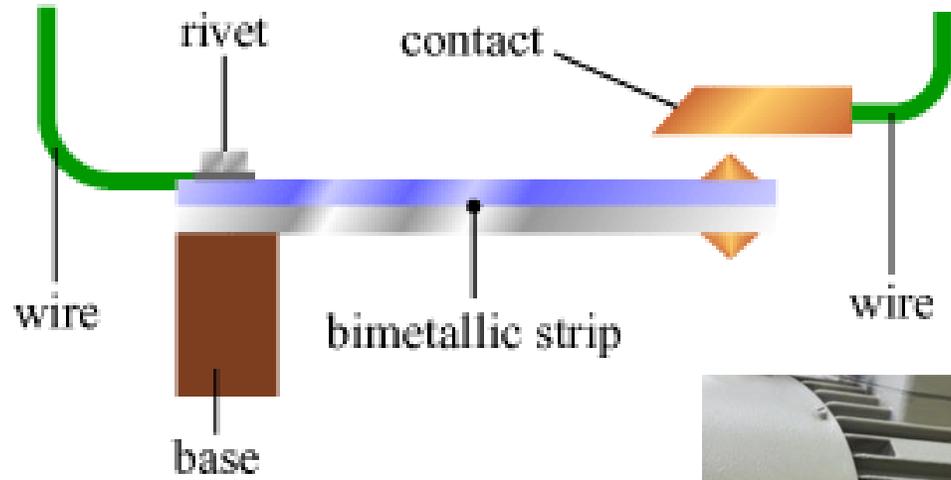


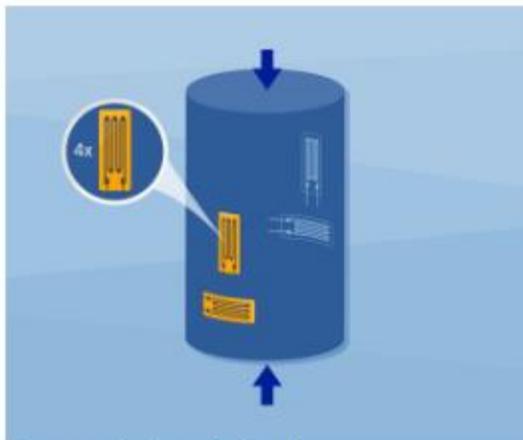
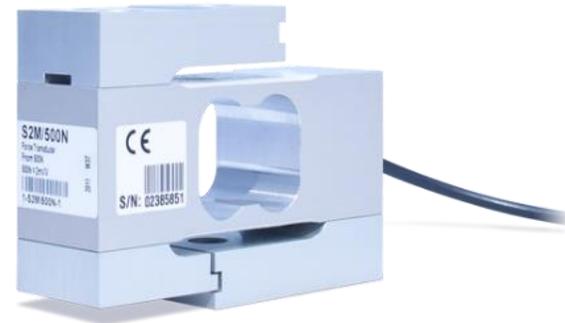
Alguns pontos importantes de Análise Virtual de Sensores

Profa. Dra. Larissa Driemeier

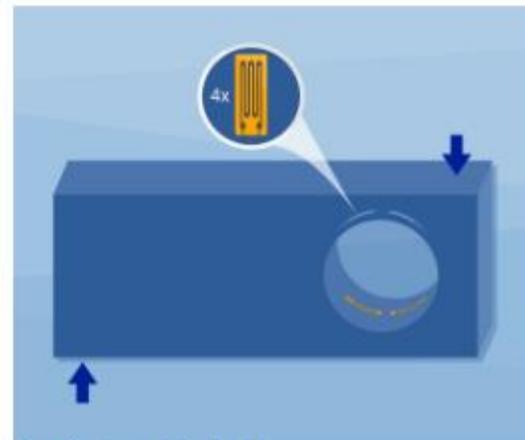
Prof. Dr. Marcilio Alves

Prof. Dr. Rafael Traldi Moura

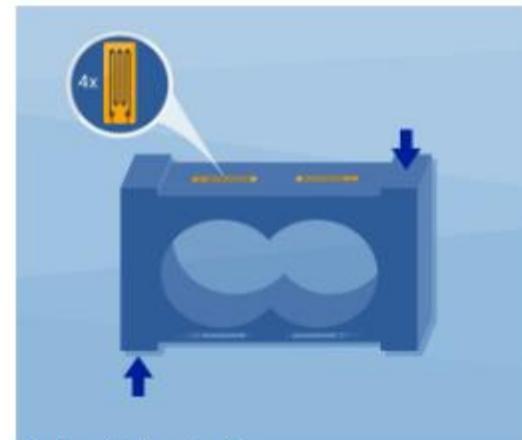




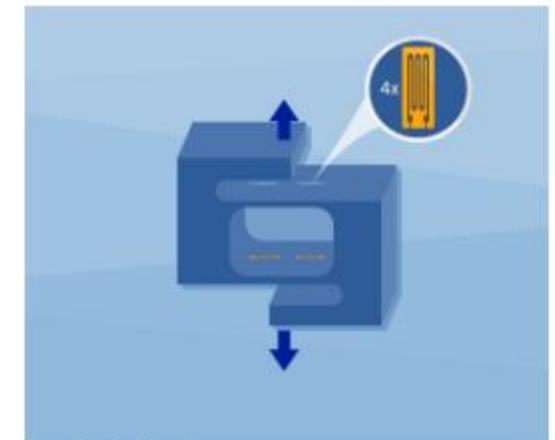
Compressive force load cell



Bending beam load cell



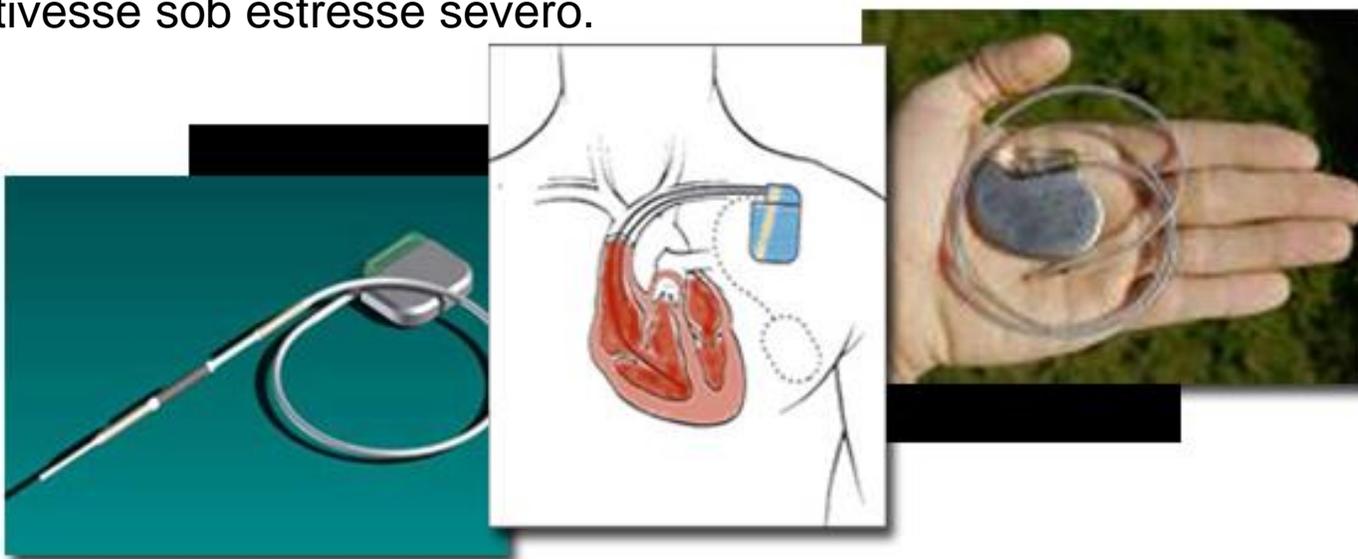
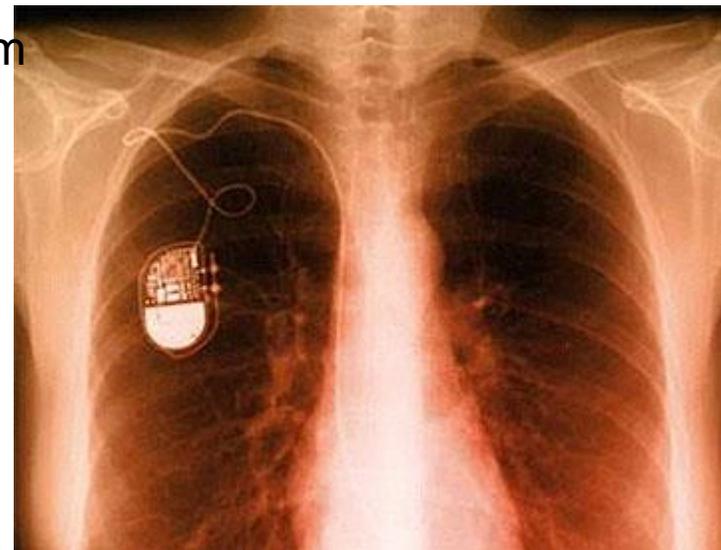
Single point load cell



Tensile load cell



- pesquisa de um ainda está em seus estágios iniciais
- dispositivo absorve as vibrações do coração através de um filme de 0,025mm de espessura de material cerâmico piezoelétrico que expandiria levemente, em resposta ao bater do coração.
- os pesquisadores adicionaram magnetos, cujos campos de força adicionais podem aumentar drasticamente o sinal elétrico resultante das vibrações.
- dispositivo pode gerar 10 microwatts de potência (cerca de oito vezes a quantidade de energia que um marcapassos precisa para operar)
- os materiais piezoelétricos responderiam entre um intervalo de 7 a 700 batimentos por minuto e continuariam a funcionar mesmo se o coração estivesse sob estresse severo.



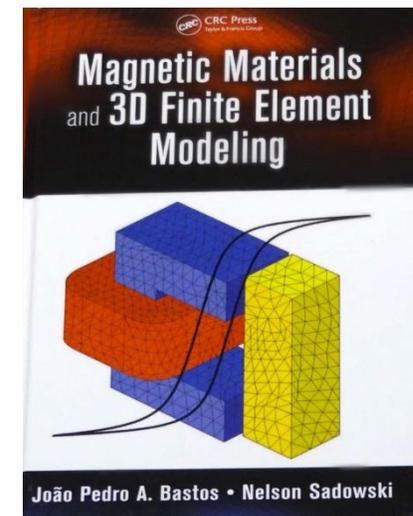
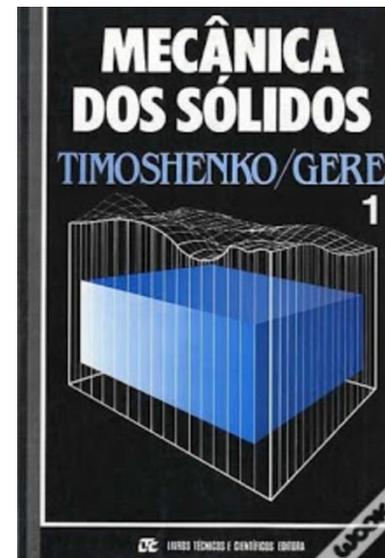
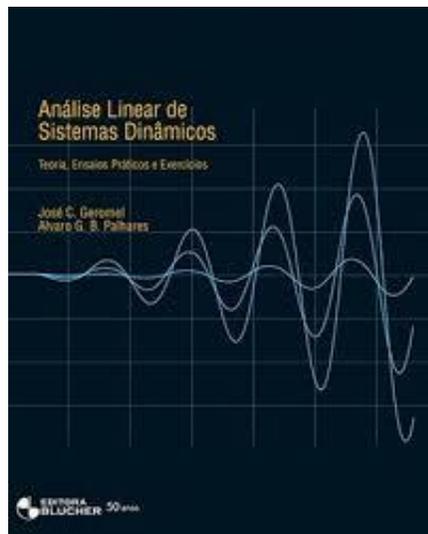
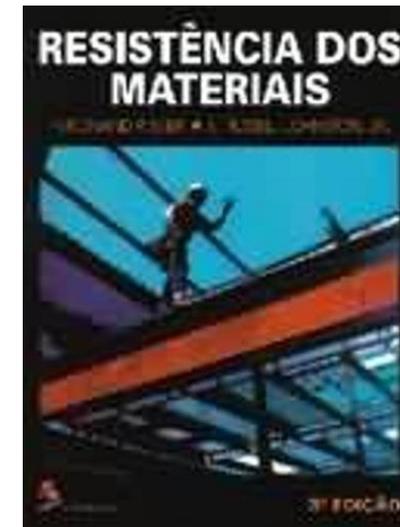
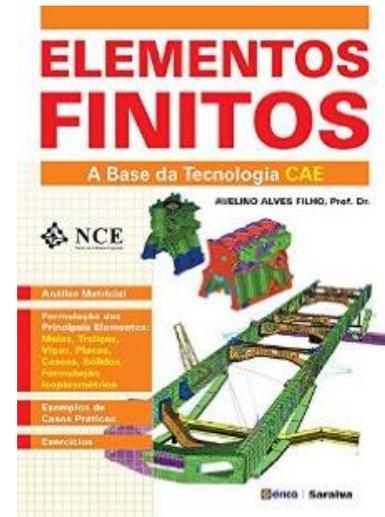
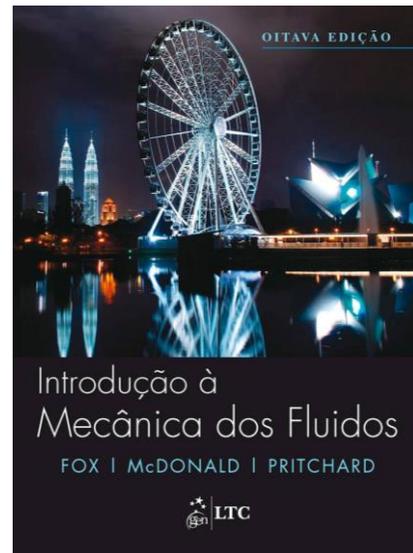
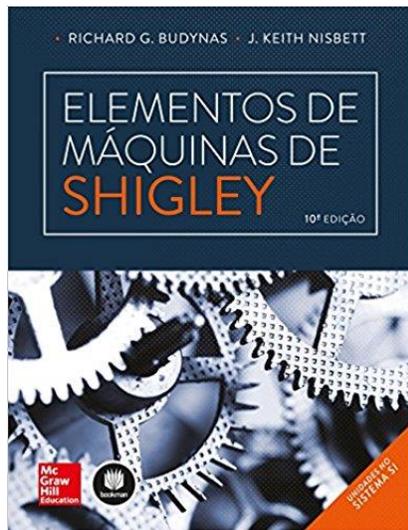


- Então, é uma ESTRUTURA.

**O QUE VOCÊ ENTENDE DE
ANÁLISE ESTRUTURAL???**



Você já passou por análise estrutural em seu curso....



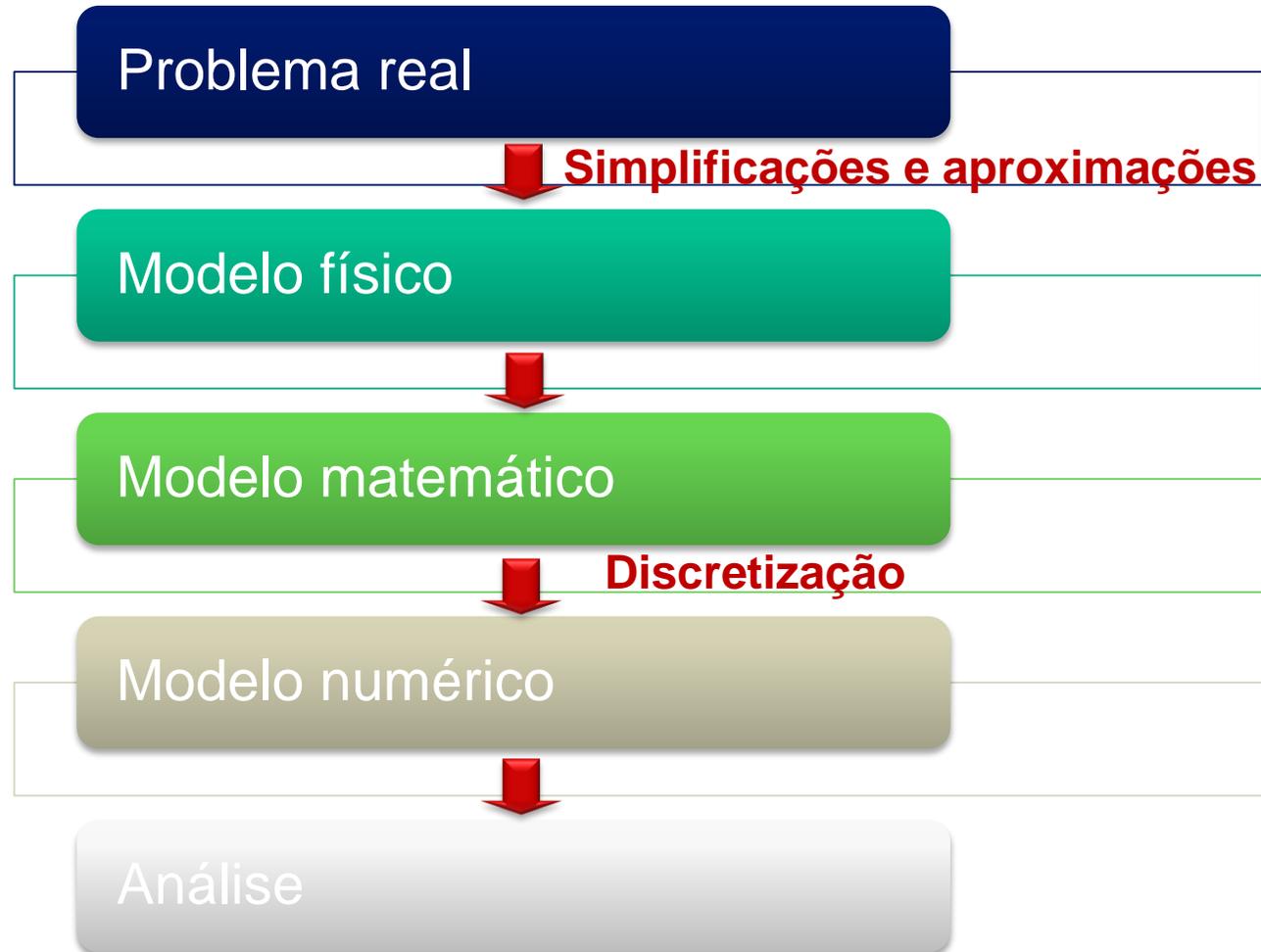
É um resumo dos melhores momentos do seu curso de engenharia até agora...



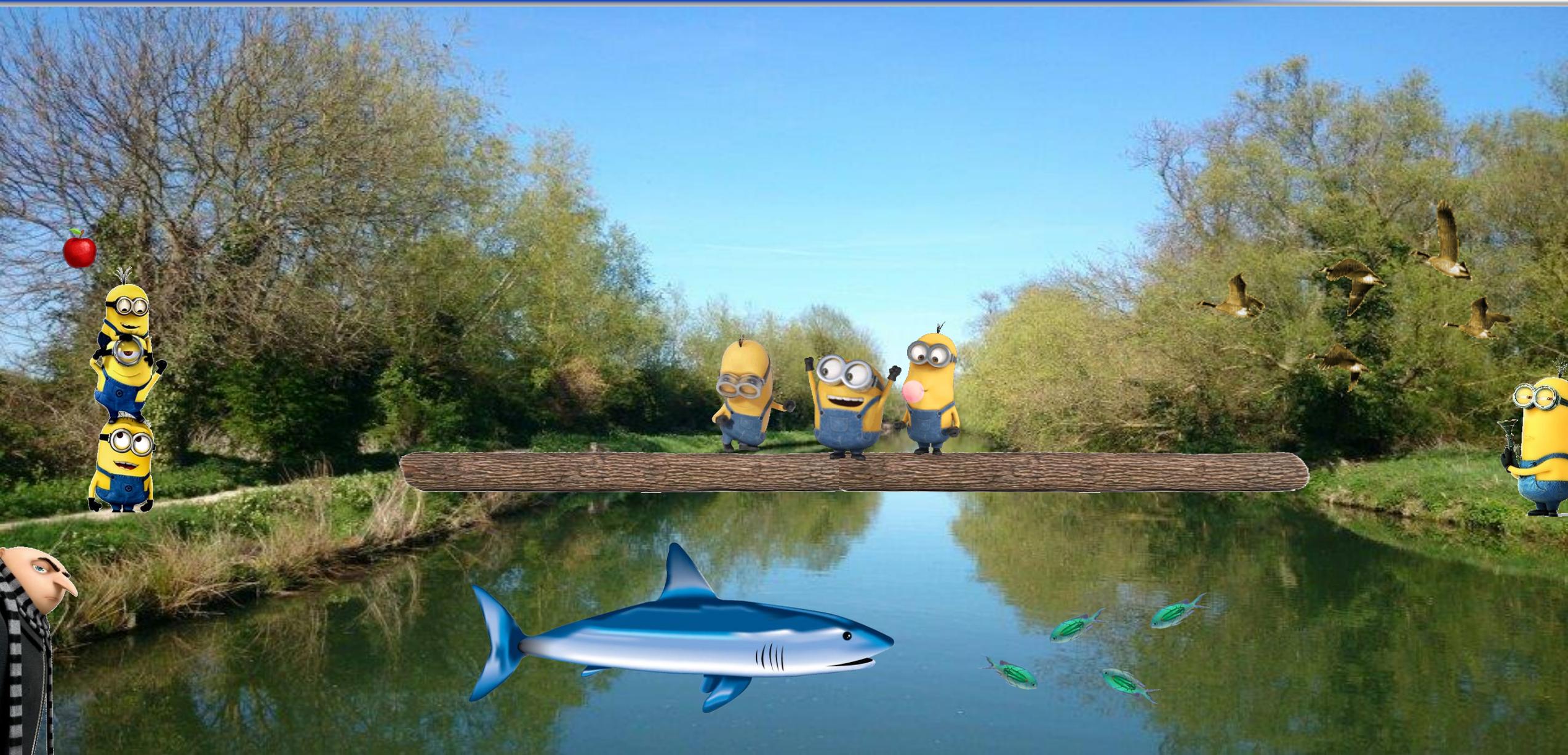
Segundo Prof. Dr. *Avelino Alves Filho*,

“Um dos pontos mais importantes que contribui comprovadamente para o sucesso e progresso dos recursos de CAE, e que tive a oportunidade de verificar nos anos de trabalho nesta área, está relacionado aos CONCEITOS OBRIGATÓRIOS NA UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA CAE. Muitos profissionais que iniciam suas aplicações na área de Elementos Finitos encontram dificuldades, pois o aprendizado de uso de software é feito sem base conceitual, confundindo o aprendizado de manuseio de programa com o conhecimento do Método dos Elementos finitos. Justifica-se portanto, a filosofia de abordagem:

SE O ENGENHEIRO NÃO SABE MODELAR O PROBLEMA SEM TER O COMPUTADOR, ELE NÃO DEVE FAZÊ-LO TENDO O COMPUTADOR!”



O mundo é tridimensional, dinâmico e não linear.





O **engenheiro** constrói um **modelo**,
a partir de um problema que não
possui solução exata, e acha uma
solução aproximada ótima.

Modelar é o processo de escrever uma equação ou sistema de equações que descreve o movimento de um mecanismo físico. O sucesso do modelo é determinado por quão bem a solução da equação prevê o comportamento observado no sistema real.

O mundo é tridimensional, dinâmico e não linear.



Serão desprezados quaisquer efeitos dinâmicos

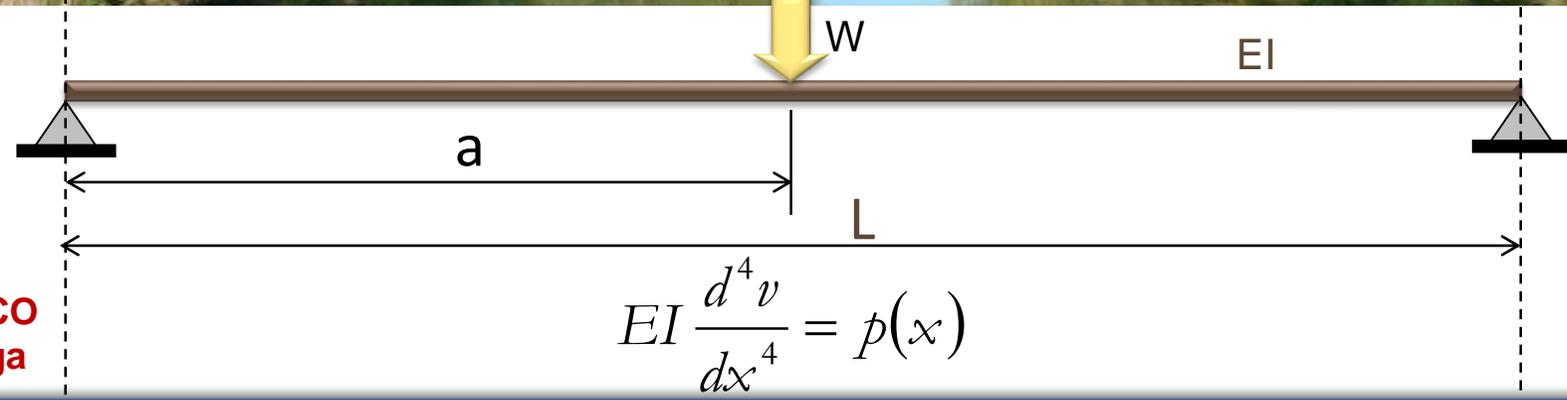
Peso concentrado na posição correspondente ao centro de gravidade do corpo

O tronco tem seção transversal constante e a madeira é um material homogêneo

SISTEMA REAL

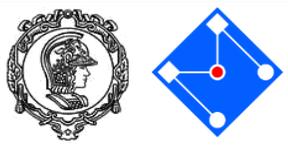
Apoios ideais

MODELO FÍSICO
Viga bi-apoiada

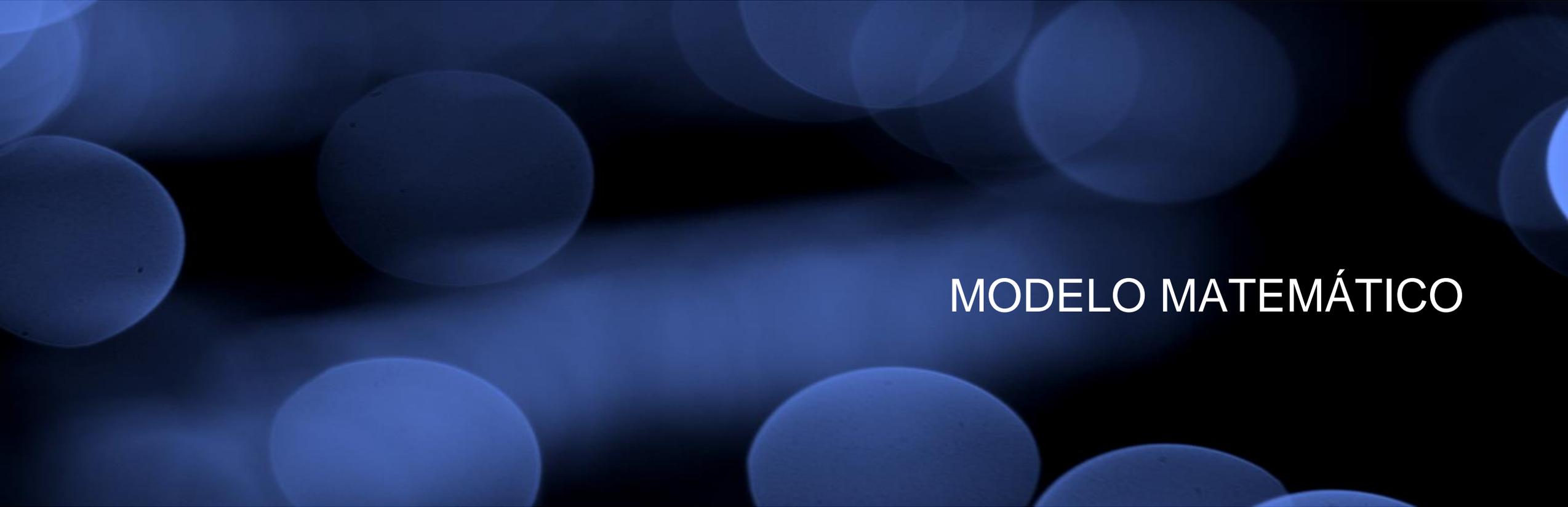


MODELO MATEMÁTICO
Teoria simples de Viga

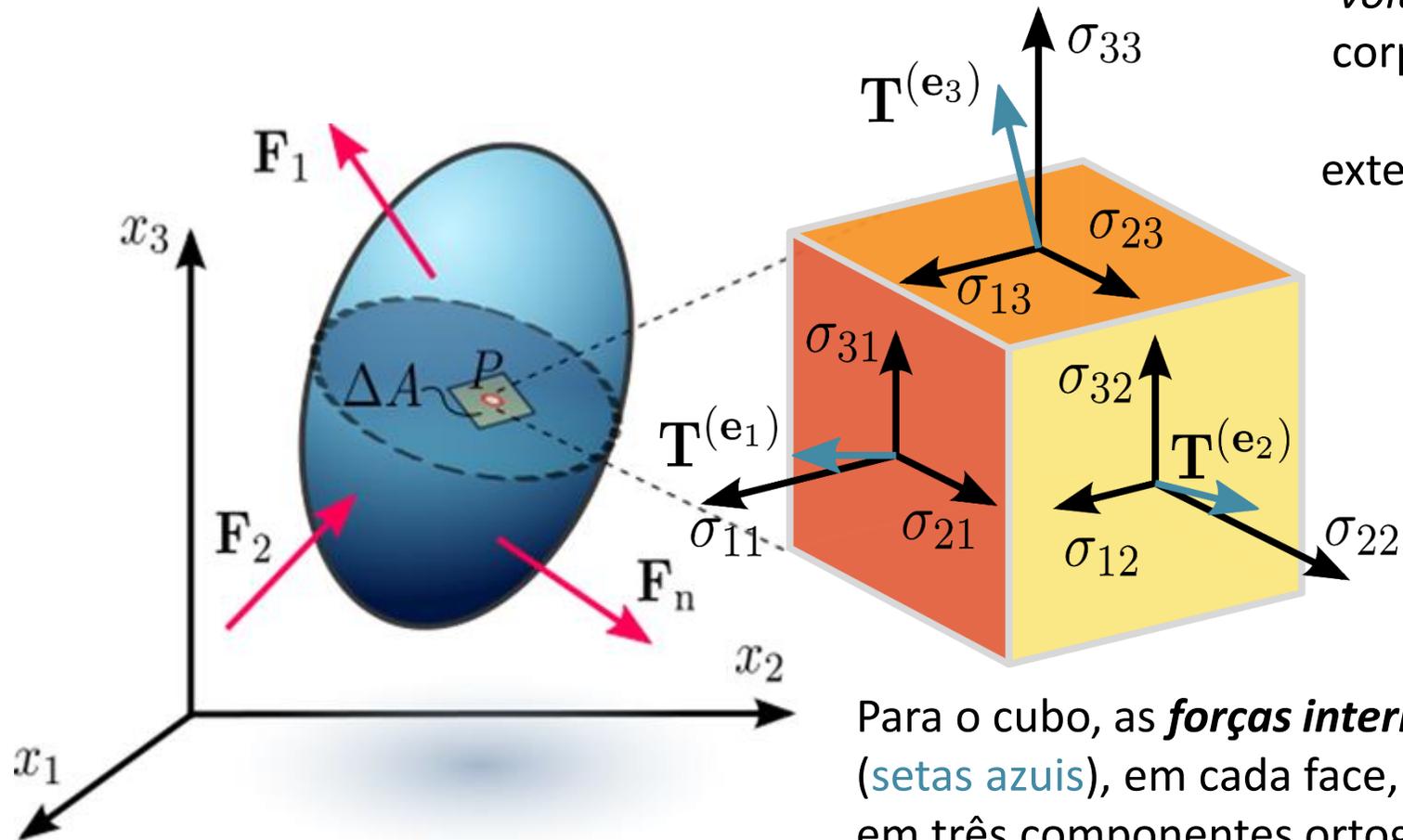
$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} = p(x)$$



- Um bom modelo deve:
 - Considerar os aspectos essenciais do problema;
 - Desprezar os fatores secundários;
 - Fornecer resultados próximos *o suficiente* das respostas reais.
- Habilidade em modelamento é baseada na visualização do problema físico e relacionamento com o que queremos analisar:
 - Distribuição de temperatura?
 - Campo de tensões?
 - Campo de deformações?
- Se as previsões do modelo não estão de acordo com as respostas reais ou esperadas é necessário refinar o modelo:
 - Incluir aspectos inicialmente desprezados.



MODELO MATEMÁTICO



Se extrairmos um *volume elementar* do corpo vamos ver que, devido às forças externas aplicadas, há forças de reação.

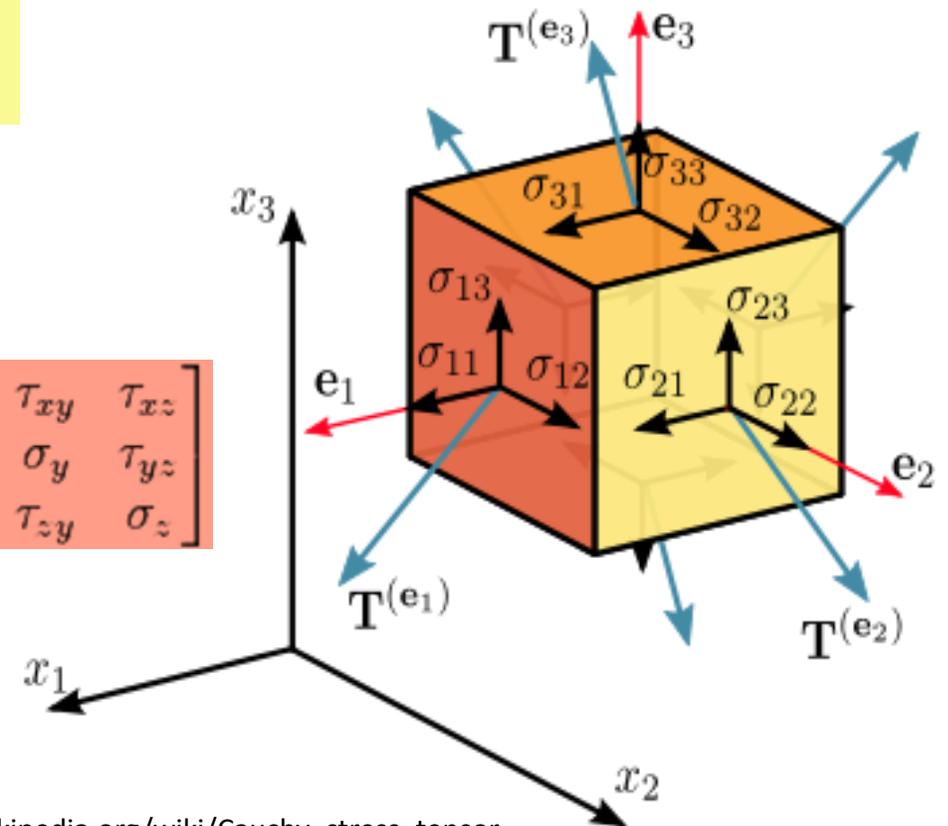
Para o cubo, as **forças internas por unidade de área** (setas azuis), em cada face, podem ser decompostas em três componentes ortogonais.

Pode-se decompor os vetores de tensão em componentes normais e cisalhantes

$$\begin{aligned} \mathbf{T}^{(\mathbf{e}_1)} &= T_1^{(\mathbf{e}_1)} \mathbf{e}_1 + T_2^{(\mathbf{e}_1)} \mathbf{e}_2 + T_3^{(\mathbf{e}_1)} \mathbf{e}_3 = \sigma_{11} \mathbf{e}_1 + \sigma_{12} \mathbf{e}_2 + \sigma_{13} \mathbf{e}_3, \\ \mathbf{T}^{(\mathbf{e}_2)} &= T_1^{(\mathbf{e}_2)} \mathbf{e}_1 + T_2^{(\mathbf{e}_2)} \mathbf{e}_2 + T_3^{(\mathbf{e}_2)} \mathbf{e}_3 = \sigma_{21} \mathbf{e}_1 + \sigma_{22} \mathbf{e}_2 + \sigma_{23} \mathbf{e}_3, \\ \mathbf{T}^{(\mathbf{e}_3)} &= T_1^{(\mathbf{e}_3)} \mathbf{e}_1 + T_2^{(\mathbf{e}_3)} \mathbf{e}_2 + T_3^{(\mathbf{e}_3)} \mathbf{e}_3 = \sigma_{31} \mathbf{e}_1 + \sigma_{32} \mathbf{e}_2 + \sigma_{33} \mathbf{e}_3, \end{aligned}$$

$$\mathbf{T}^{(\mathbf{e}_i)} = T_j^{(\mathbf{e}_i)} \mathbf{e}_j = \sigma_{ij} \mathbf{e}_j.$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}^{(\mathbf{e}_1)} \\ \mathbf{T}^{(\mathbf{e}_2)} \\ \mathbf{T}^{(\mathbf{e}_3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$



https://en.wikipedia.org/wiki/Cauchy_stress_tensor

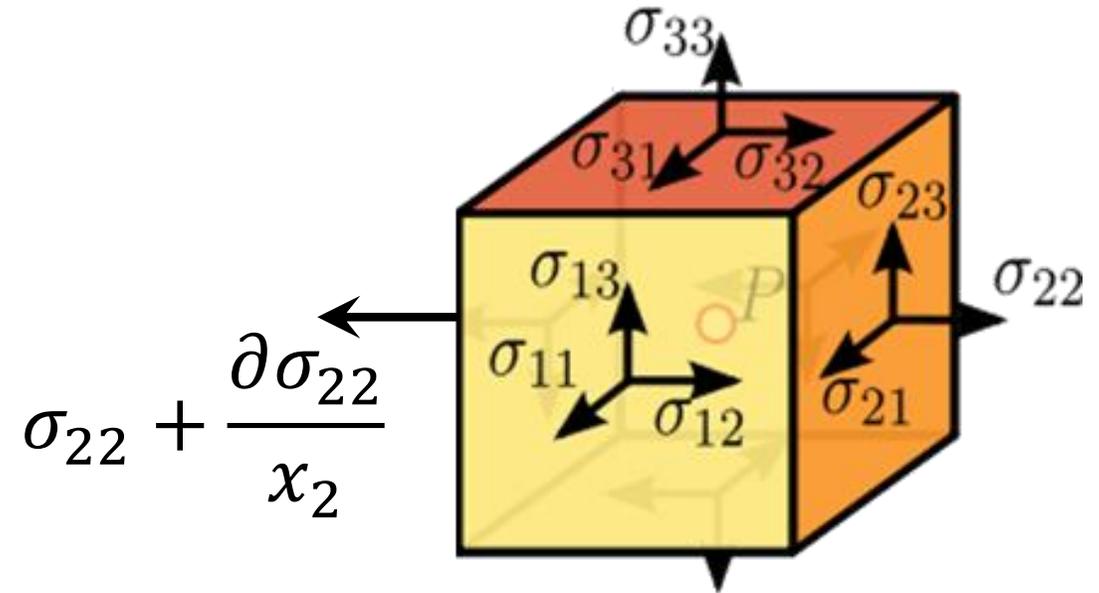


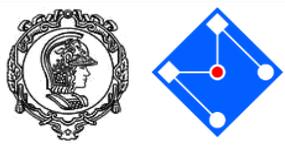
Considere o equilíbrio de um volume diferencial para obter as 3 equações de equilíbrio,

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} + b_1 = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_3} + b_2 = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} + b_3 = 0$$





Forma forte de equilíbrio

De forma compacta,

EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO

$$\partial^T \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = 0$$

ou (equilíbrio dinâmico)

$$\partial^T \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = m \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{t^2}$$

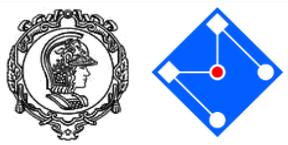


Onde

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{bmatrix}$$

e

$$\partial = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_1} \end{bmatrix}$$



“Dado o carregamento externo aplicado (em S^T e em V) e os deslocamentos prescritos (em S^u) queremos encontrar deslocamentos, deformações e tensões, que mantêm o corpo em equilíbrio.”

Equações de equilíbrio

$$\partial^T \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{X} = \mathbf{0} \quad \text{em } V$$

Condições de contorno

1. **Deslocamentos no contorno:** Deslocamentos são prescritos na parte S^u do contorno

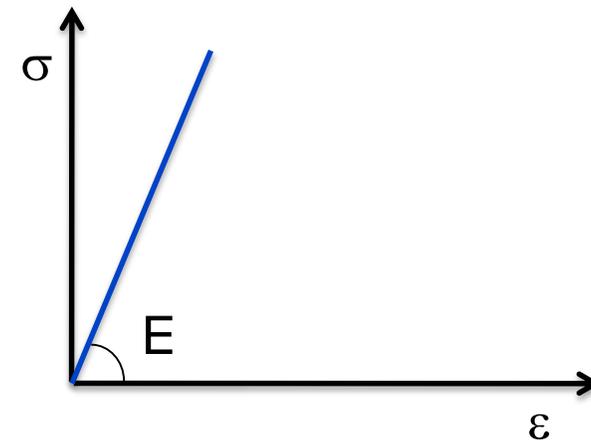
$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^{presc} \quad \text{em } S^u$$

2. **Forças no contorno:** Forças são especificadas na parte S^T do contorno.



- A lei constitutiva relaciona tensões e deformações.
- A lei constitutiva elástica linear é a mais simples lei constitutiva!
- Por definição, o material elástico apresenta as seguintes características,
 - i. Relação tensão deformação é linear;
 - ii. O comportamento do material é completamente reversível;
 - iii. A tensão em um ponto depende apenas da medida de deformação total naquele ponto;
 - iv. Deformações são pequenas.

Caso unidimensional:





$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}$$

Material elástico linear isotrópico:

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

Rigidez: \mathbf{D}

Flexibilidade = $\mathbf{E} = \mathbf{D}^{-1}$



$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ 2\varepsilon_{xy} \\ 2\varepsilon_{xz} \\ 2\varepsilon_{yz} \end{Bmatrix}$$

Rigidez



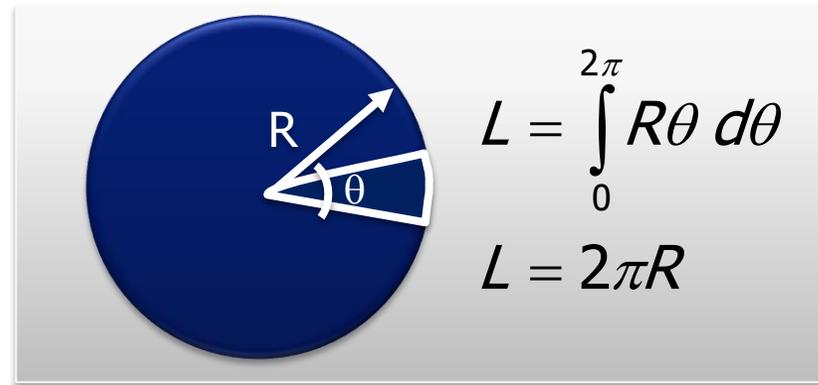
Modelo Numérico



- A análise de estruturas envolve a solução de equações diferenciais parciais.
- Soluções analíticas exatas (fechadas) só existem em casos especiais:
 - Geometria e condições de contorno simples.
 - Certos tipos de carregamento.
 - Material homogêneo.
- A solução de problemas reais requer a utilização de métodos numéricos (aproximados):
 - Método das Diferenças Finitas.
 - **Método dos Elementos Finitos.**
 - Método dos Elementos de Contorno
 - Método espectral...



Determinação do perímetro de um círculo.



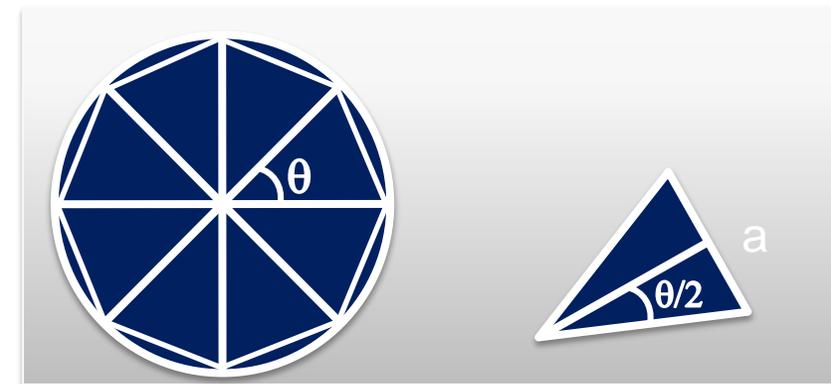
Discretizando o círculo em n partes:

$$L = na \quad \text{tal que} \quad a = 2R \text{sen}(\theta/2)$$

$$\theta = 2\pi/n \quad \therefore n = 2\pi/\theta$$

$$L = 2\pi R \frac{\text{sen}(\theta/2)}{(\theta/2)}$$

A medida que θ tende a zero,
 $\text{sen}\theta$ tende a θ





$$L = 2\pi R$$

$$L = 2\pi R \frac{\text{sen}(\theta/2)}{(\theta/2)}$$

A medida que θ
tende a zero,
 $\text{sen}\theta$ tende a θ



Um método numérico é confiável se ele **converge** para a solução exata do modelo matemático, com o *refinamento*.

Para $n=360$:
Erro (%)=0,00127



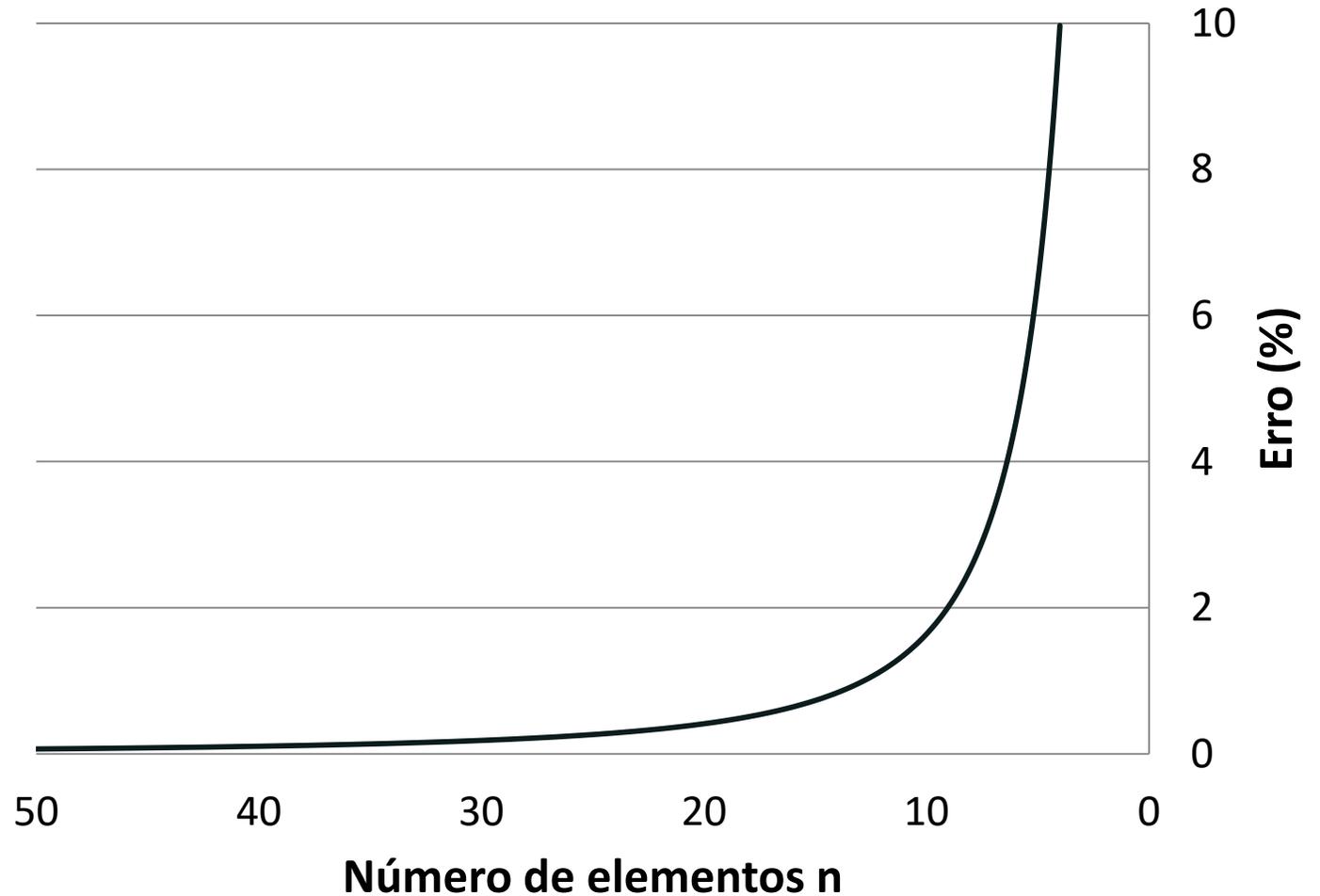
A solução numérica de um problema **não é melhor** do que o modelo matemático utilizado.

Esse é um exemplo clássico da literatura, para retratar que a *idéia* do método dos elementos finitos pode ser considerada dos matemáticos egípcios (aprox. 1800 a.C.) ou de *Archimedes* em seus famosos estudos sobre aproximação de círculo (aprox. 250 a.C.).



Os modelos numéricos devem ser implementados e utilizados com facilidade, além de serem eficientes computacionalmente.

Analisar a velocidade de convergência!





- **Pré-Processamento**
 - Criação da geometria;
 - Atribuição da propriedade de material;
 - Seleção do tipo de elemento;
 - Discretização do modelo.
- **Análise**
 - Aplicação das condições de contorno;
 - Aplicação da carga;
 - Submissão para solução.
- **Pós-Processamento**
 - Seleção do tipo de variável de campo de interesse;
 - Visualização da variável selecionada;
 - Geração de Gráficos/Formas



- **Ansys**

- Ansys Workbench
- Ansys - LS Dyna

- **Abaqus**

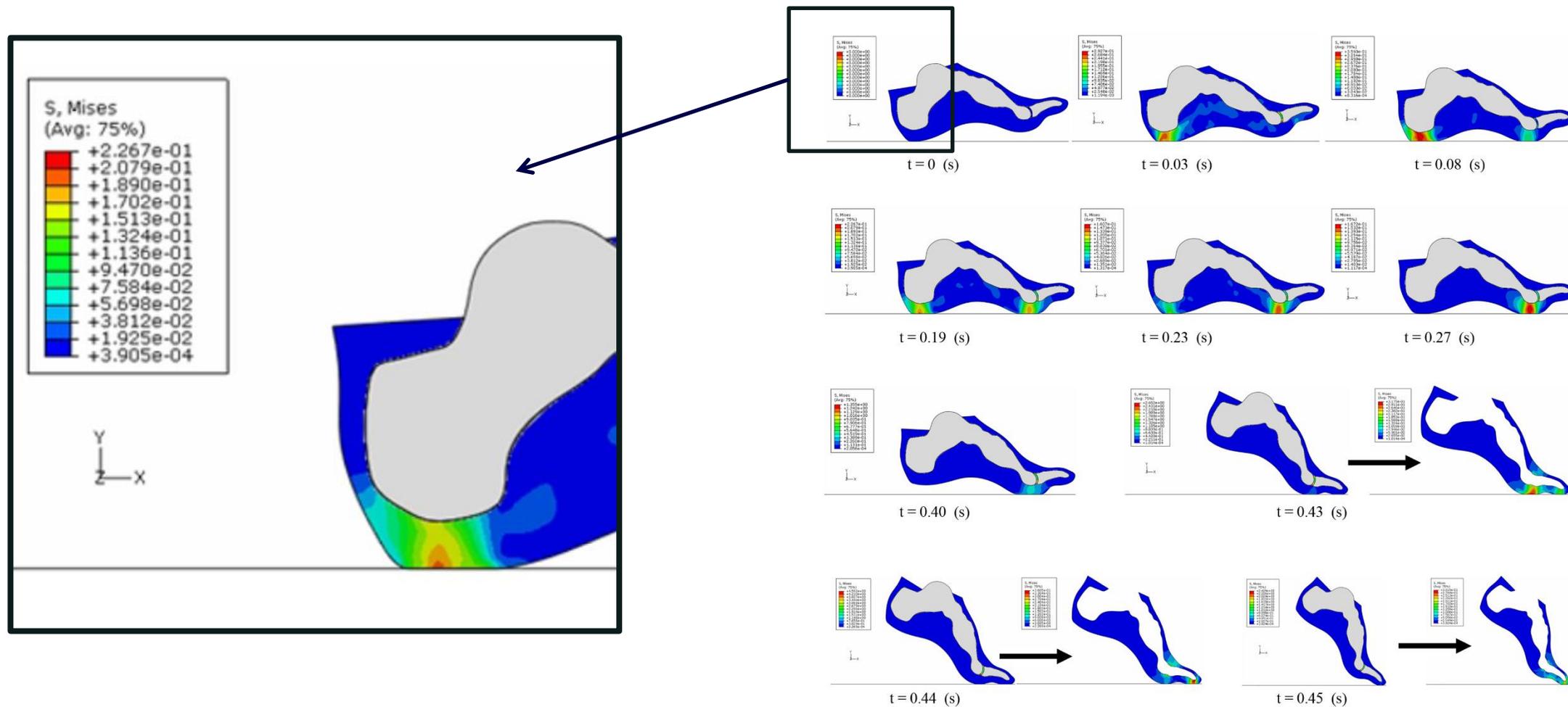
- CAE
- Standard
- Explicit

- **MSc Products**

- Patran
- Nastran
- Dytran

- **LS-Dyna**

- **Hyper mesh, Ideas, Unigraphics, Pro-Mechanica, Adina, Cosmos, ...**



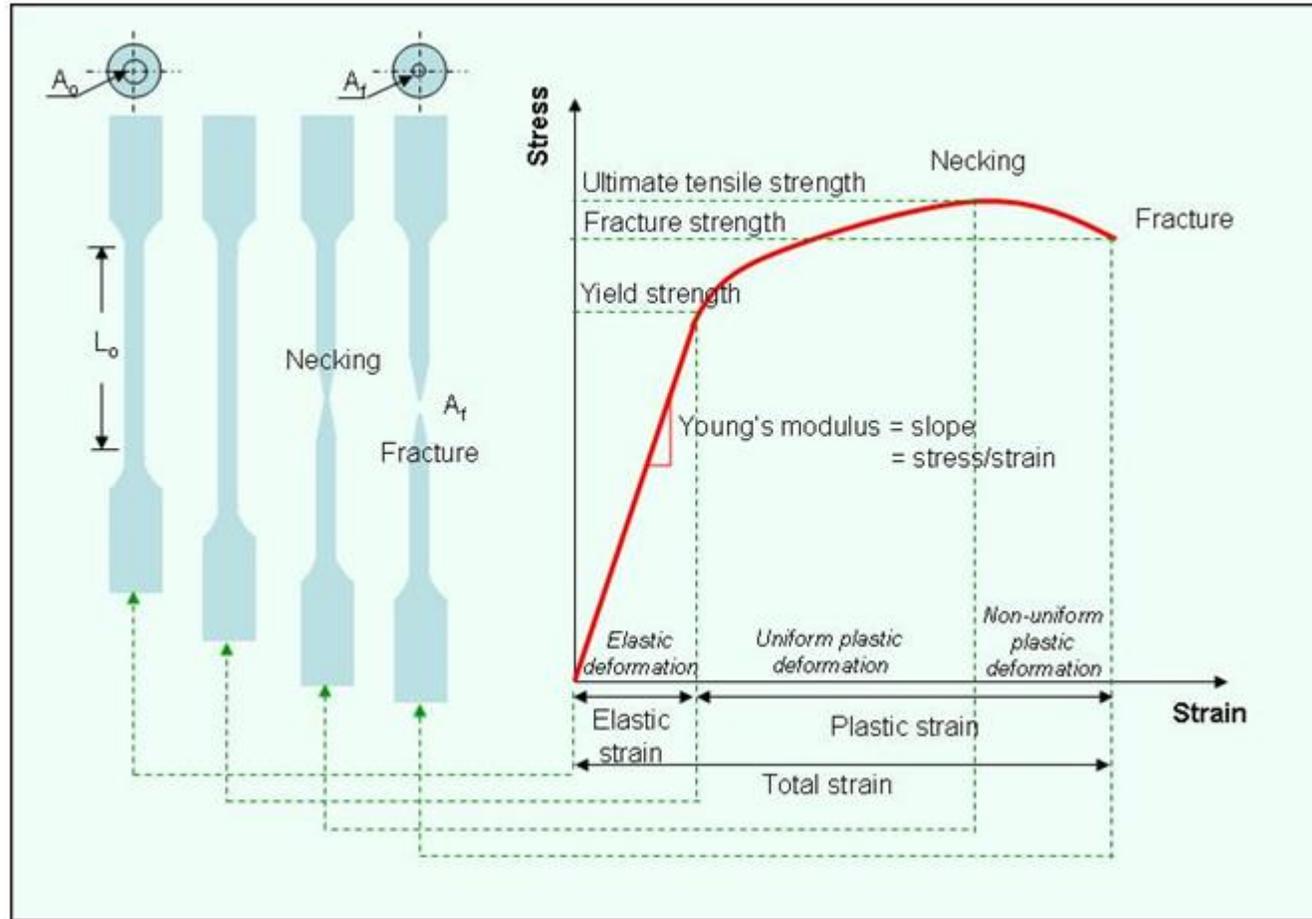
A Dynamic Finite Element Analysis of Human Foot Complex in the Sagittal Plane during Level Walking

Zihui Qian Lei Ren Yun Ding John R. Hutchinson Luquan Ren

November 11, 2013 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0079424>



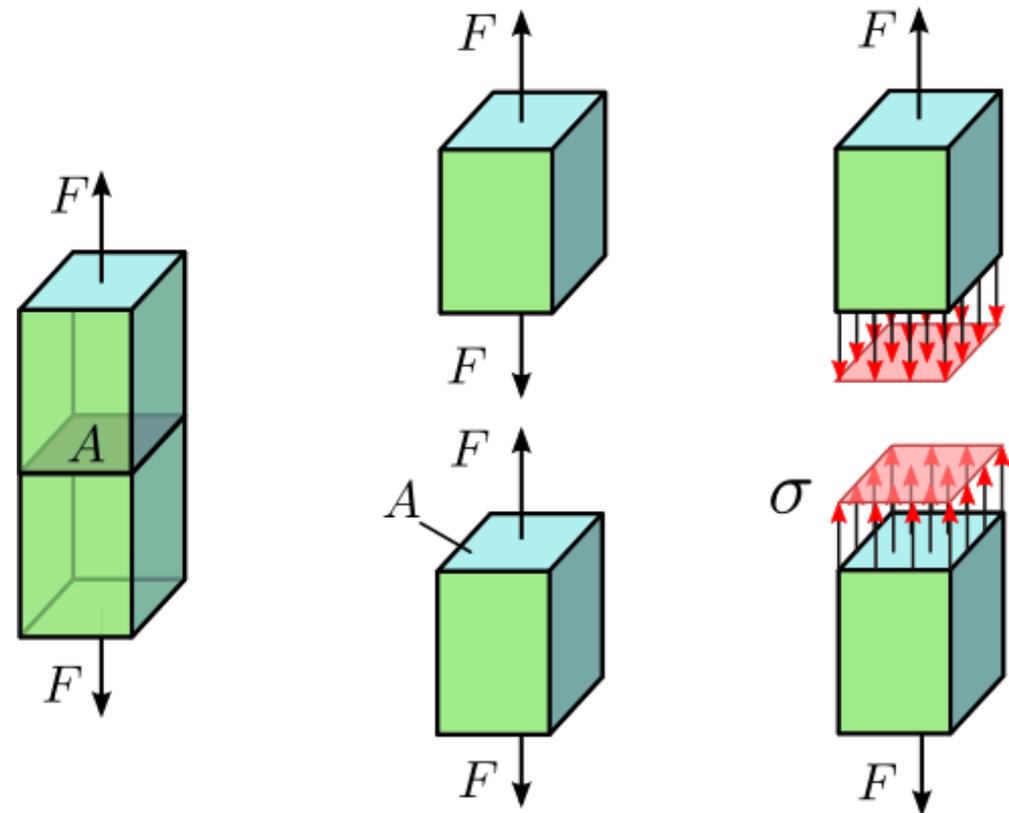
Como analisar os resultados???



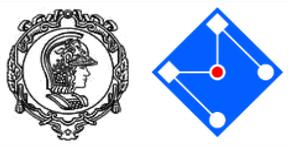


$$\sigma \text{ e } \sigma_y$$

A melhor maneira de analisar é uma comparação direta entre esses dois valores ?!?!?!?

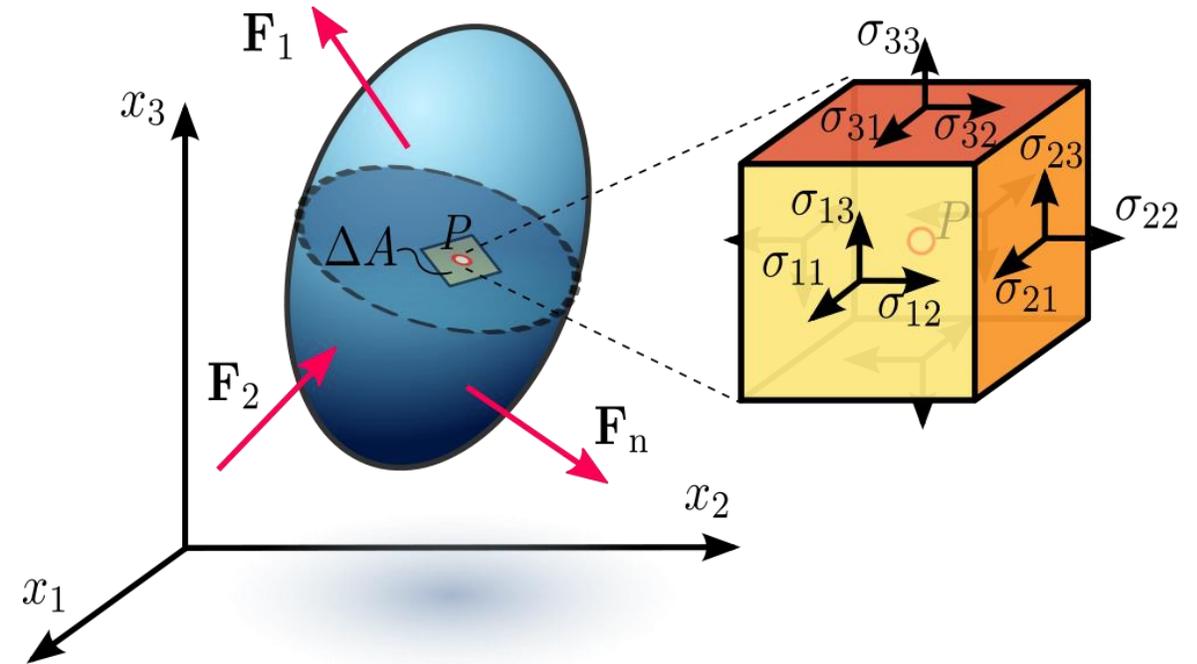


By Jorge Stolfi - Own work, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24499456>



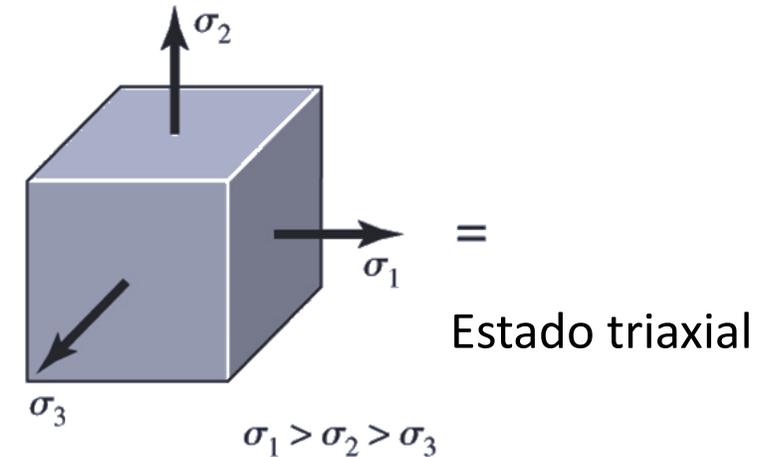
$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \text{ VS } \sigma_y$$

Estado multiaxial de tensões e um único valor de tensão de escoamento. Como comparar ?!?!?!





Origina-se da observação de que a tensão hidrostática em materiais dúcteis (tensões principais iguais) apresenta níveis de escoamento extremamente superiores aos valores esperados.



Teoriza que, se a energia de deformação for dividida em energia de mudança de volume hidrostático e energia de distorção angular, o escoamento é unicamente afetado pela energia de distorção.

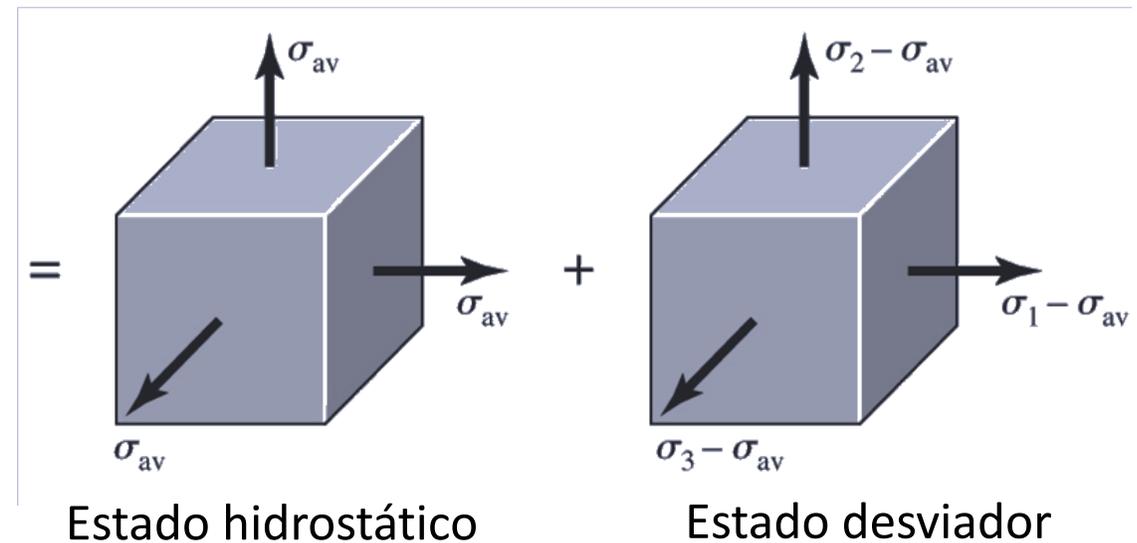
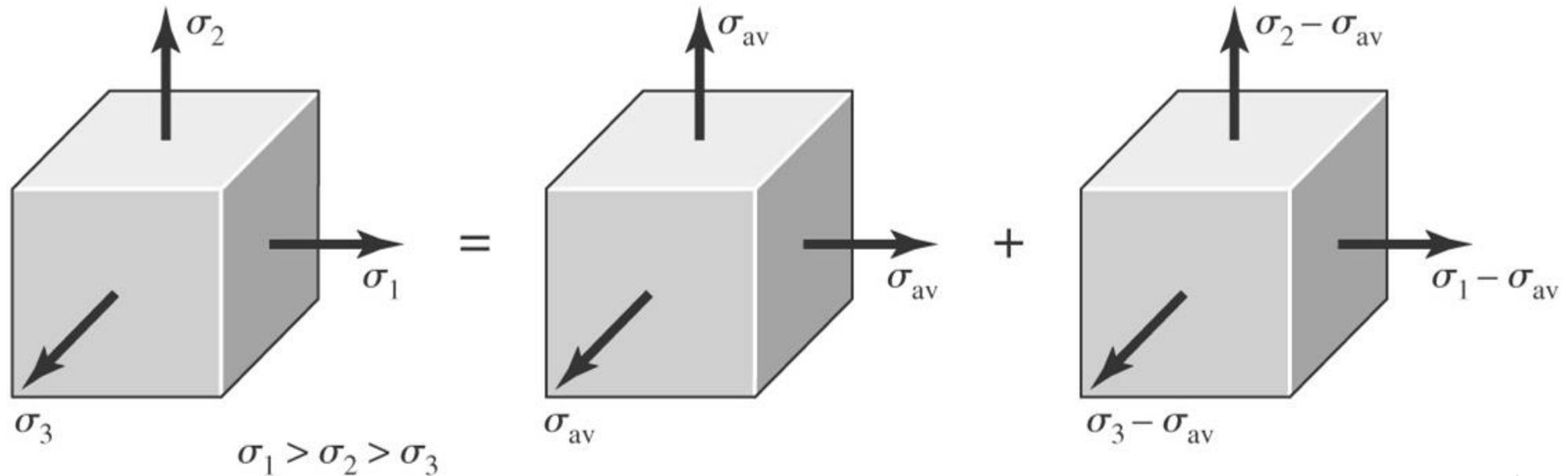


Figura extraída do Shigley

O escoamento ocorre quando a energia de distorção por unidade de volume atinge a energia de distorção por unidade de volume necessária para o escoamento em um ensaio uniaxial de tração do do mesmo material.

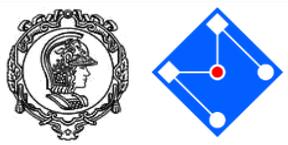


(a) Triaxial stresses

(b) Hydrostatic component

(c) Distortional component

Figura extraída do Shigley



Energia de deformação,
por unidade de volume

$$u = \frac{1}{2} [\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3]$$

Tensão hidrostática media,

$$\sigma_{av} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

Relação tensão-deformação
(Lei de Hooke)

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

$$u = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]$$



$$u = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]$$

Energia volumétrica (obtida substituindo $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ por σ_{avg}),

$$u_v = \frac{3\sigma_{av}^2}{2E} (1 - 2\nu)$$

$$u_v = \frac{1 - 2\nu}{6E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + 2\sigma_1\sigma_2 + 2\sigma_2\sigma_3 + 2\sigma_3\sigma_1)$$

Energia desviadora,

$$u_d = u - u_v = \frac{1 + \nu}{3E} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]$$



$$u_d = u - u_v = \frac{1 + \nu}{3E} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]$$

$$u_d = \frac{1 + \nu}{3E} S_y^2$$

Energia de deformação desviadora em ensaio de tração uniaxial:

$$\sigma_1 = S_y \text{ e } \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \rightarrow \sigma_{avg} = \frac{\sigma_1}{3}$$

$$\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \geq S_y$$



Tensão equivalente de von Mises.

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2}$$



$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} \right]^{1/2}$$

Estado plano de tensões,

$$\sigma' = (\sigma_A^2 - \sigma_A \sigma_B + \sigma_B^2)^{1/2}$$

Plano xy ,

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right]^{1/2}$$

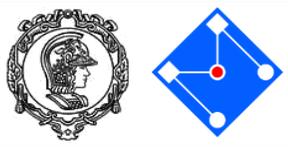
$$\sigma' = [\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2]^{1/2}$$



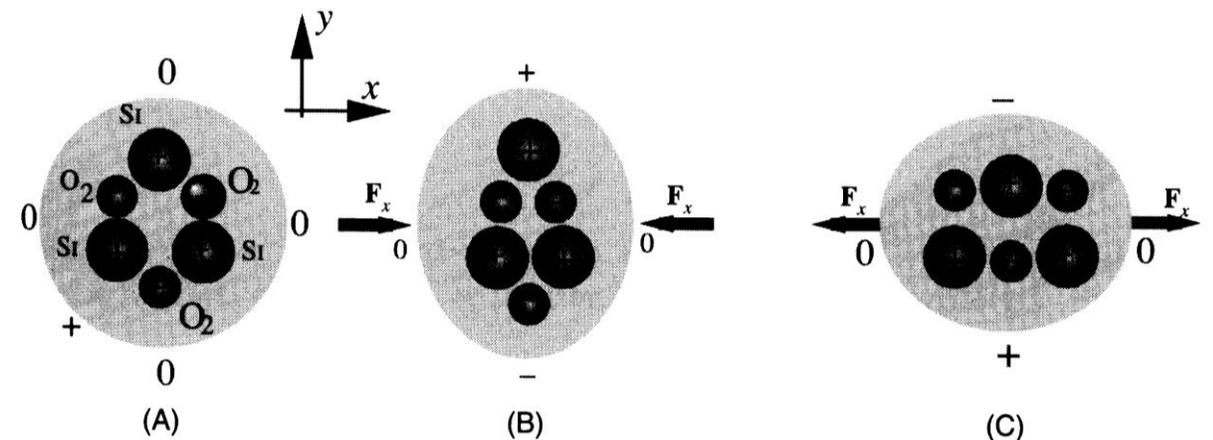
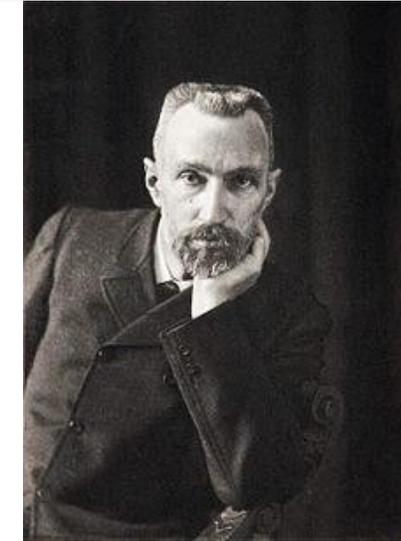
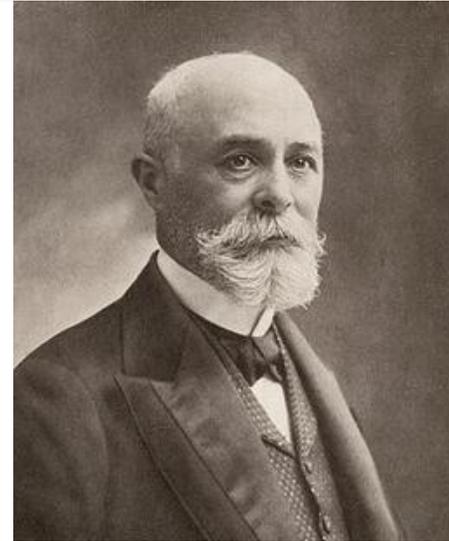
- Elementos piezoelétricos são comumente usados em estruturas de sistemas inteligentes, como sensores e atuadores.
- Uma das grandes utilizações de piezoeletrecidade atualmente é “*energy harvesting*”

Energy harvesting system

- Estudamos análise de vibrações e entendemos a oscilação de um sistema massa-mola-amortecedor.
- Agora, basta adicionarmos a esse sistema oscilatório um transdutor que converta a energia de vibração em energia elétrica. *Harvesting* significa converter uma energia vibratória (que seria dissipada e perdida), coletar e armazenar essa energia em um circuito elétrico.



- Piezoelectricidade foi descoberta pelos irmãos Pierre e Jacques Curie em 1880.
- O termo *piezo* é derivado do grego *piezein* que significa espremer ou apertar. Piezoelectricidade é a propriedade que certos materiais cristalinos possuem de se tornarem eletricamente carregados quando submetidos a uma tensão mecânica.

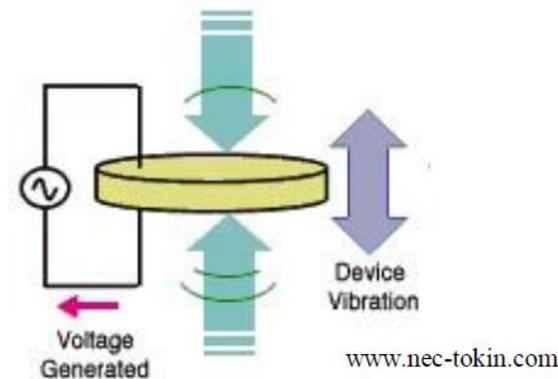




- **Piezoelétricidade direta**

Geração de carga elétrica sob tensão de tração ou compressão.

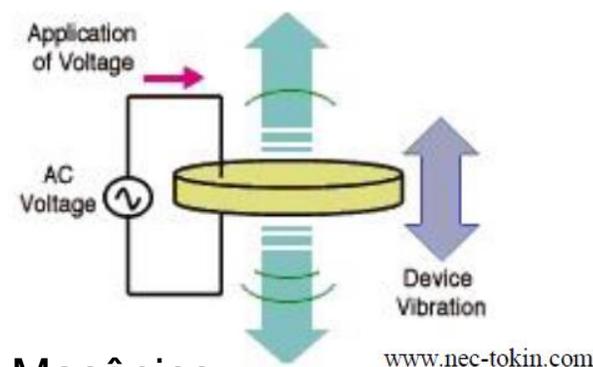
Mecânico → Elétrico



- **Piezoelétricidade inversa**

É o *efeito de conversão*, ou seja, a ocorrência de deformação mecânica ao serem submetidos a um campo elétrico.

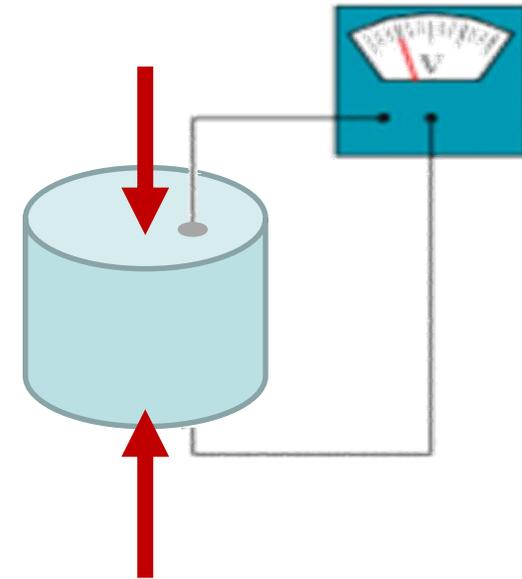
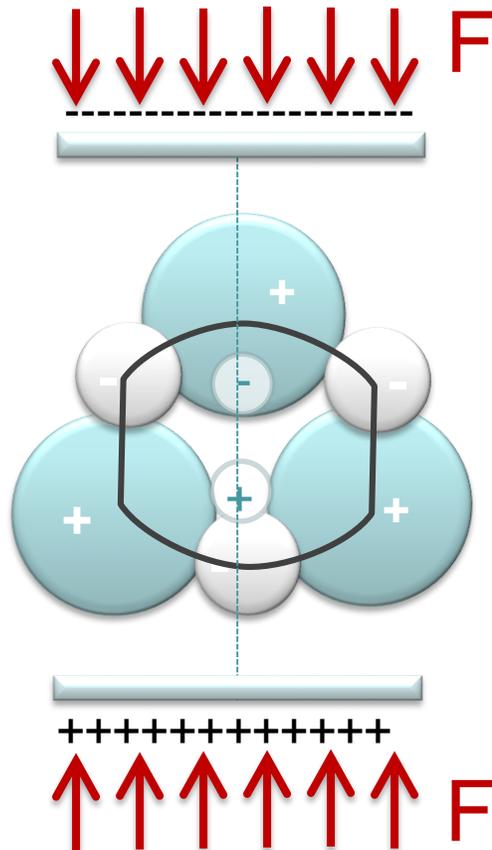
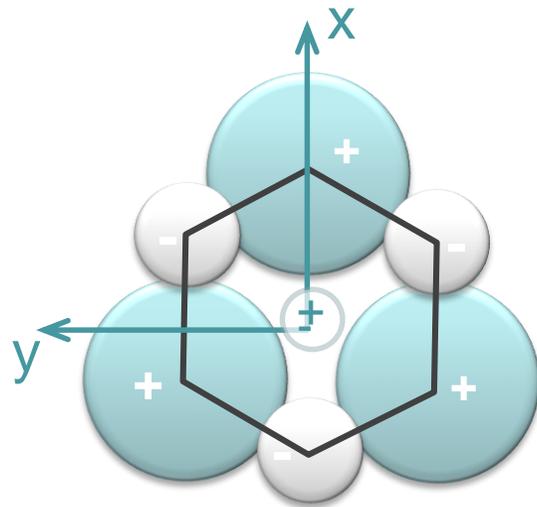
Elétrico → Mecânico





Quando a célula está neutra (sem tensão mecânica), a posição espacial do centro de cargas negativas é a mesma do centro de cargas positivas. Porém, quando aplicamos uma tensão mecânica, a célula unitária sofre uma deformação deslocando a posição do centro de cargas negativas e criando uma diferença de potencial na célula unitária.

O material perde a sua função *piezoelétrica* à temperatura de Curie - o ponto em que a polarização desaparece.





Na natureza encontramos alguns cristais que possuem este comportamento....



É possível também, produzir materiais que terão o mesmo comportamento: as cerâmicas piezoelétricas. Uma das vantagens na fabricação destas cerâmicas é a variedade de formas e tamanhos possíveis



- Em condições de pequenos campos de deformação, as relações constitutivas de um material piezelétrico são (IEEE Standard, 1987):

$$D_i = \boxed{e_{ij}^\sigma E_j} + \boxed{d_{im}^d \sigma_m}$$

Elétrica Direta

$$\varepsilon_k = \boxed{d_{jk}^c E_j} + \boxed{s_{km}^E \sigma_m}$$

Inversa Mecânica

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D} \\ \boldsymbol{\varepsilon} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}^\sigma & \mathbf{d}^d \\ \mathbf{d}^c & \mathbf{s}^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \boldsymbol{\sigma} \end{bmatrix}$$

$D_{3 \times 1}$

$\varepsilon_{6 \times 1}$

$\sigma_{m \ 6 \times 1}$

$e_{3 \times 3}^\sigma$

$d_{3 \times 6}^d = (d^c)^T$

$s_{6 \times 6}^E$

$E_{6 \times 6}$

deslocamento dielétrico [C/m^2]

vetor de deformações adimensional

vetor de tensões [N/m^2]

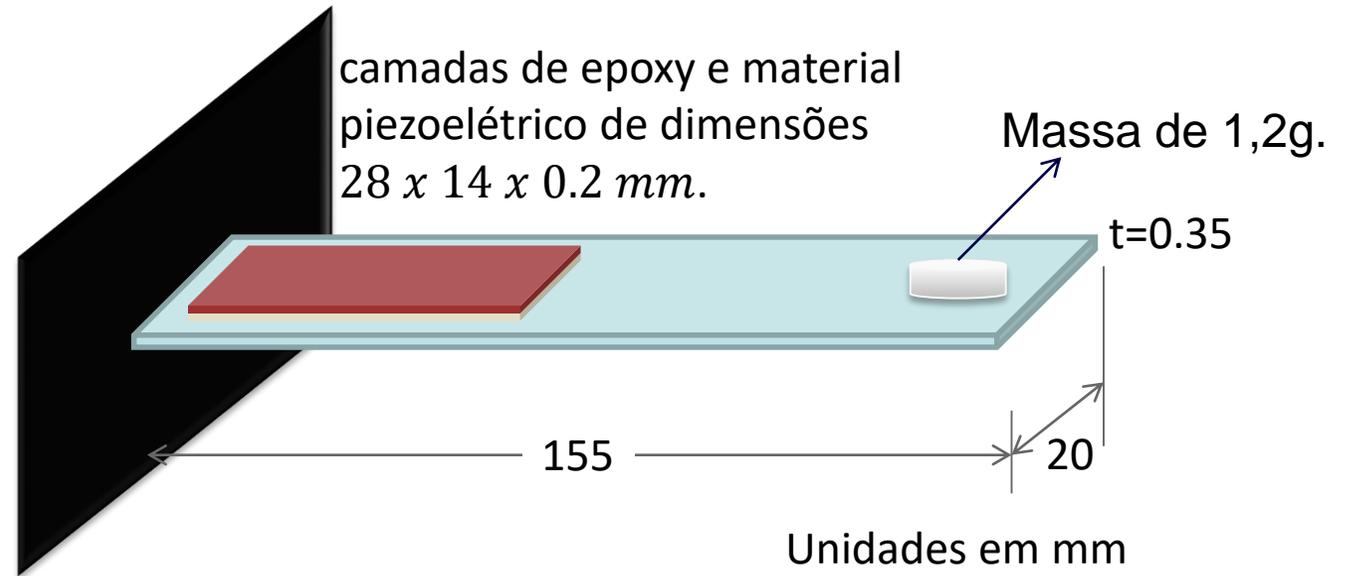
permissividade dielétrica [F/m]

coeficientes de acoplamento piezoelétrico [C/N] ou [m/V]

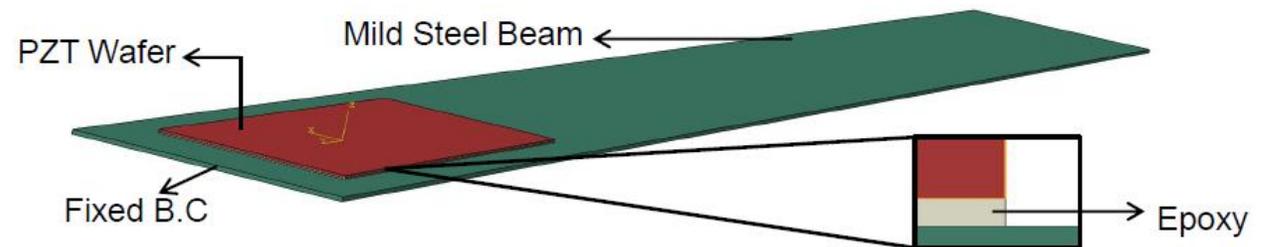
matriz de flexibilidade [m^2/N]

campo elétrico [V/m]

Vamos analisar, cuja geometria está mostrados na figura ao lado. Para isso, usaremos o software comercial de elementos finitos Abaqus®.



Extraído de: Anand, Arockiarajan, *Vibration Harvesting using PZT wafers*, Conference on Smart Materials & Structures, 2015.

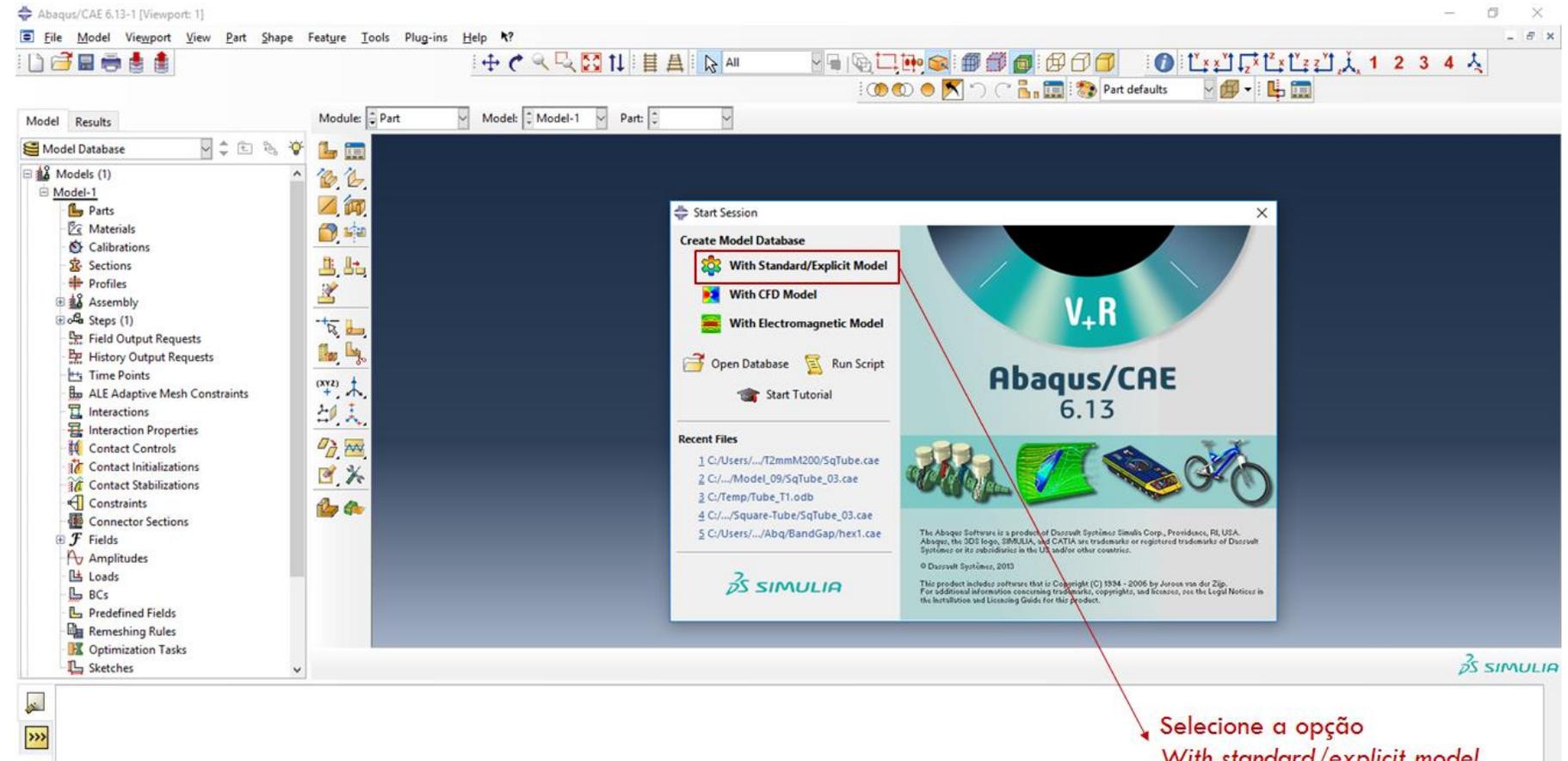




Procure em sua área de trabalho o ícone do Abaqus.



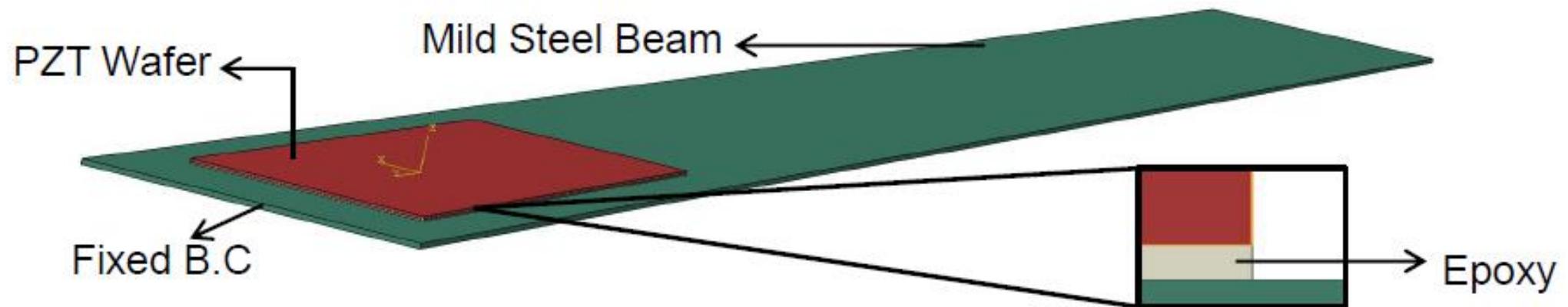
Haverá verificação de licença e depois a seguinte janela se abre:





- Você irá fazer o tutorial construir o diagrama de Bode de uma viga de aço $155 \times 20 \text{ mm}^2$, espessura de 0.35 mm , engastada em uma extremidade e livre na outra. Na extremidade livre é fixada uma placa piezoelétrica de dimensões $28 \times 14 \times 0.2 \text{ mm}$ sobre uma camada de epoxy de $28 \times 14 \times 0.2 \text{ mm}$.
- Com o diagrama de Bode você pode analisar a frequência ótima para absorção de energia.

AVISO: não existe um sistema pré-definido de unidades dentro do *Abaqus*. Portanto, o usuário é responsável por garantir que valores corretos (coerentes!) sejam especificados. Sempre que possível, use unidades SI.





PARTE	MATERIAL	PROPRIEDADE	VALOR	UNIDADE
BEAM	Steel	Densidade	7798	Kg/m^3
		Módulo de Young	210	GPa
		Poisson	0.3	---
EPOXY	Epoxy	Densidade	2200	Kg/m^3
		Módulo de Young	0.1	GPa
		Poisson	0.38	---
PIEZO	Piezoelétrico	Densidade	7800	Kg/m^3
		Módulo de Young	70	GPa
		Poisson	0.3	---
		acoplamento piezoelétrico	$d_{31} = -171$ $d_{33} = 274$	$p m/V$
		permissividade dielétrica relativa	$e_{11} = 0.153$ $e_{22} = 0.153$ $e_{33} = 0.150$	$n F/m$

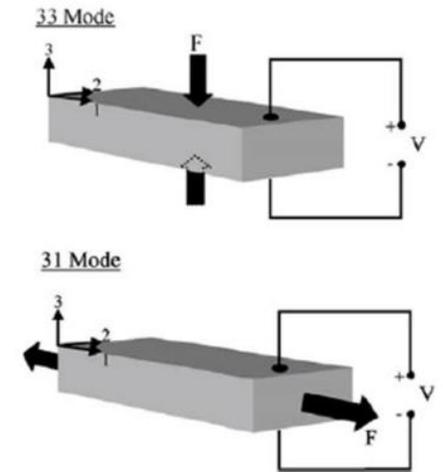
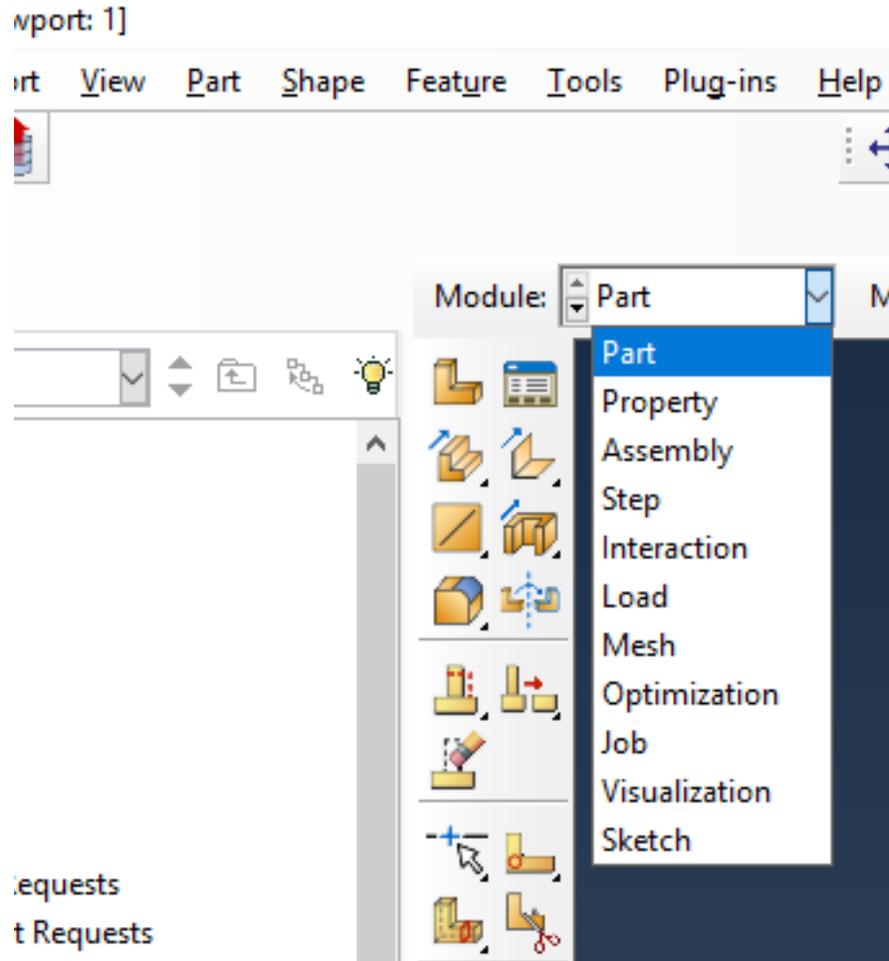
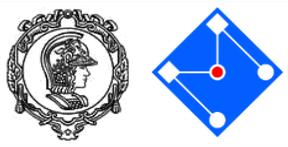


Illustration of -33 mode and -31 mode operation for piezoelectric materials. (Figure from Roundy *et al* 2003, © 2003, Elsevier.)

The background of the slide features a dark blue gradient with several out-of-focus, glowing blue circles of varying sizes, creating a bokeh effect. The text is centered horizontally and vertically within this area.

Construção do modelo: Pré processamento



Passaremos pelos itens:

Part: desenho da geometria

Property: material e seção transversal

Assembly: Unir as partes

Step: Carregamento

Interaction: definição de contato

Load: definição de carregamento e condições de contorno

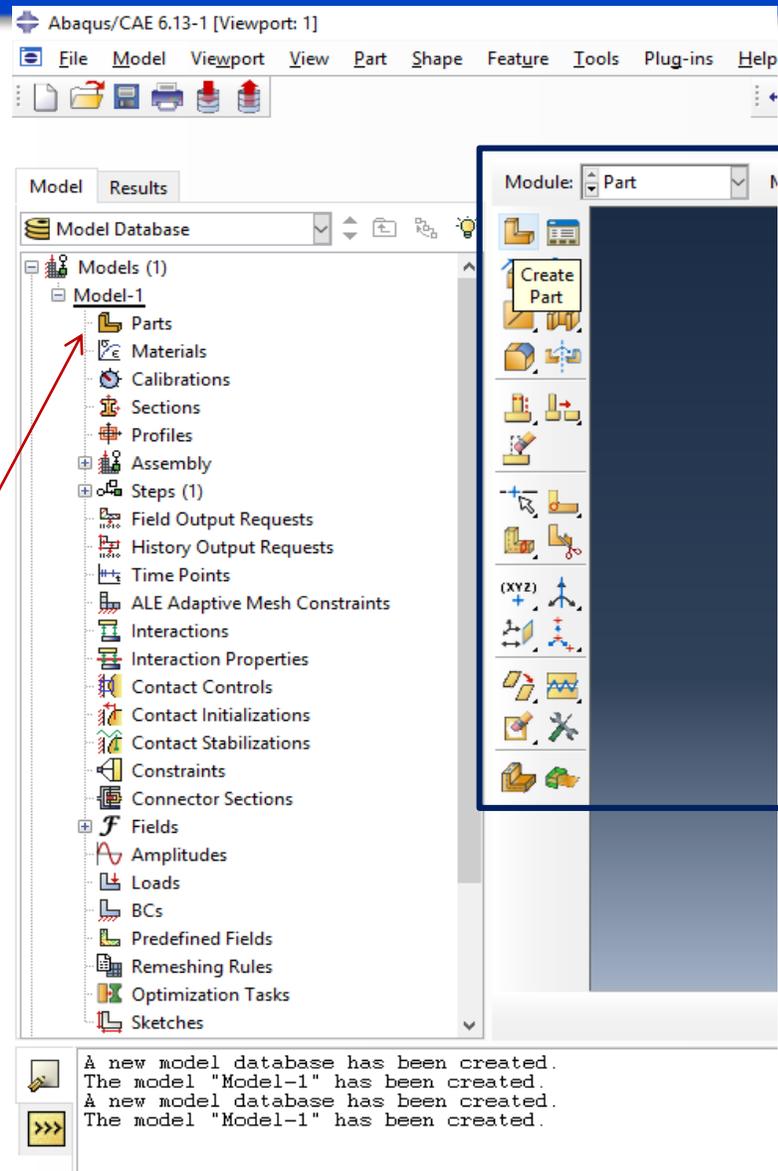
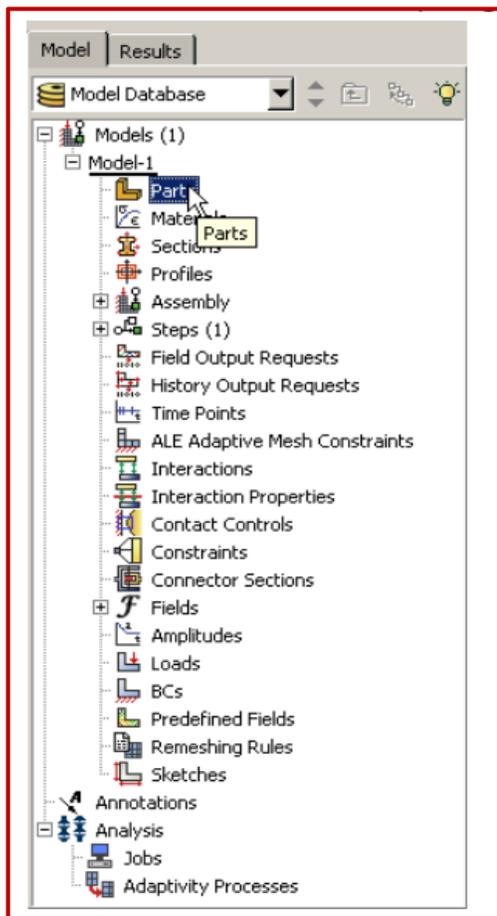
Mesh: malha de elementos finitos

Job: rodar o programa

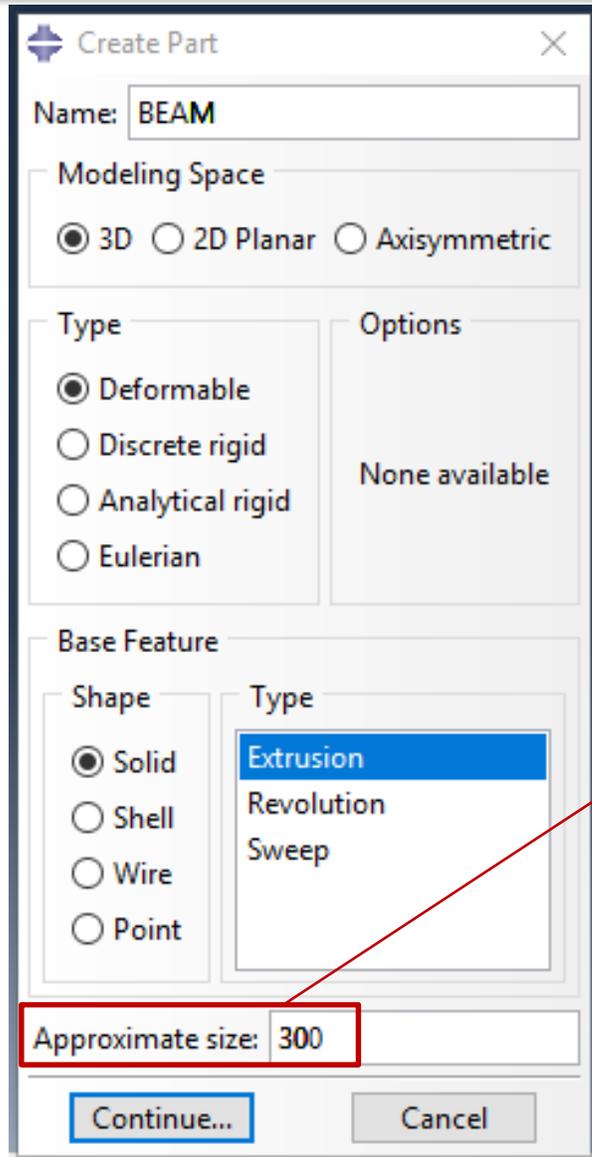
Visualization: ver resultados



Na árvore do modelo, clique duas vezes em "Part" (ou clique com o botão direito em "Part" e selecione "Create").



Ou, ainda, selecione "Part" em "Module" e "Create Part" na caixa de ajuda ao lado da área de trabalho (chamada de *Viewport* pelo Abaqus).

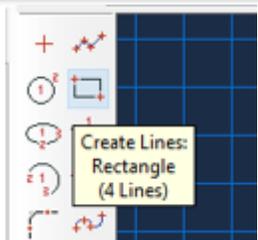


Nomeie a parte **Beam**.

Selecione as configurações um corpo tridimensional (Modeling space 3D) deformável (type deformable) a partir de um sólido extrudado (shape Solid e type Extrusion).

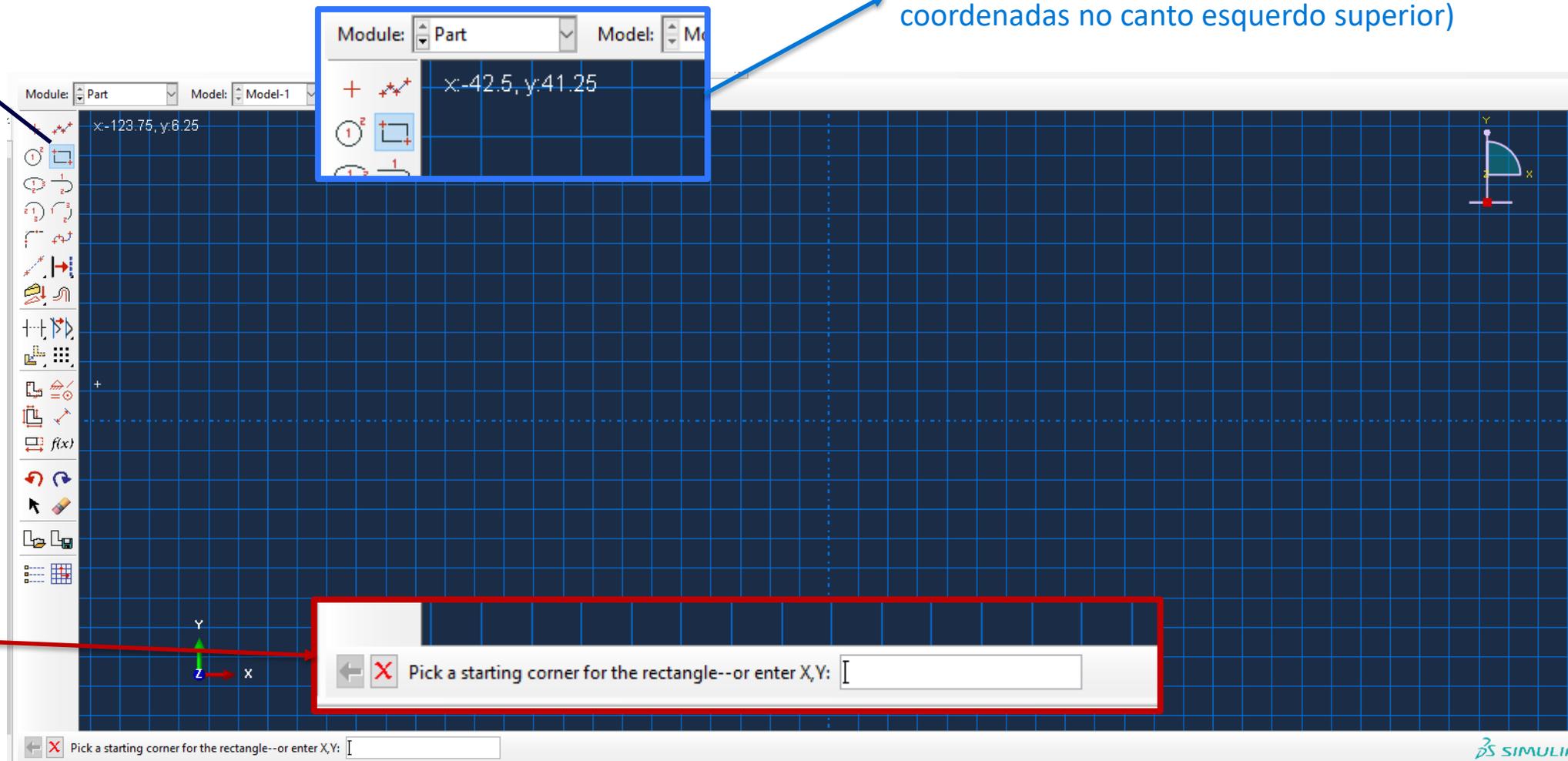
Approximate size: coloque 300 (Não é importante, determina o tamanho da grade a ser exibida).
Clique "Continue..." e se abrirá a janela de "sketch"

Clique Continue e aparecerá a janela de Sketch



A caixa de comandos para desenhar a geometria é intuitiva.
Use a opção de retângulo.

Você pode usar o grid e o mouse (veja coordenadas no canto esquerdo superior)



Você pode digitar as coordenadas (veja barra de comandos no canto esquerdo inferior da viewport)



Desenhe a geometria mostrada na figura, 155×0.35 . O grid facilita seu desenho. Não há necessidade de colocar as cotas (estão aqui por motivos didáticos), basta desenhar o retângulo (a profundidade será definida por extrusão).

Module: Part Model: Model-1 Part:

Pick a starting corner for the rectangle--or enter X,Y: -77.5,0.175

Pick the opposite corner for the rectangle--or enter X,Y: 77.5,-0.175

H 155.

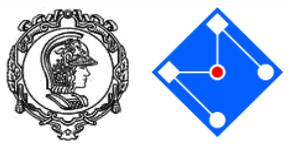
0.35

Y
Z X

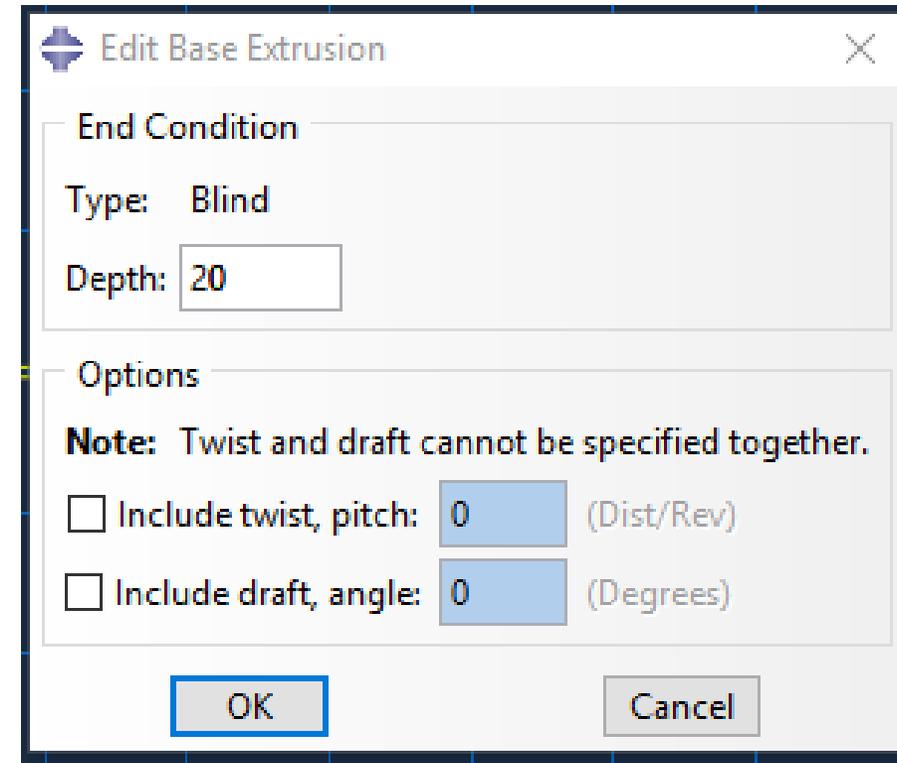
Sketch the section for the solid extrusion Done

Quando terminar clique "Done"

SIMULIA



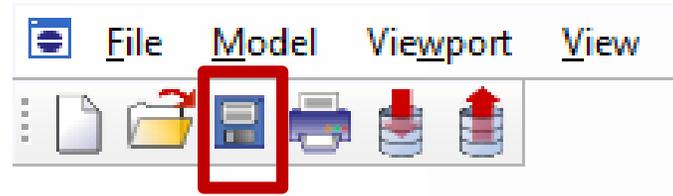
Como você está criando uma parte extrudada, ABAQUS/CAE exibe um campo de texto na área de prompt solicitando que você defina a distância a que o esboço deve ser extrudado. No campo de texto, em *Depth*, apague o valor padrão e digite um valor de 20. Pressione [OK].



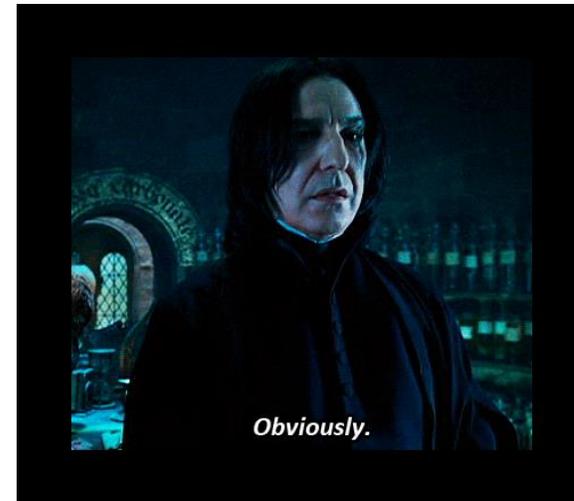


Este é seu modelo até o momento. Essa geometria não tem material nem seção. Primeiro definiremos as outras partes (PIEZO e EPOXI) e depois as propriedades de cada parte. Esses são nossos próximos passos.



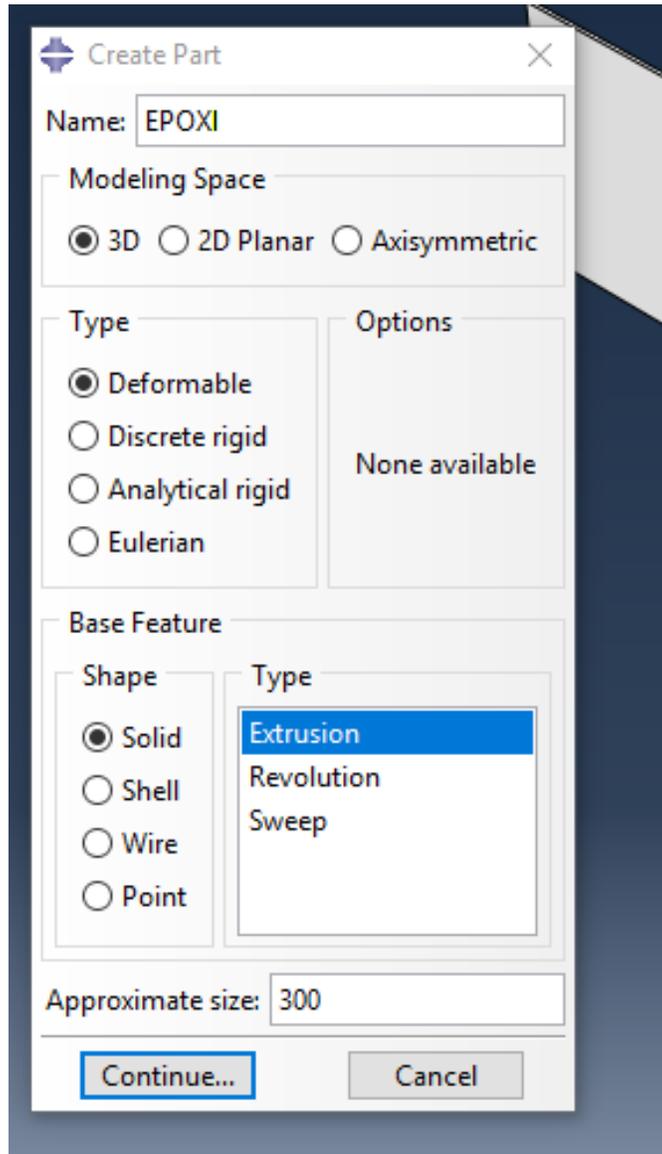


Não precisamos lembrar você de salvar o modelo de vez em quando, obviamente...

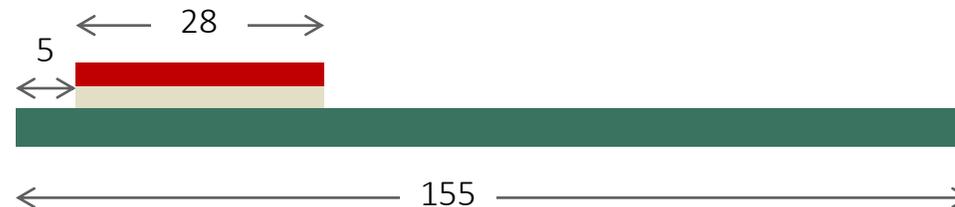




Agora, você deve repetir o procedimento para as partes:
EPOXI...



Para evitar futuro trabalho,
desenhe o EPOXI (e o PIEZO) na
posição correta (no grid), em
relação à viga desenhada
anteriormente!

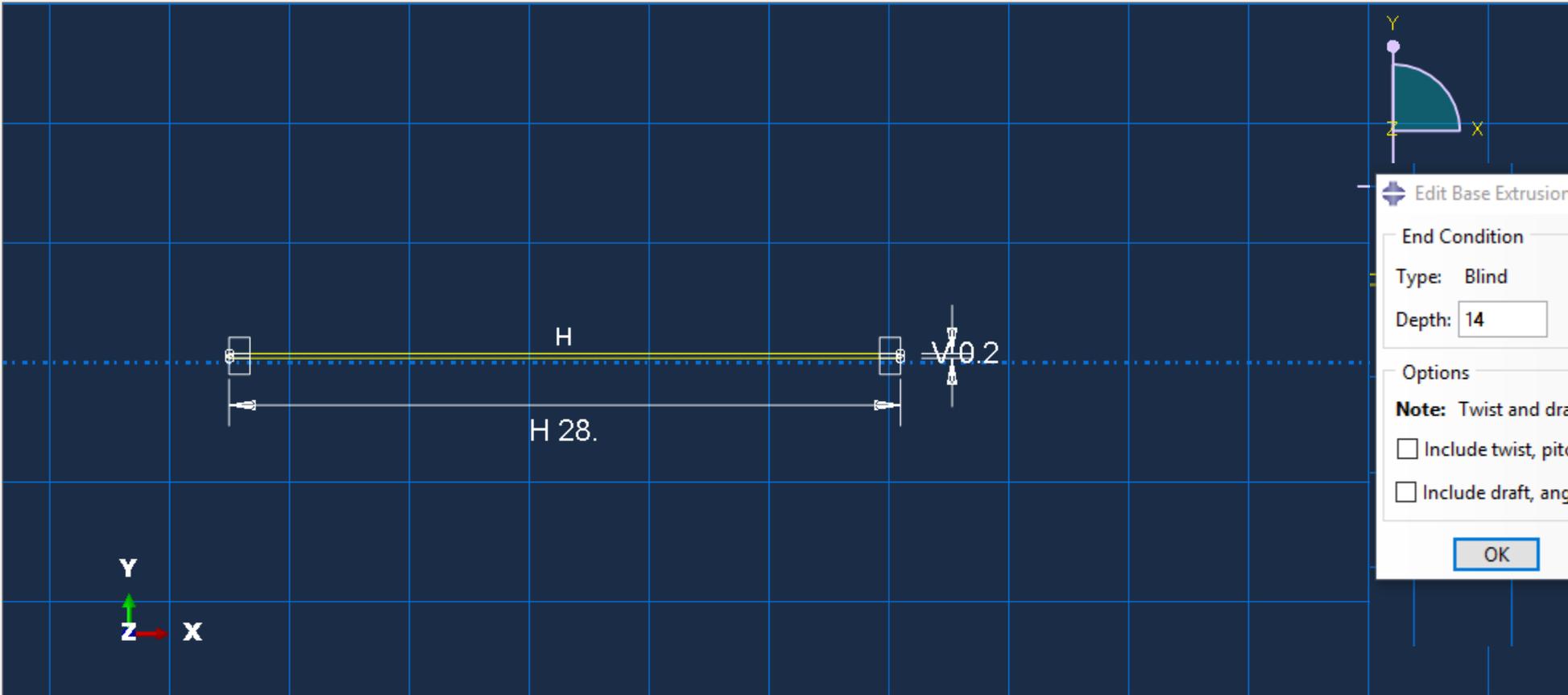




← X Pick a starting corner for the rectangle--or enter X,Y: -72.5,0.375

← X Pick the opposite corner for the rectangle--or enter X,Y: -44.5,0.175

Module: Part Model: Model-1 Part:



Edit Base Extrusion

End Condition

Type: Blind

Depth: 14

Options

Note: Twist and draft cannot be specified together.

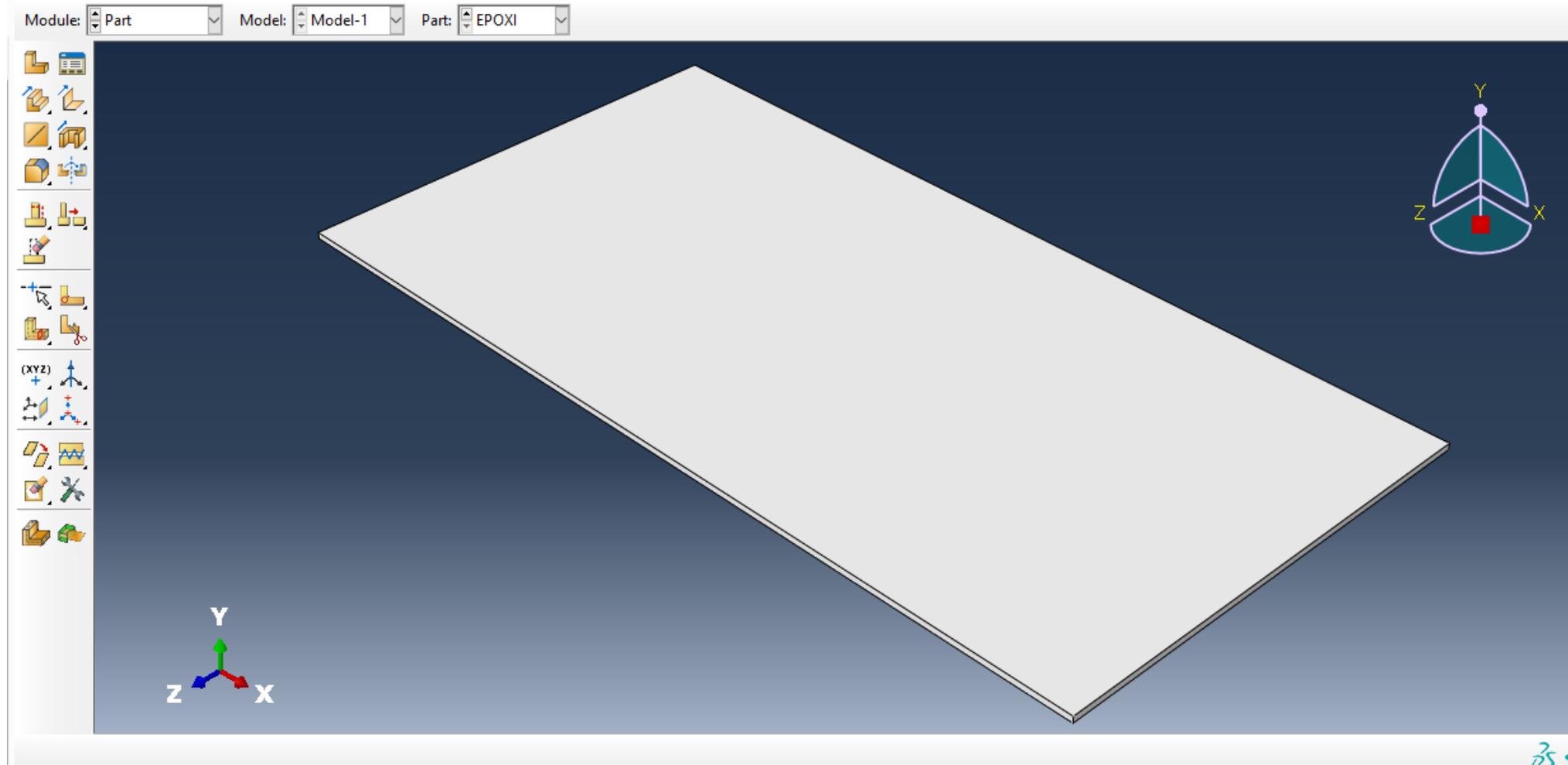
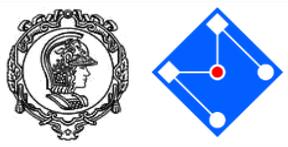
Include twist, pitch: 0 (Dist/Rev)

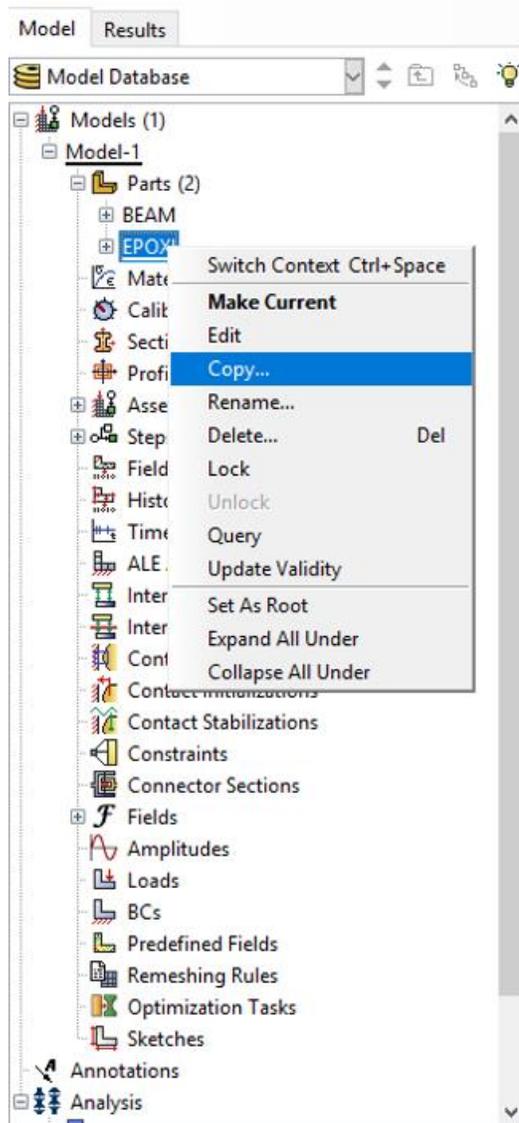
Include draft, angle: 0 (Degrees)

OK Cancel

← X Sketch the section for the solid extrusion Done



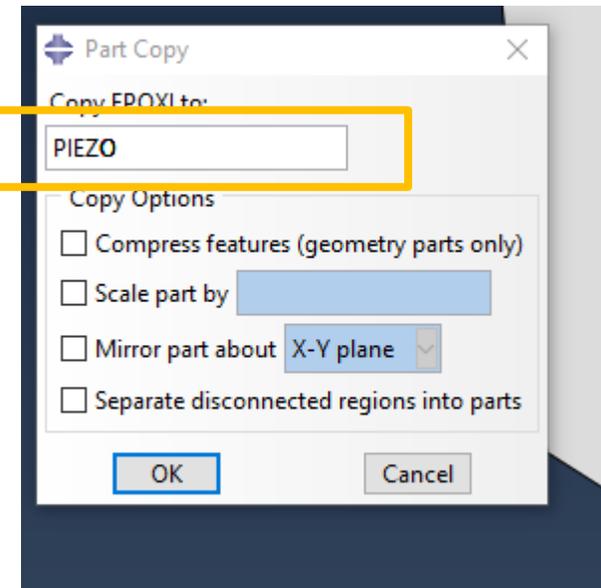




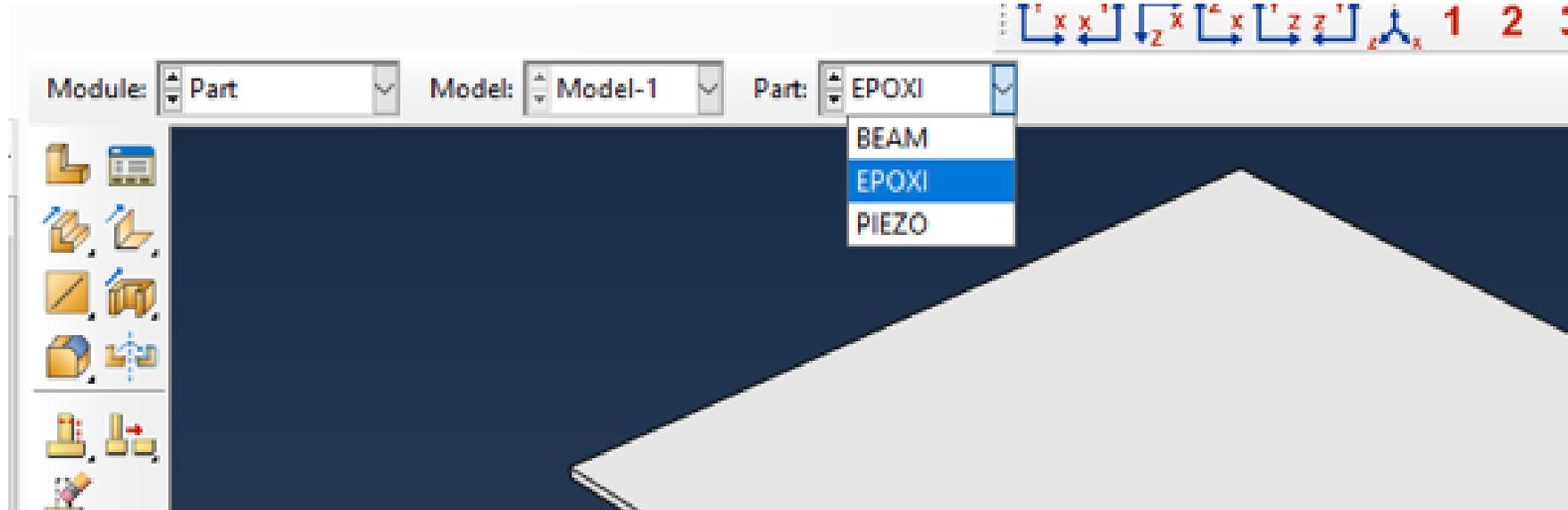
Agora a parte PIEZO. Como esta parte possui as mesmas dimensões da parte EPOXI, vamos fazer uma cópia da parte:

Na árvore, selecione a parte EPOXI, clique com o botão direito e selecione “Copy...”

Dê um novo nome



Você pode ver cada parte separadamente,

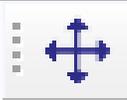


Obviamente, a geometria do PIEZO ficou sobreposta à geometria do EPOXI, resolveremos isso mais tarde...



Várias ferramentas estão disponíveis na barra de ferramentas para ajudá-lo a examinar seu modelo.

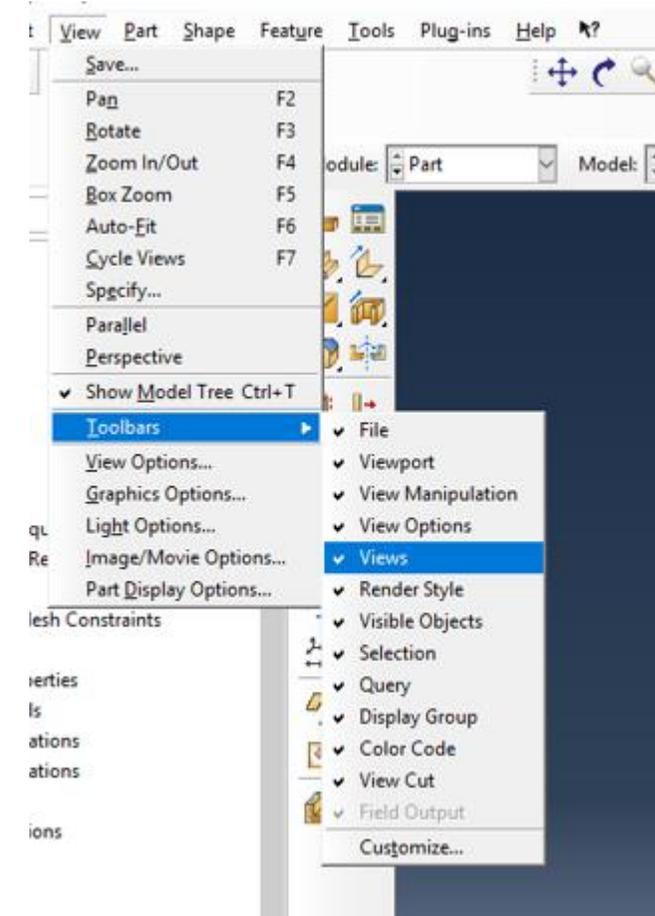


-  Pan view
-  Rotate view
-  Magnify view
-  Toolbox view
-  Autofit view

Você pode deixar mais fáceis alguns outros ícones importantes:



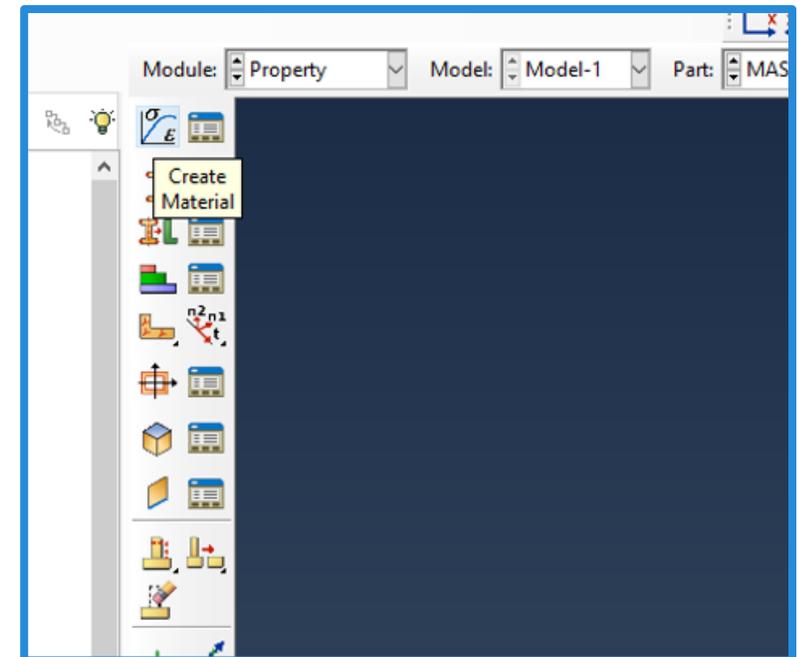
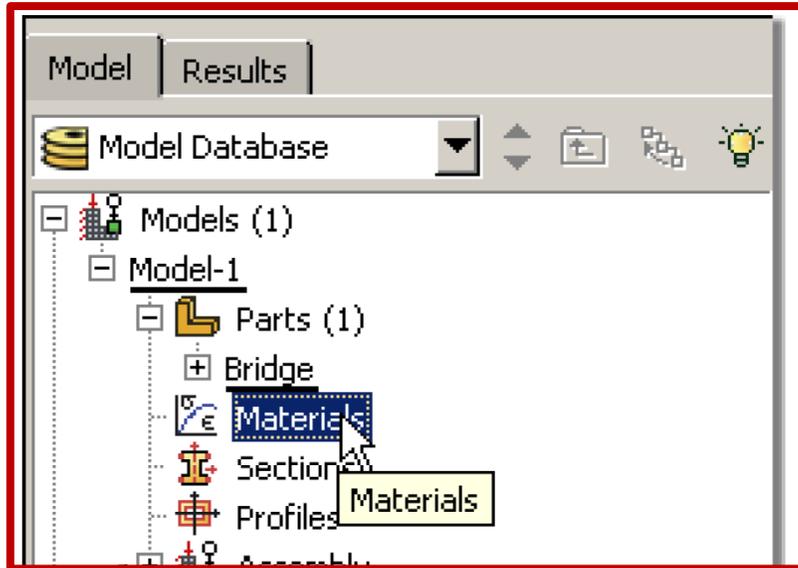
Basta ir em View/Toolbars e clicar na opção Views:

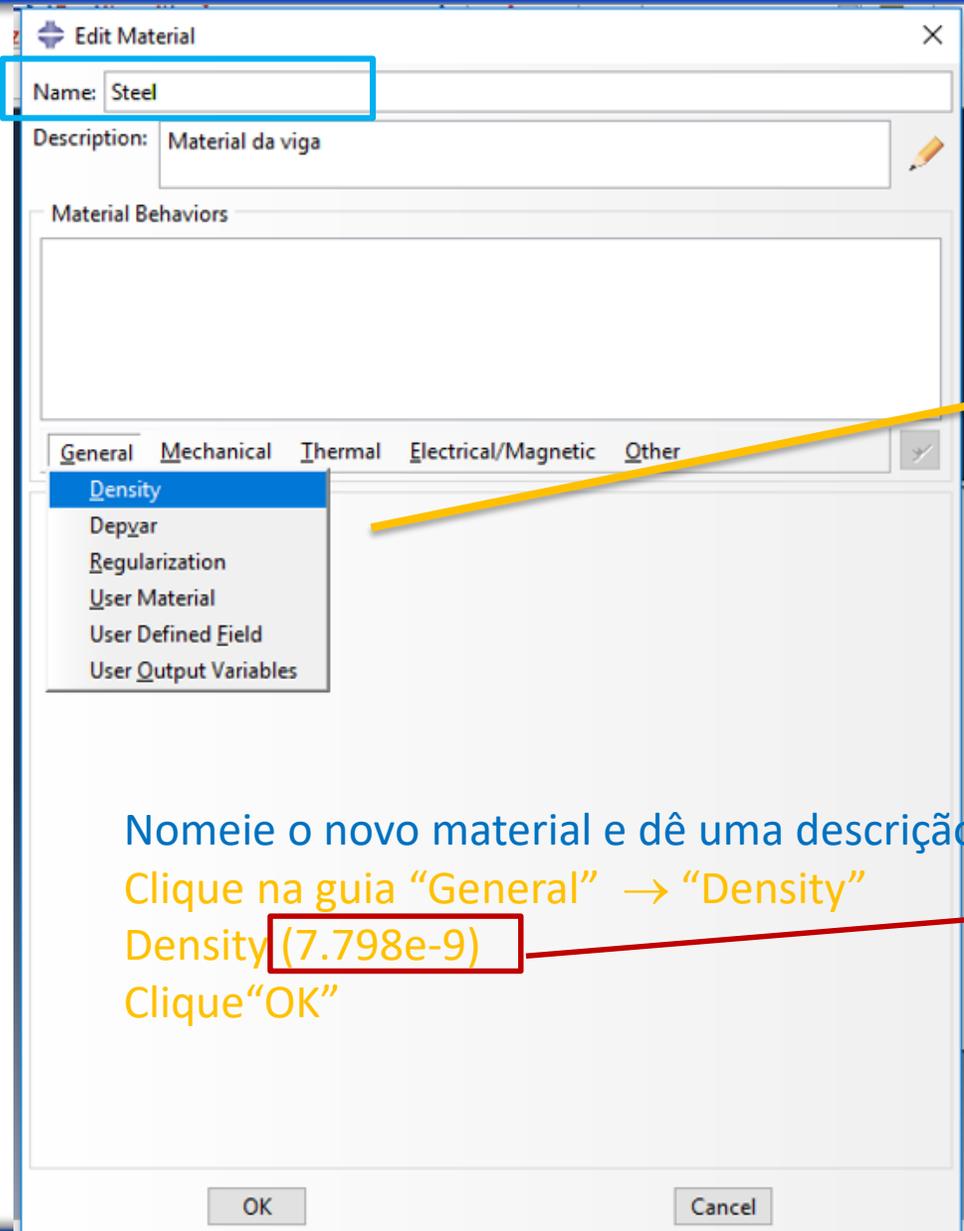


Experimente com cada uma dessas ferramentas até ficar confortável com elas.

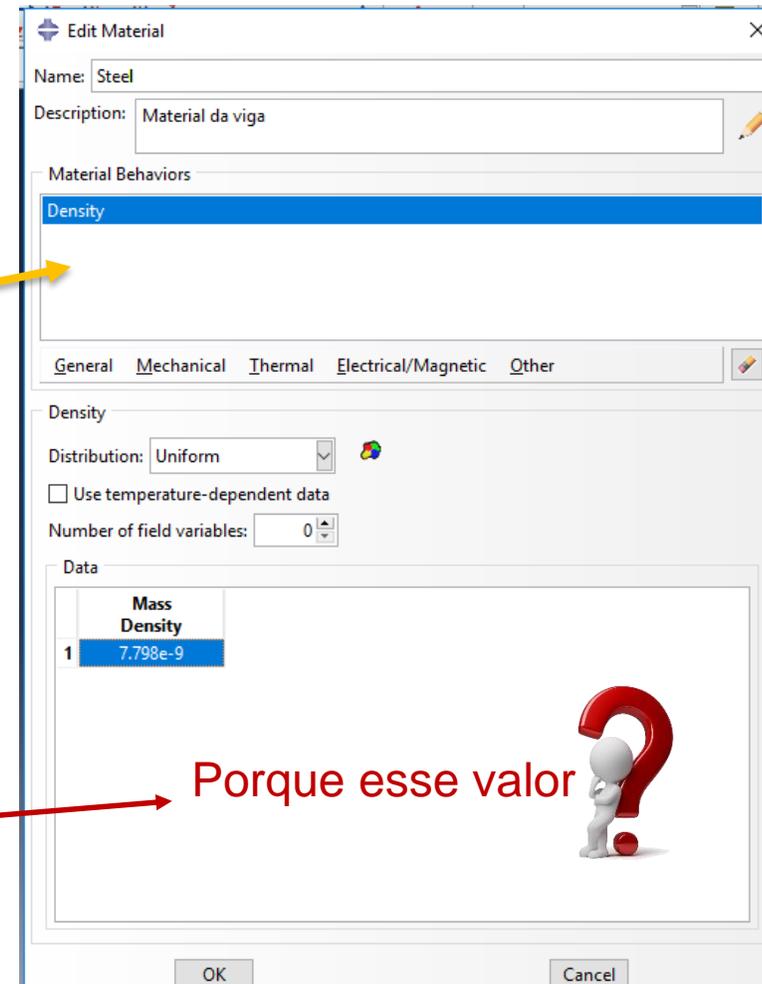
Definição do material de cada parte

Clique duas vezes em "Materials" na árvore ou, ainda, em "Module" selecione "Property" e "Create Materials" na caixa de ajuda ao lado da *Viewport*.





Nomeie o novo material e dê uma descrição (Steel);
Clique na guia "General" → "Density"
Density (7.798e-9)
Clique "OK"



Porque esse valor



Materiais elástico lineares: deve-se definir densidade, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.



Edit Material

Name: Steel

Description: Material da viga

Material Behaviors

Density

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Elasticity ▶ Elastic

Plasticity ▶ Hyperelastic

Damage for Ductile Metals ▶ Hyperfoam

Damage for Traction Separation Laws ▶ Low Density Foam

Damage for Fiber-Reinforced Composites ▶ Hypoelastic

Damage for Elastomers ▶ Porous Elastic

Deformation Plasticity

Viscoelastic

Damping

Expansion

Brittle Cracking

Egs

Viscosity

Edit Material

Name: Steel

Description: Material da viga

Material Behaviors

Density

Elastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Elastic

Type: Isotropic

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term

No compression

No tension

Data

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	210000	0.3

OK Cancel

Clique na guia "Mechanical" → "Elasticity" → "Elastic"
Definir o Módulo de Young (210000) e Coeficiente de Poisson (0.3)



Repete-se o procedimento para o material da parte EPOXI (veja tabela em slides anteriores para densidade, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson)

The screenshot shows the 'Edit Material' dialog box with the following details:

- Name:** Epoxi
- Description:** (empty text box)
- Material Behaviors:** A list with 'Density' selected (highlighted in blue) and 'Elastic' below it.
- General | Mechanical | Thermal | Electrical/Magnetic | Other:** A set of tabs with 'General' selected.
- Density Section:**
 - Distribution:** Uniform (dropdown menu)
 - Use temperature-dependent data
 - Number of field variables:** 0 (spin box)
- Data Table:**

	Mass Density
1	2.2E-009
- Buttons:** OK and Cancel at the bottom.



Características elásticas

Edit Material

Name: Piezo

Description:

Material Behaviors

- Density
- Elastic**

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Elastic

Type: Isotropic

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term

No compression

No tension

Data

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	70000	0.3

OK Cancel

Permissividade

Edit Material

Name: Piezo

Description:

Material Behaviors

- Density
- Elastic
- Dielectric (Electrical Permittivity)**

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Dielectric (Electrical Permittivity)

Type: Isotropic

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data

	Dielectric constant
1	0.153e-9

OK Cancel

Acoplamento

Edit Material

Name: Piezo

Description:

Material Behaviors

- Density
- Dielectric (Electrical Permittivity)
- Elastic
- Piezoelectric**

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Piezoelectric

Type: Stress

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data

	e2 11	e2 22	e2 33	e2 12
1	-1.71E-007	2.74E-007	-1.71E-007	0

OK Cancel

Veja explicação dos símbolos no próximo slide.

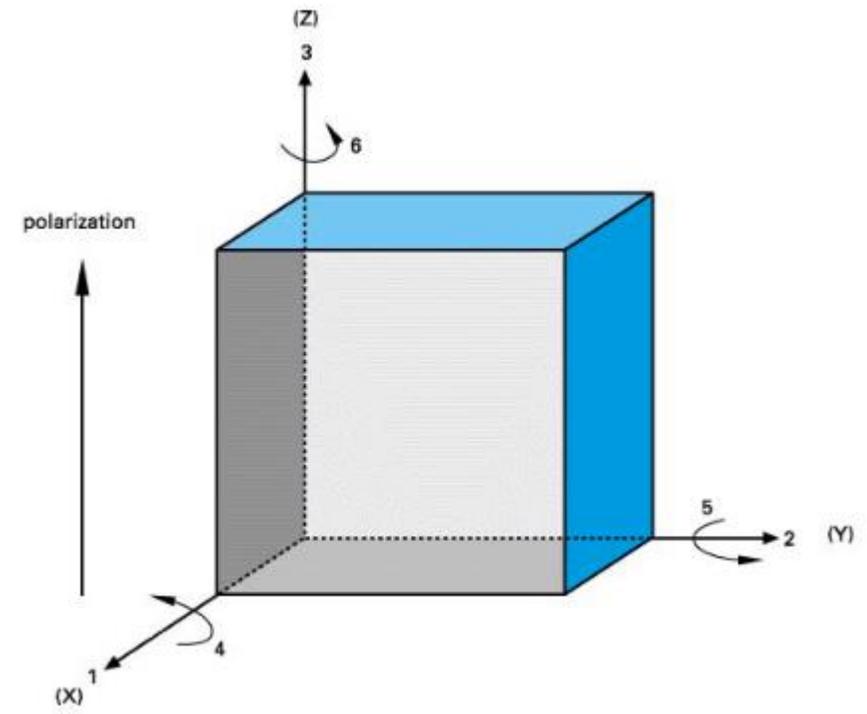


g	1	2	3
1	1	4	5
2	4	2	6
3	5	6	3

Por exemplo,

$$d_{312}$$

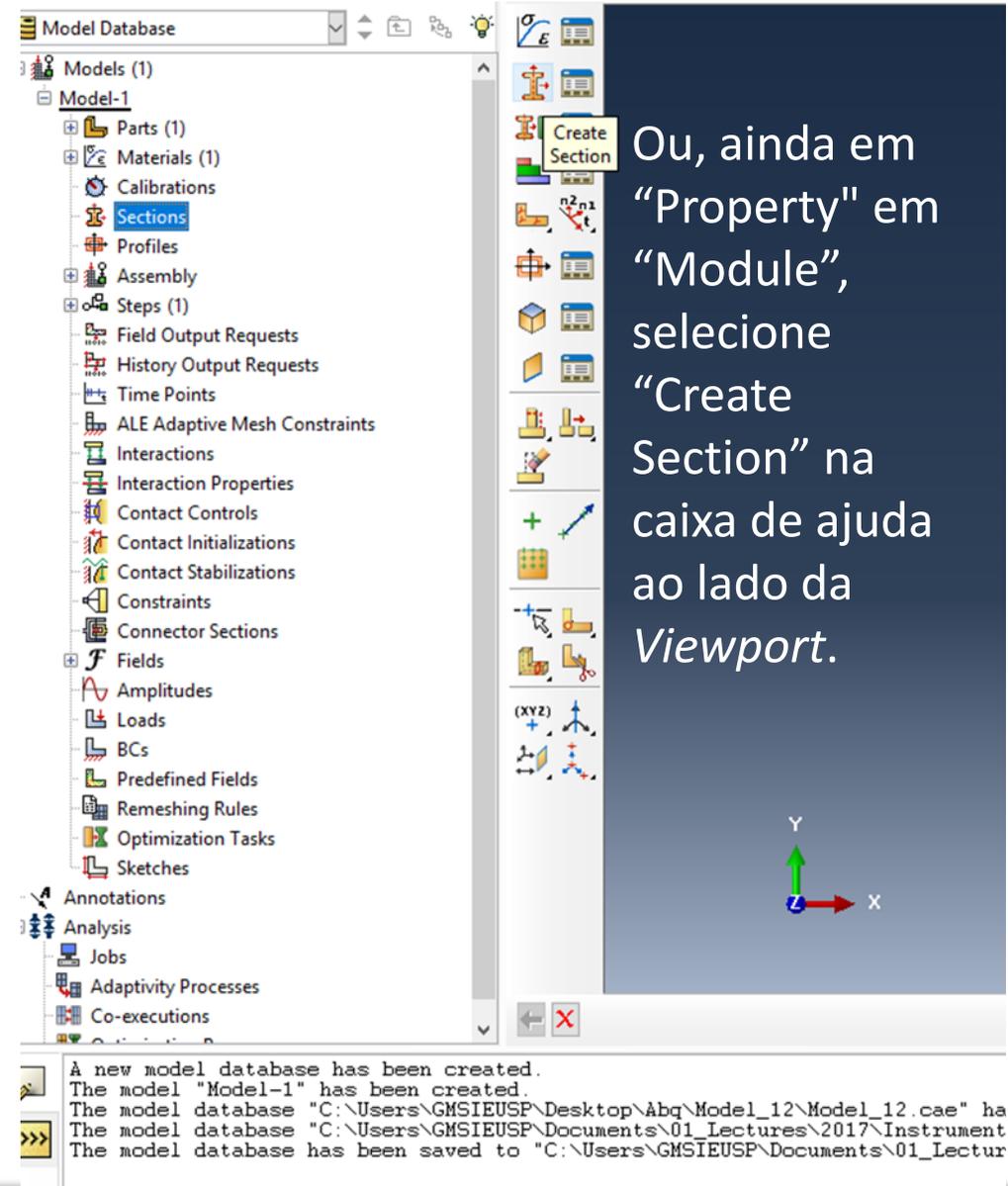
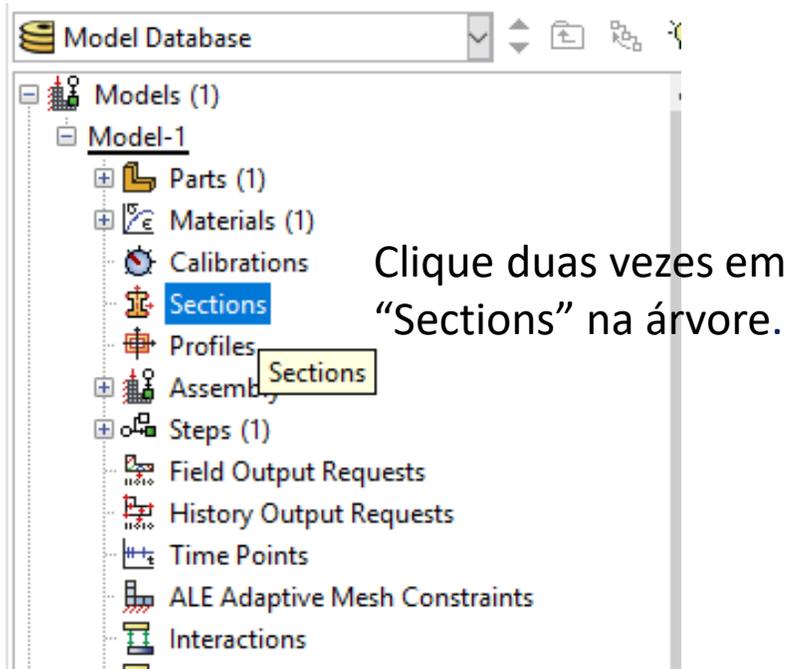
$$d_{34}$$

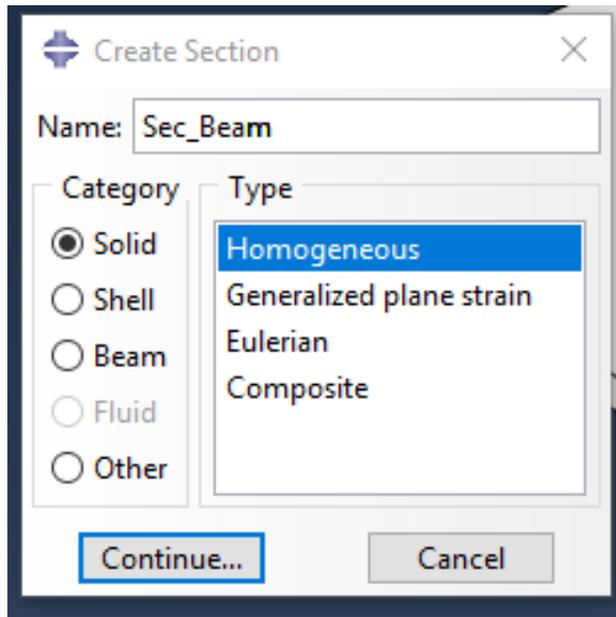


d_{34} aplica o campo elétrico ao longo da direção de polarização 3, mas as deformações ocorrem na direção 4.

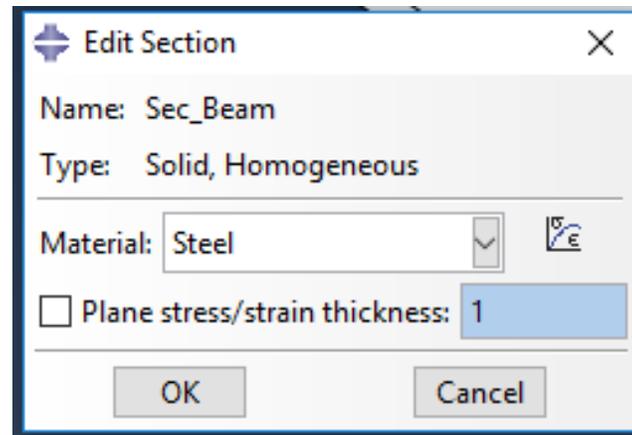


Definição da seção

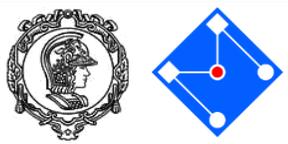




Dê um nome à seção, selecione “Solid” e “Homogeneous”. “Continue...” abrirá a janela abaixo.



Material “Steel”, demais parâmetros default. Clique “OK”.



Repita o procedimento para seções EPOXI e PIEZO

Edit Section [Close]

Name: Sec_Piezo

Type: Solid, Homogeneous

Material: Piezo [Dropdown] [Material Icon]

Plane stress/strain thickness: 1

[OK] [Cancel]

Edit Section [Close]

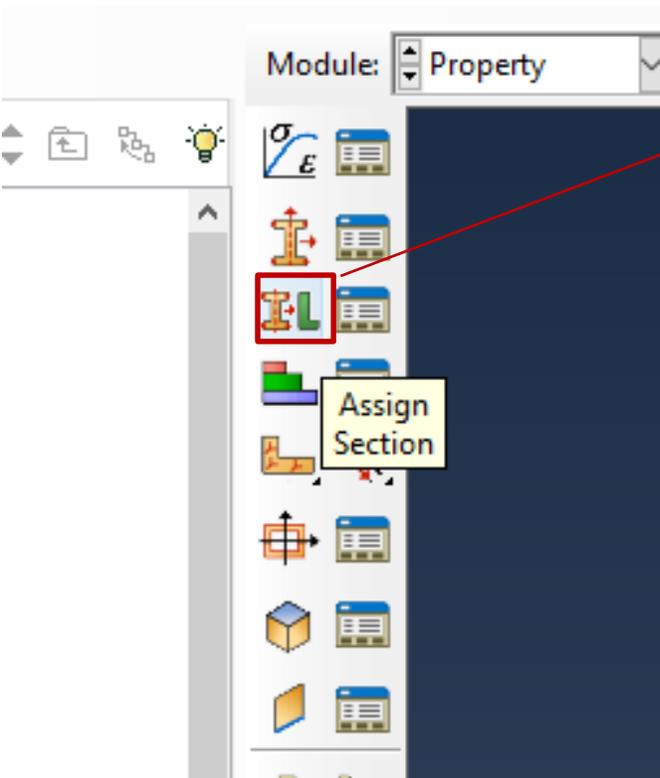
Name: Sec_Epoxi

Type: Solid, Homogeneous

Material: Epoxi [Dropdown] [Material Icon]

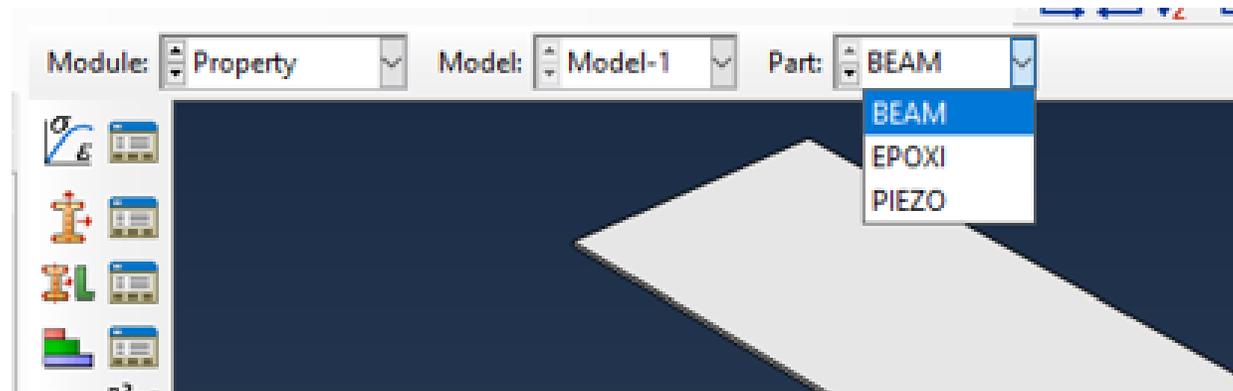
Plane stress/strain thickness: 1

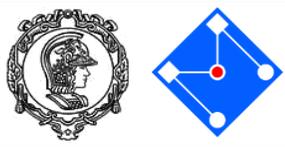
[OK] [Cancel]



Agora você deve atribuir propriedade à viga e demais partes que você desenhou!

Vamos começar com a viga. Selecione a Part: "BEAM"

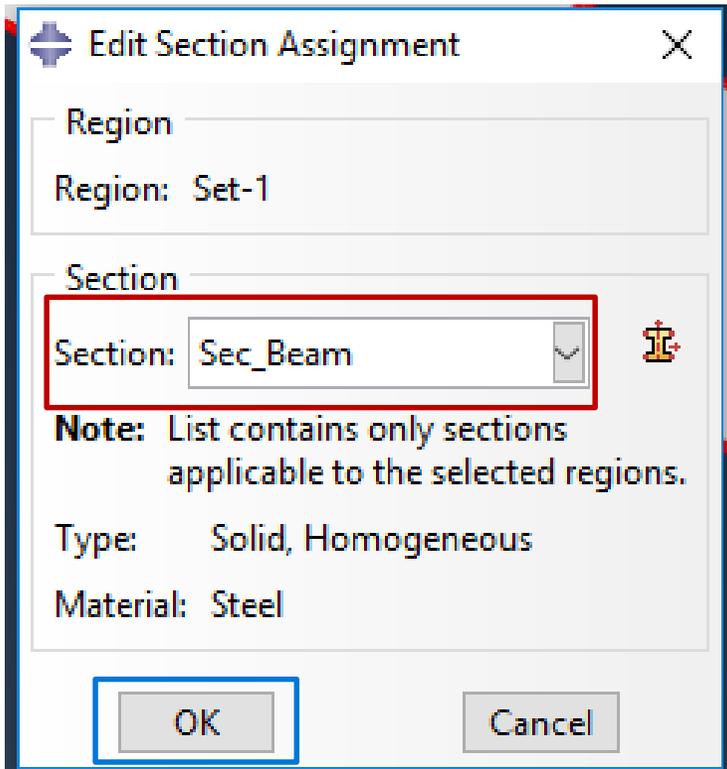




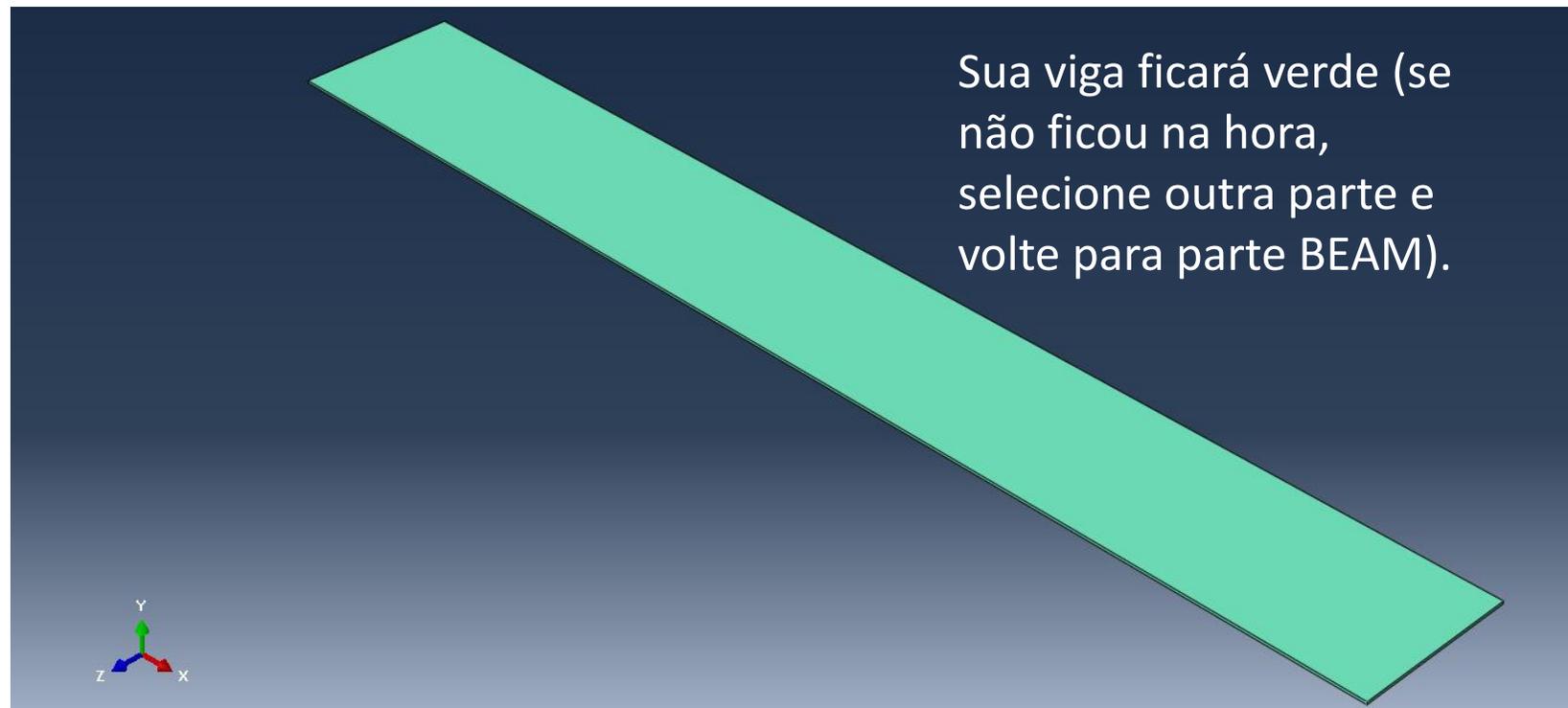
Module: Property Model: Model-1 Part: BEAM

Selecione a viga,
E clique em "Done"

Select the regions to be assigned a section (Create set: Set-1) Done

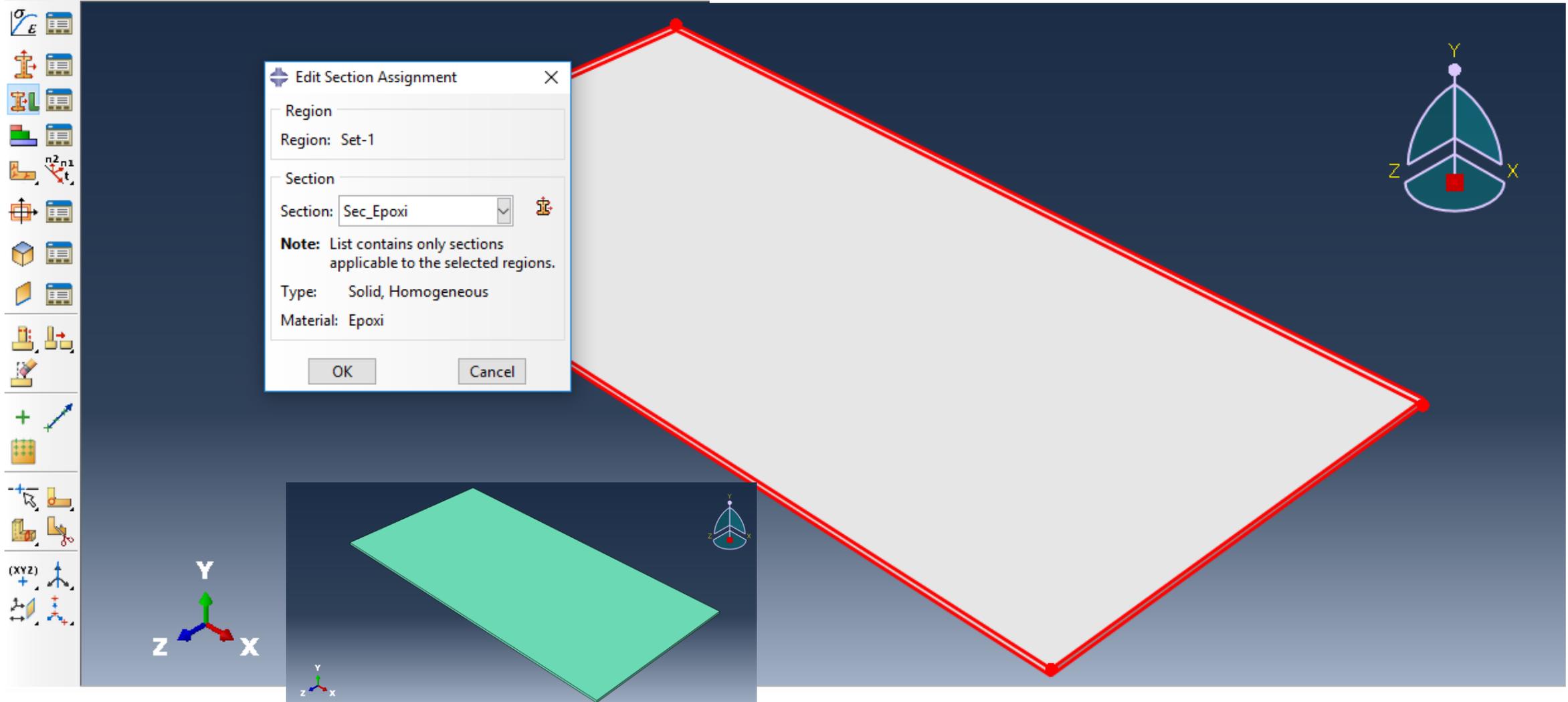


Clique no ícone  e selecione a seção “SecBeam” (inclui a geometria de sólido com material aço), depois **OK**.



Module: Property Model: Model-1 Part: EPOXI

Novamente, siga os mesmos passos para a EPOXI e PIEZO.



Edit Section Assignment

Region
Region: Set-1

Section
Section: Sec_Epoxi

Note: List contains only sections applicable to the selected regions.

Type: Solid, Homogeneous

Material: Epoxi

OK Cancel



Module: Property Model: Model-1 Part: PIEZO

Edit Section Assignment

Region: Set-1

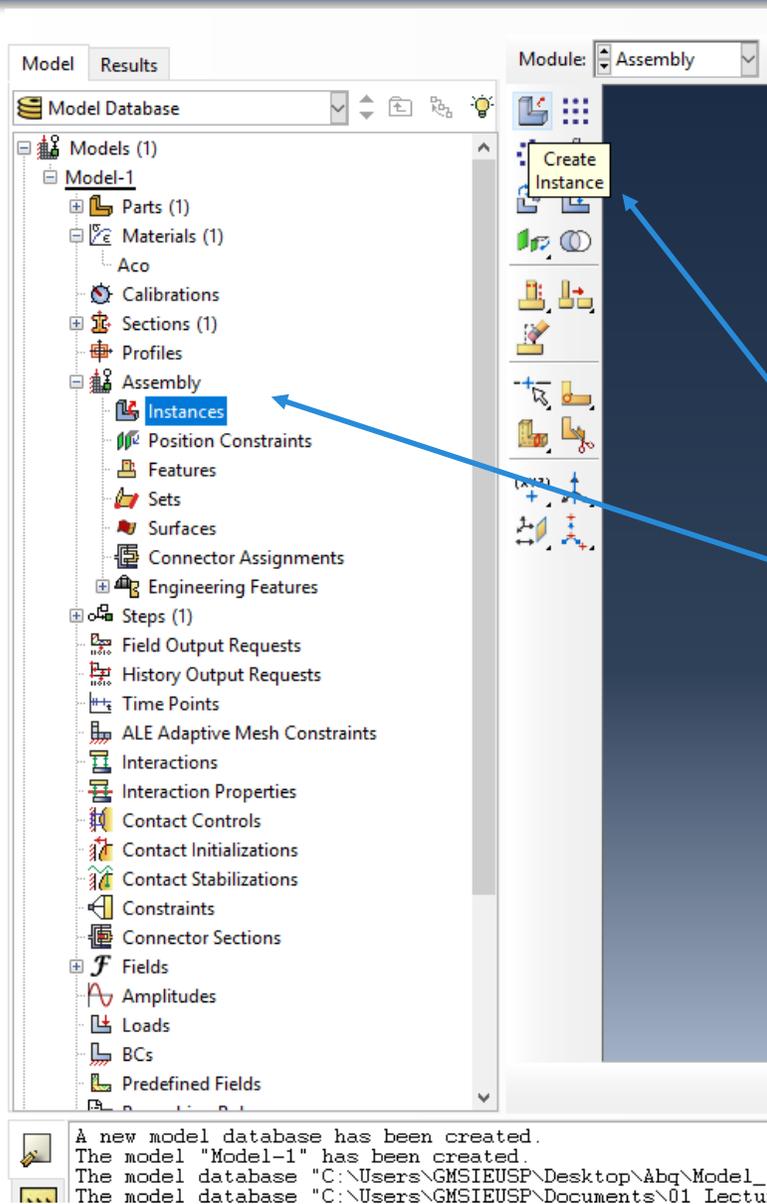
Section: Sec_Piezo

Note: List contains only sections applicable to the selected regions.

Type: Solid, Homogeneous

Material: Piezo

OK Cancel



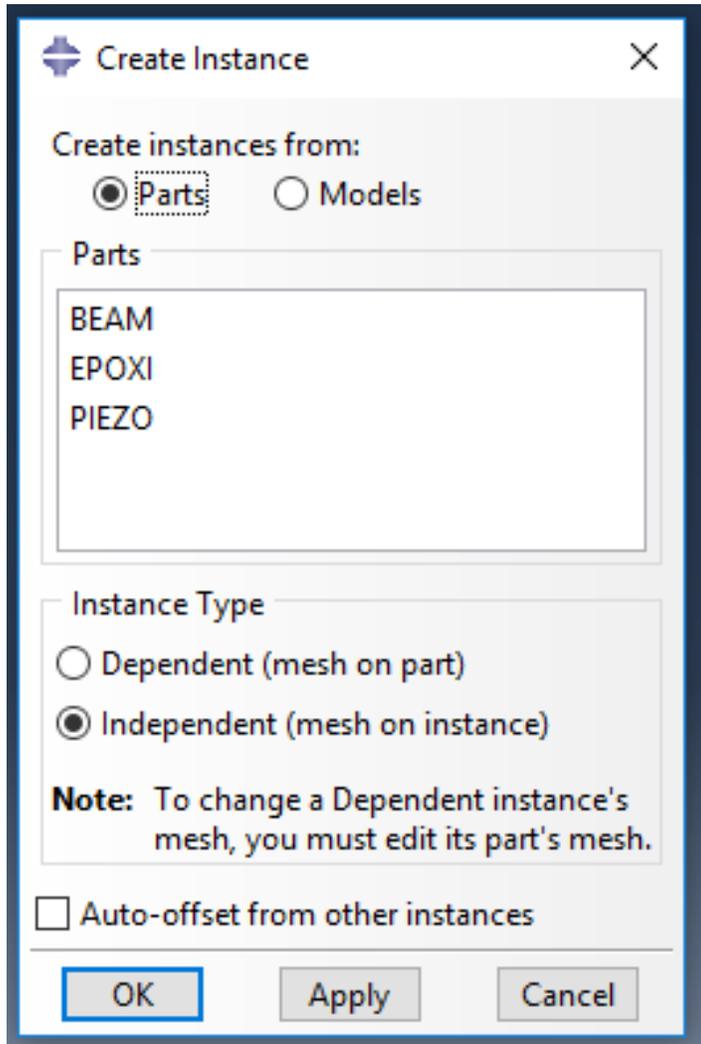
Observação importante: Esta etapa “Assembly” é muito importante quando o modelo é formado por várias *partes* (“Part”), e você deve uni-las para criar uma estrutura única.

Basta dar duplo clique em “Instances”, dentro de “Assembly” na árvore ou “Create Instance” no painel de ajuda no ViewPort.

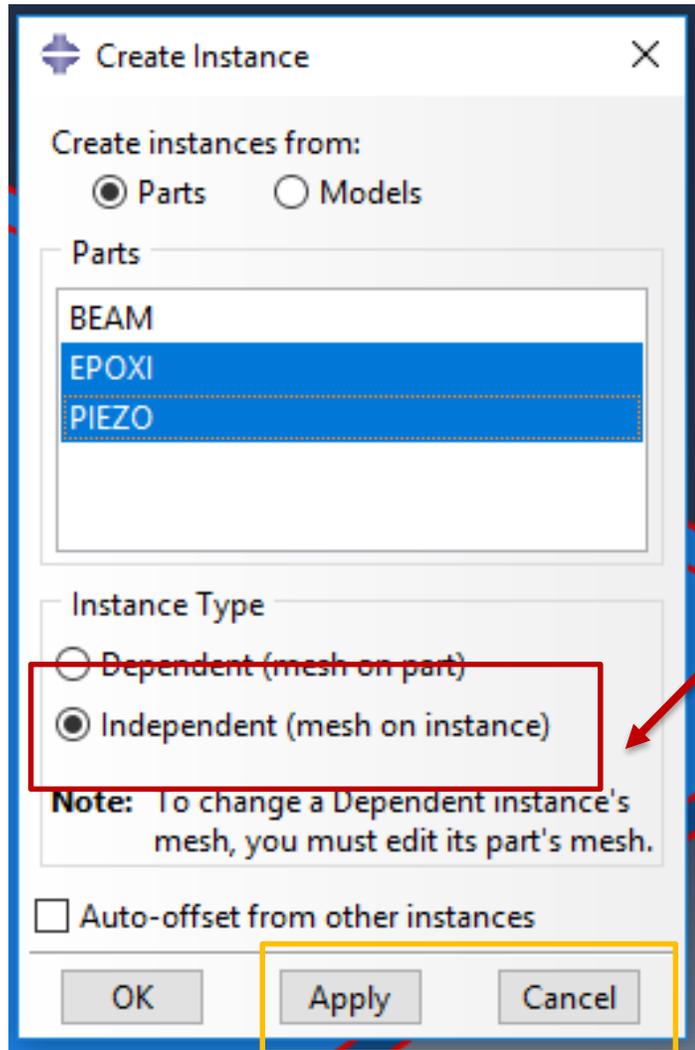
Próximos passos,

Vamos,

1. unir as partes EPOXI e PIEZO por meio do “Assembly”;
2. tirar a sobreposição em y dessas duas partes;
3. unir a viga às demais partes;
4. centralizar as partes EPOXI e PIEZO em relação à parte BEAM.



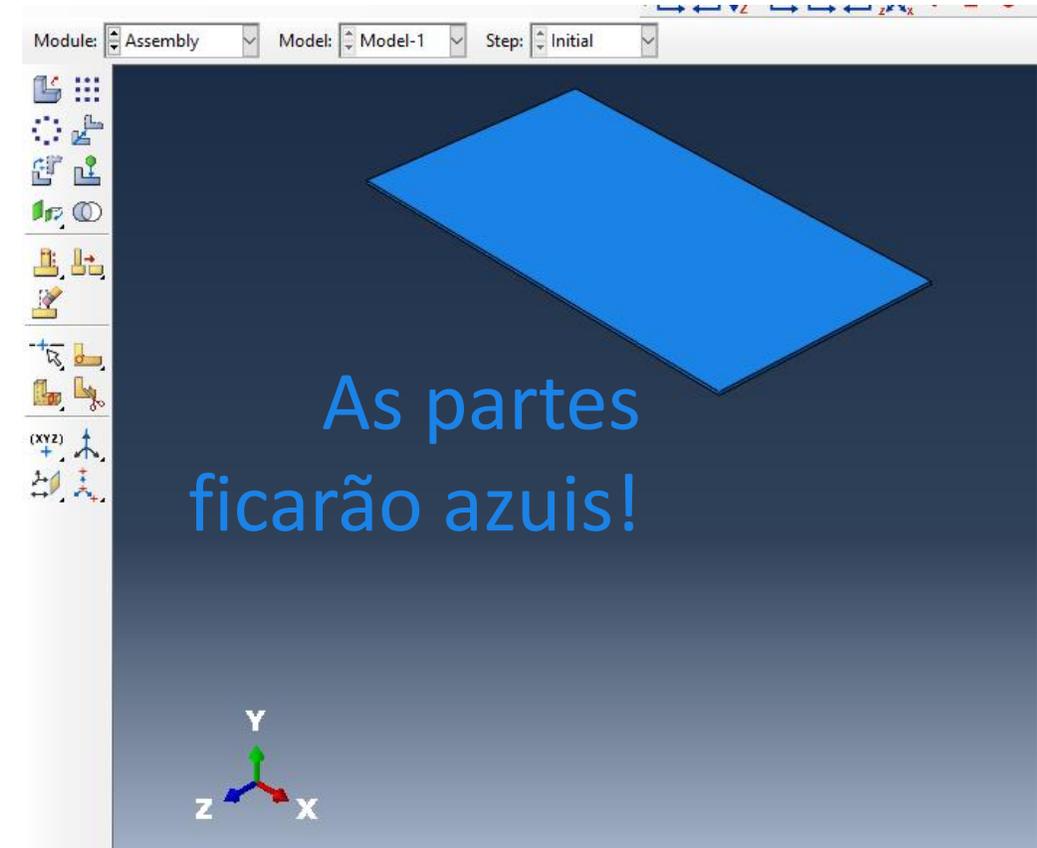
Você deve lembrar que apenas copiamos a parte EPOXI para ela virar PIEZO, quando desenhávamos a geometria. Elas, portanto, estão sobrepostas. Será aqui, na hora do *Assembly*, que iremos transladar a parte PIEZO de 0.20mm em y(2)

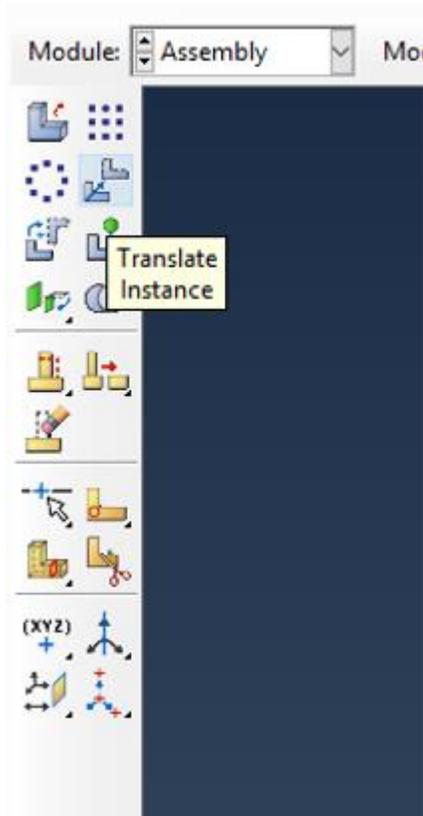
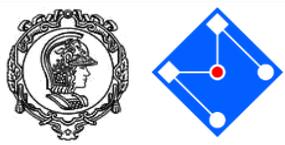


Inicialmente, una as duas partes:
EPOXI e PIEZO

Selecione "Independent"
em "Instance Type"

"Apply"
"Cancel"

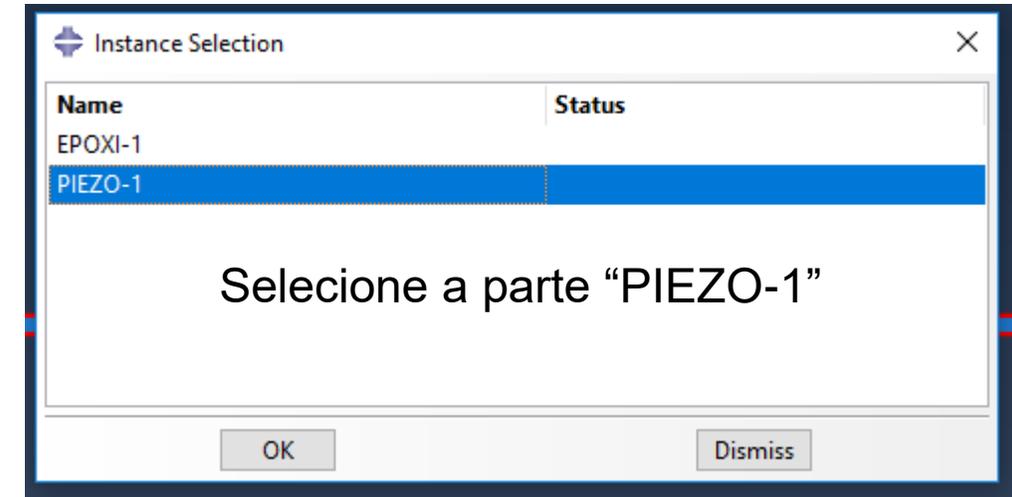
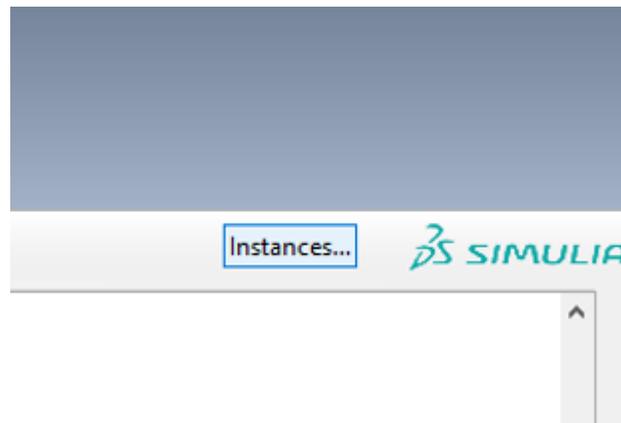




Clique em “Translate Instance”

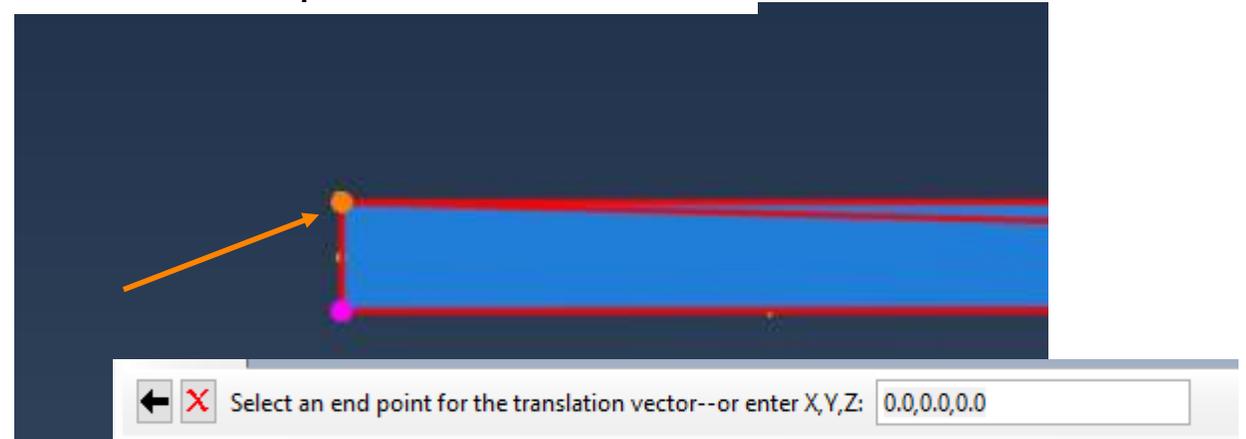
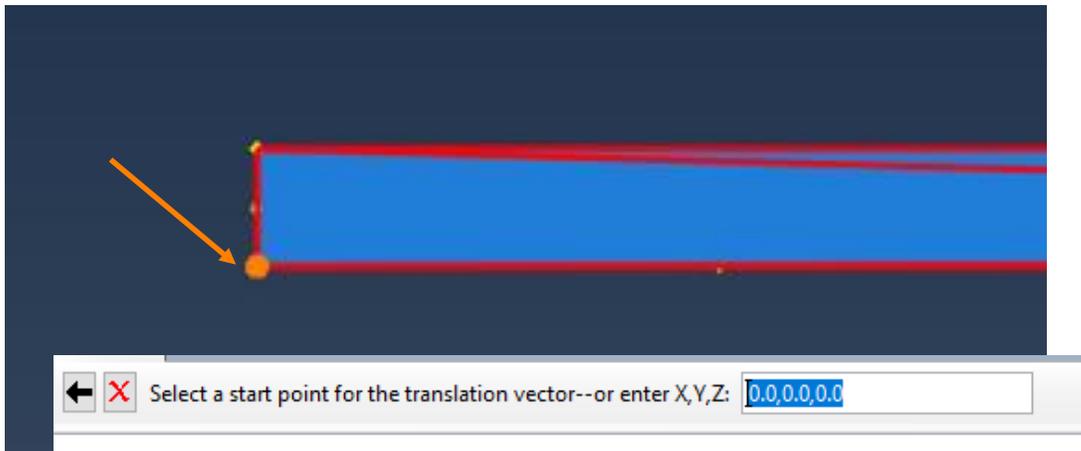


No canto direito, clique em “Instances...”

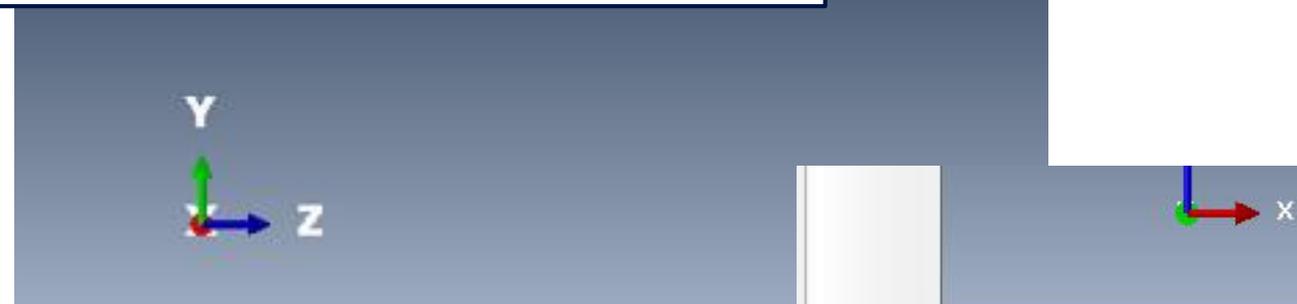
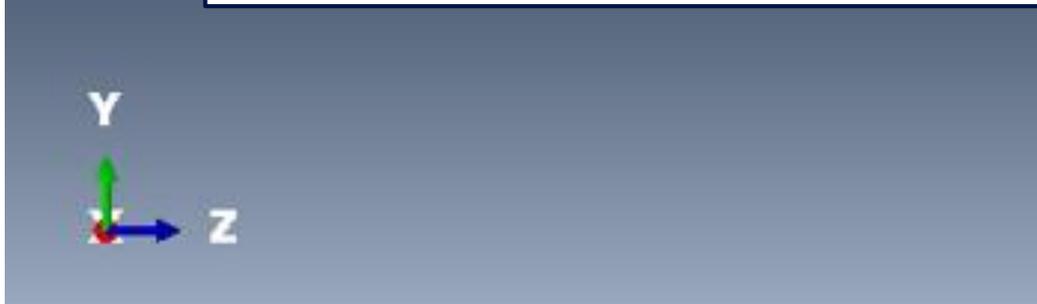




O programa pedirá dois pontos para construir o vetor de deslocamento da parte. Dê um zoom na seção transversal e escolha dois pontos que definem a espessura, em z:

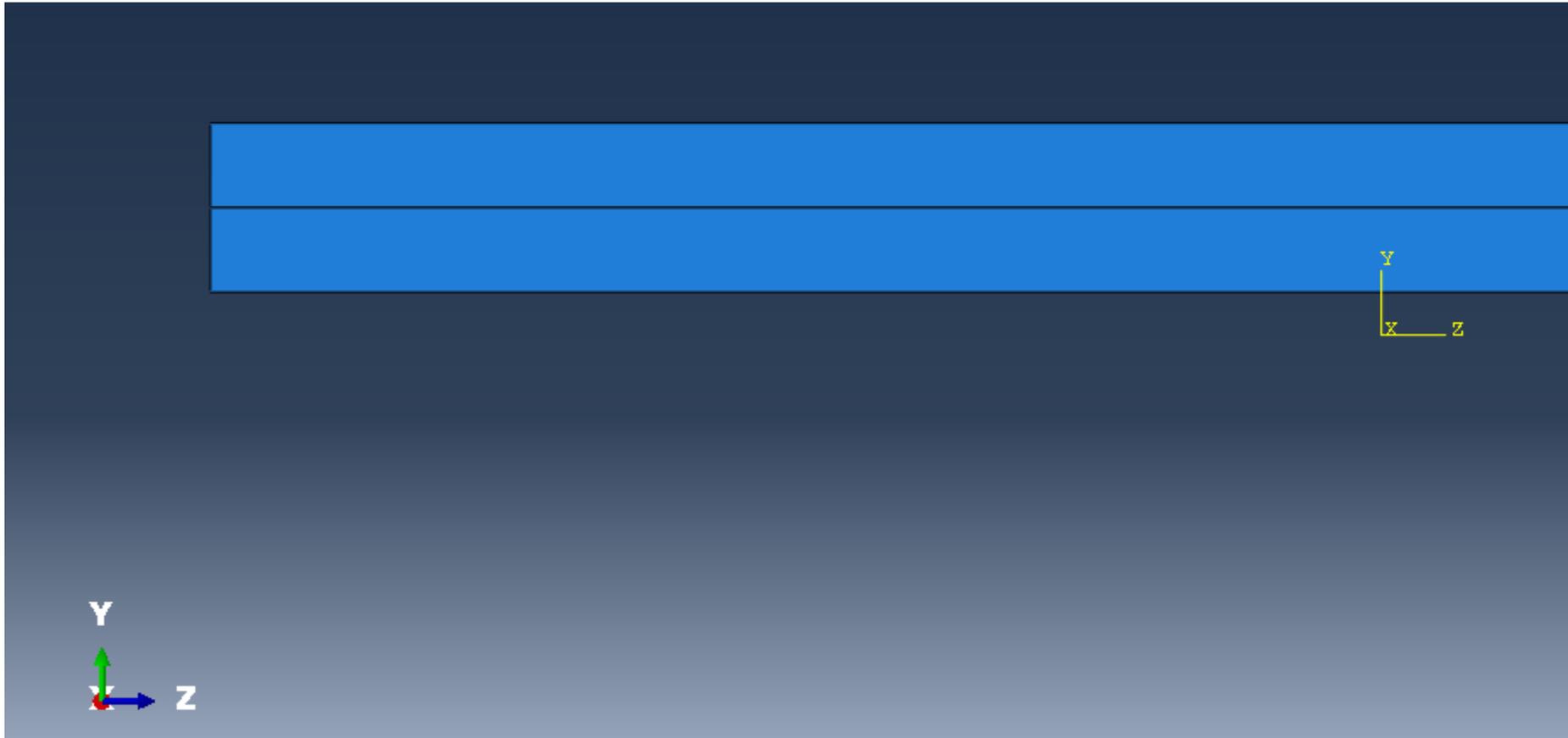


Você também pode digitar dois pontos que gerem um vetor de 0.2mm na direção



Clique em **OK**.

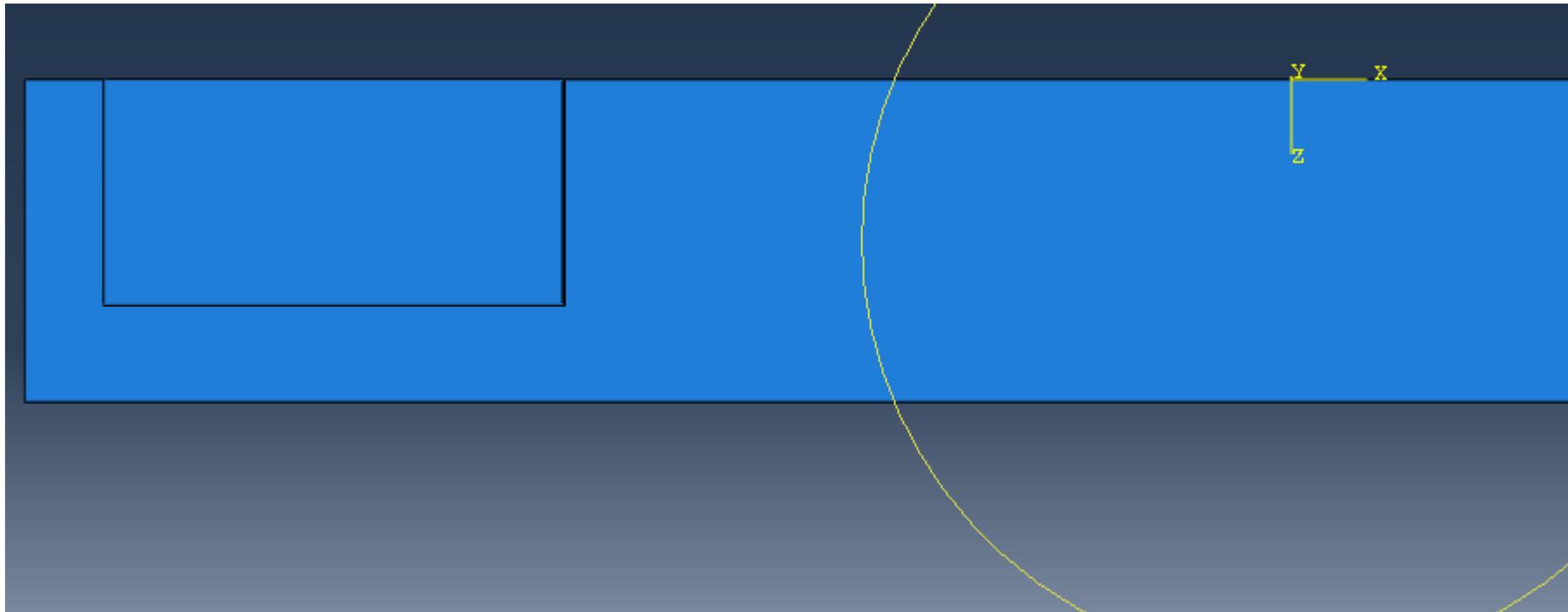




Pronto!!!!



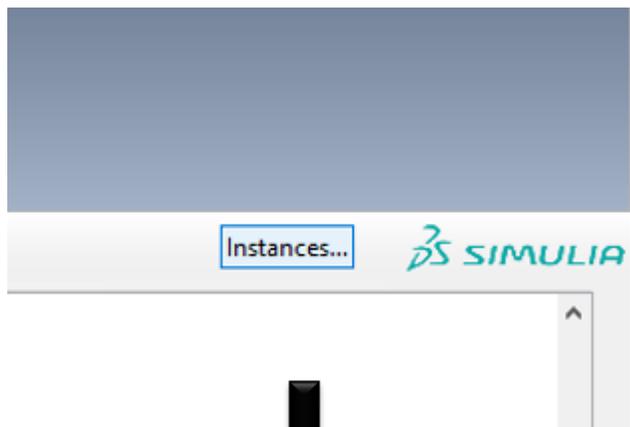
Veja a estrutura de cima... Temos que colocar a EPOXI e PIEZO centradas...



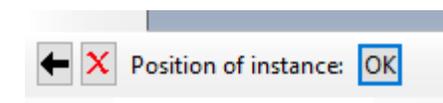
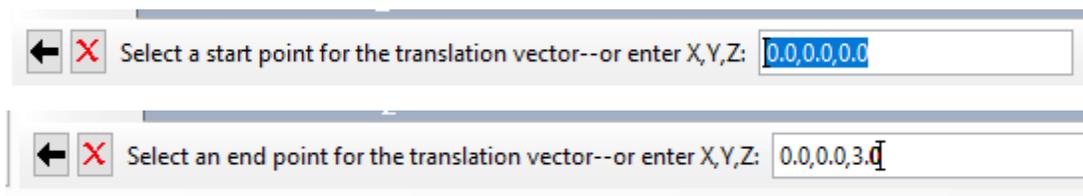
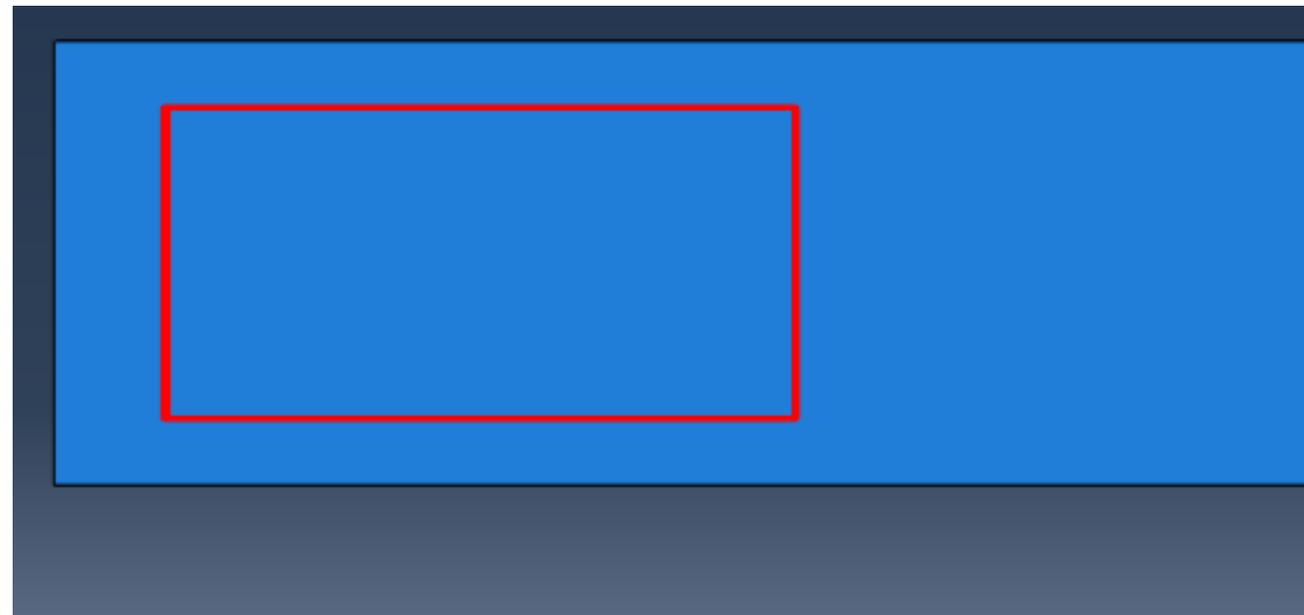
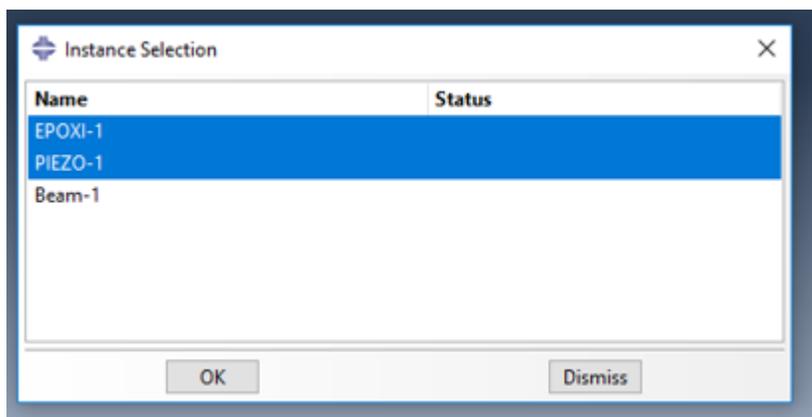
Os passos são:
"Translate Instance" → Selecione PIEZO e EPOXI
Defina a translação em z.



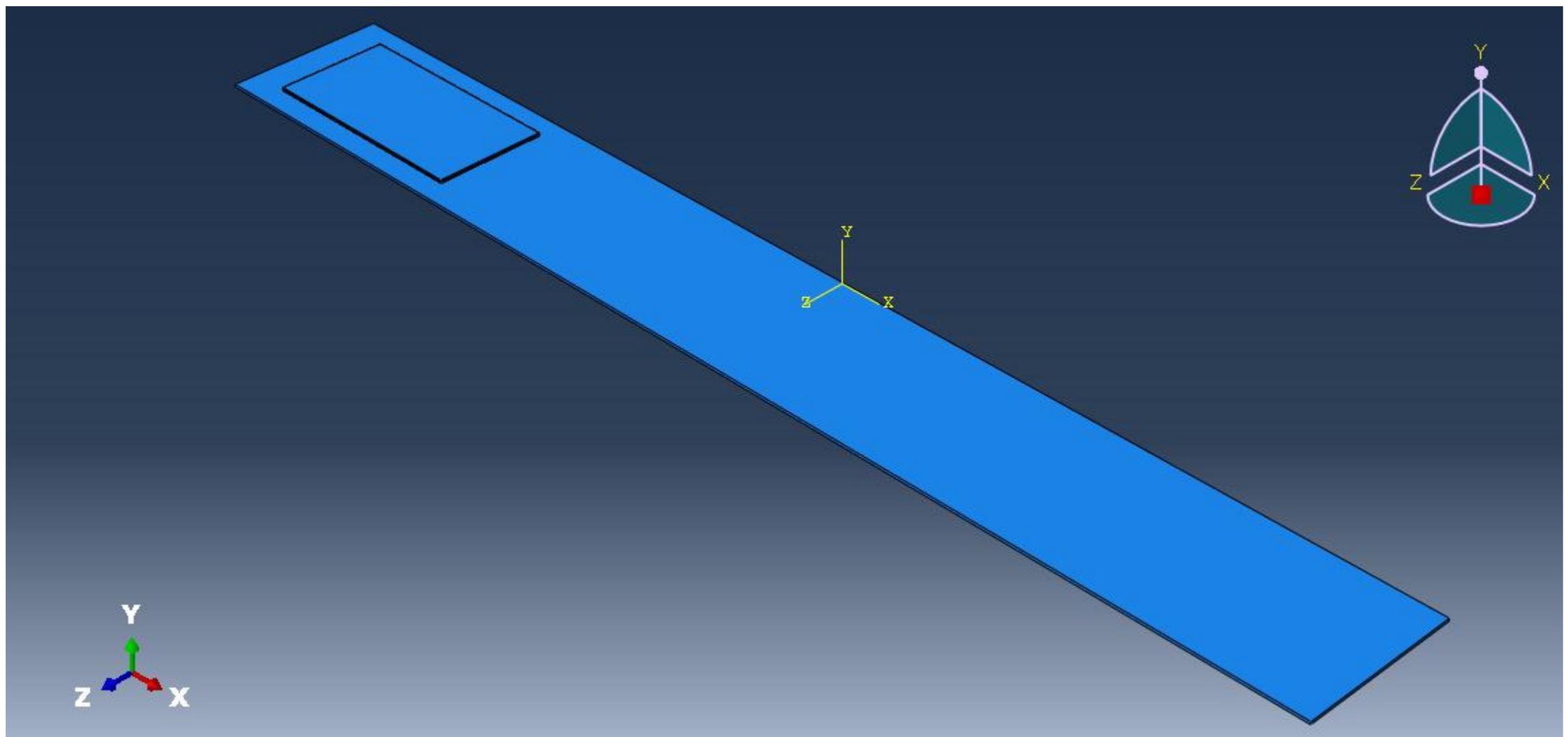
No canto direito, clique em “Instances...”



Selecione a parte “PIEZO-1” e “EPOXI-1”

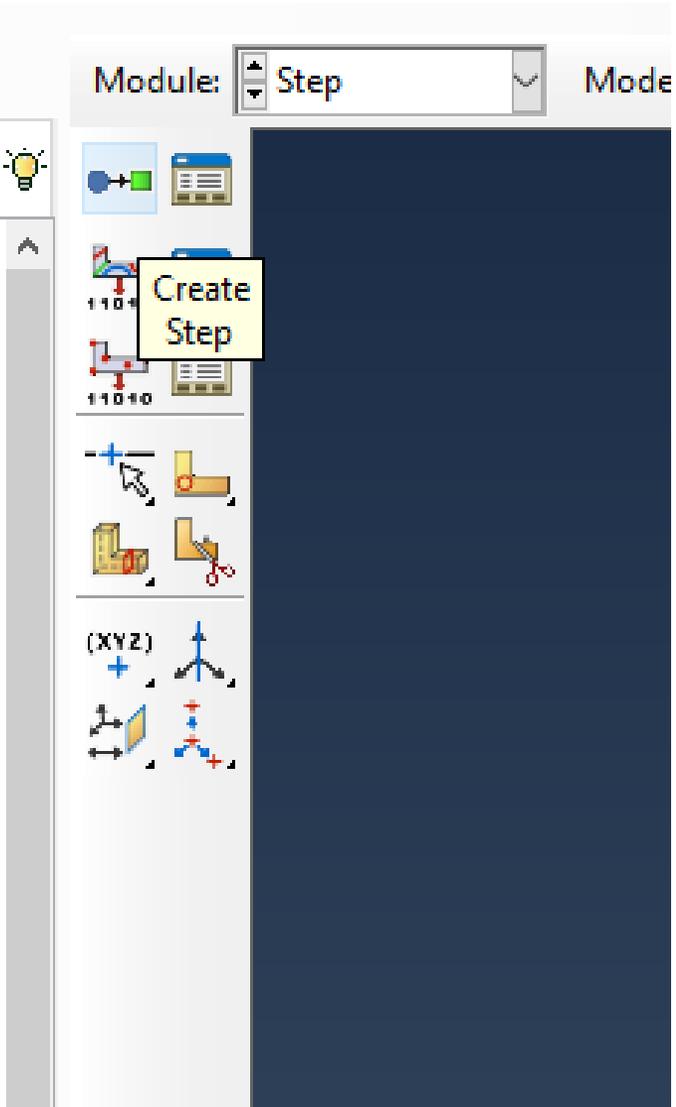


Clique OK



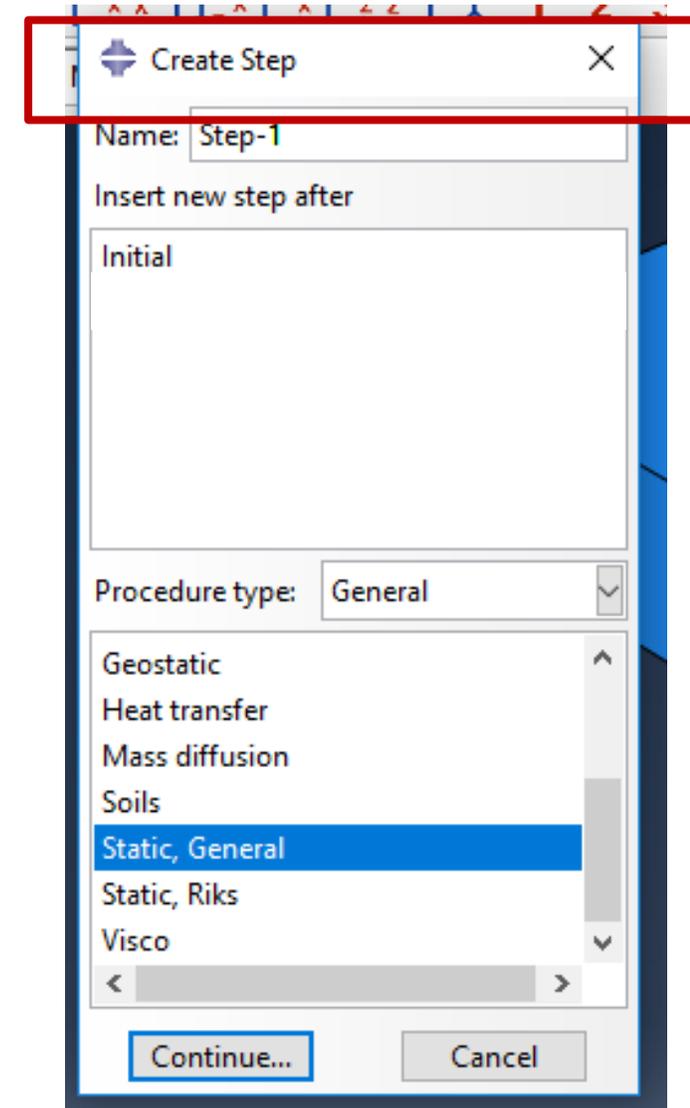


- Você criou as partes e uniu (uniu para formar a geometria, mas os nós das partes BEAM, EPOXI e PIEZO sobrepostos são independentes).
- Agora você pode mover para o módulo **STEP** para definir suas etapas de análise. Para o tutorial da viga em balanço, a análise consistirá em três etapas:
 1. Um passo inicial, no qual você aplicará uma condição de contorno que restrinja uma extremidade da viga;
 2. Um passo de análise harmônica.
- ABAQUS/CAE gera automaticamente o passo inicial, mas você deve usar o módulo STEP para criar a etapa de análise você mesmo. O módulo STEP também permite que você solicite saída para qualquer etapa na análise.



Em “Step” – acho que você já entendeu que pode usar diretamente a árvore do modelo ou o painel ao lado do ViewPort em cada uma das etapas... (e já escolheu seu caminho favorito). 😊😊

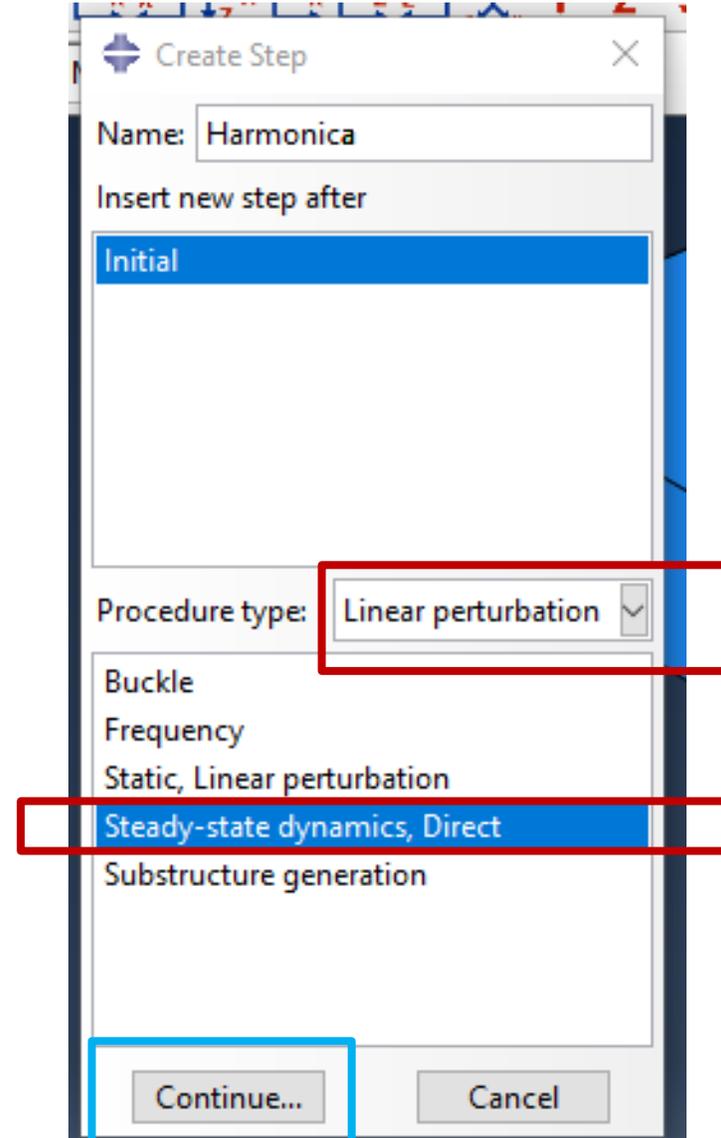
Abre-se a caixa de diálogo **Create Step**, com uma lista de todos os procedimentos gerais e um nome padrão do STEP *Step-1*. Os procedimentos (procedure type) definem o tipo de análise da resposta linear ou não-linear.





Dê um nome ao step
(Harmonica);

Na lista de Procedure type
disponível na caixa de
diálogo *Create Step*,
escolha **Linear
Perturbation**.
E, depois, **Steady-sate
dynamics, Direct**.
e clique em Continue...





A caixa de diálogo **Edit Step** é exibida com o passo estático padrão

Em **Description**, digite “Harmonica”.

Scale é a escala da frequência, e deixamos o default “Logarithmic”.

Data – vamos varrer a faixa de frequência de 5 a 60Hz, com 800 pontos.

DICA: Essa análise irá demorar bastante, tente primeiro 100 pontos. Depois, quando não tiver mais erros aumente para 800.

The screenshot shows the 'Edit Step' dialog box with the following settings:

- Name: Harmonica
- Type: Steady-state dynamics, Direct
- Basic tab selected
- Description: Harmonica
- Nlgeom: Off
- Compute real response only: ; Compute complex response:
- Scale: Logarithmic; Linear
- Include friction-induced damping effects:
- Use eigenfrequencies to subdivide each frequency range:

Data table:

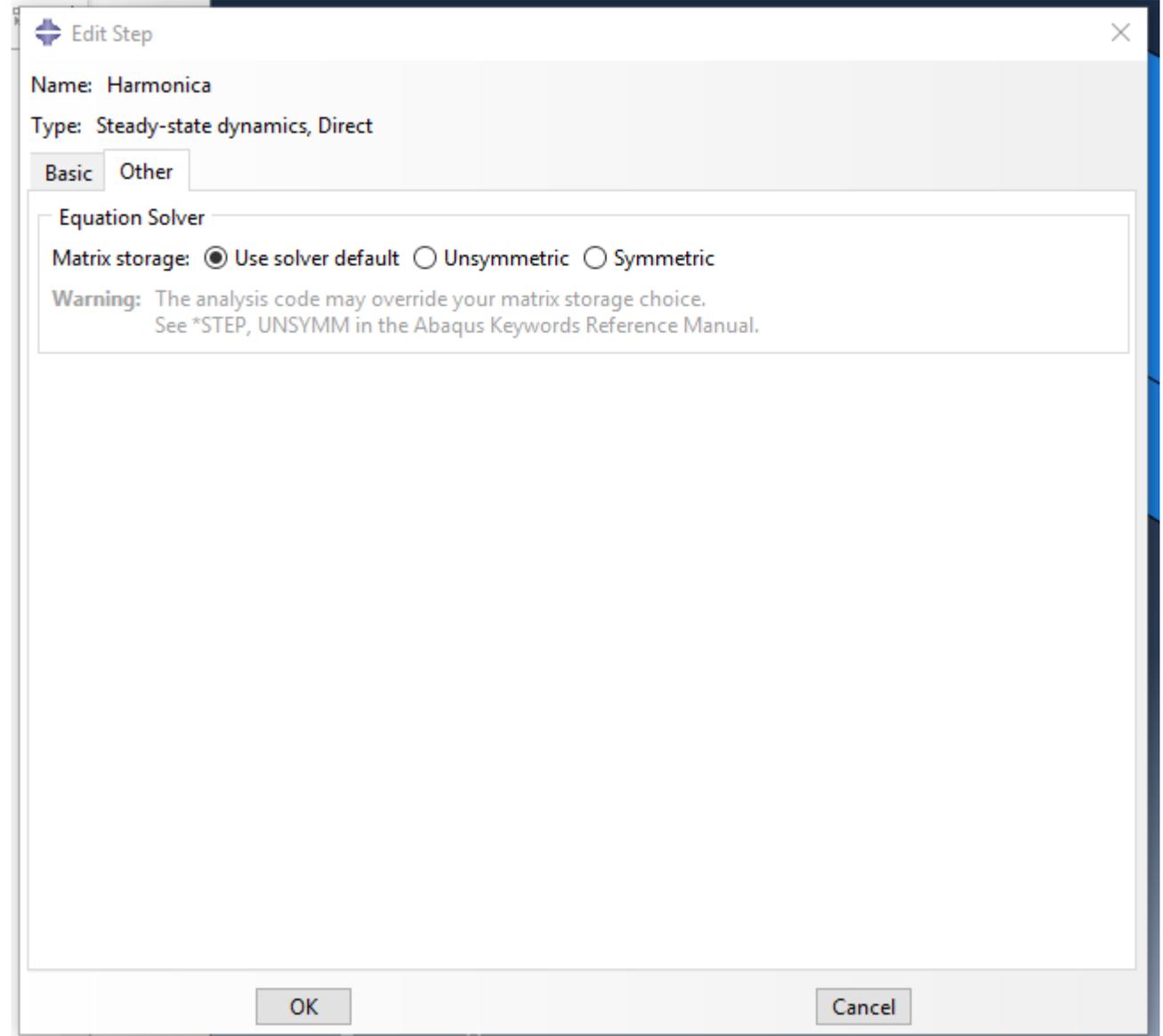
	Lower Frequency	Upper Frequency	Number of Points	Bias
1	5	60	800	1

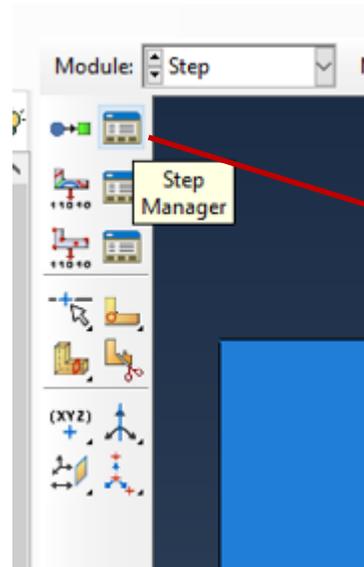
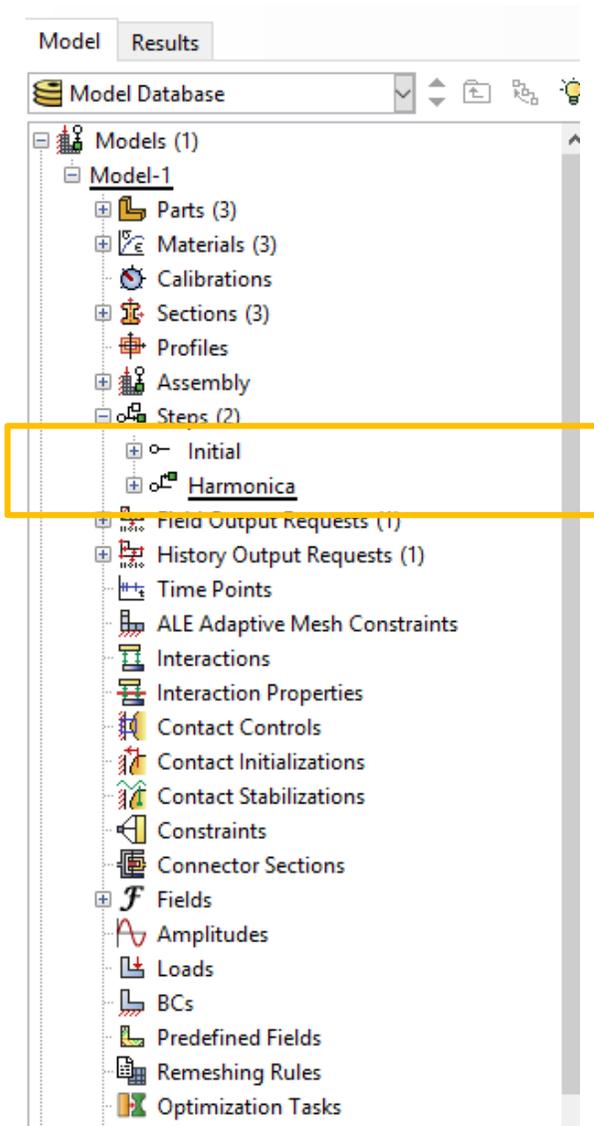
Note: Bias applies only when more than 3 points are requested.

Buttons: OK, Cancel



Clique na última guia (**Other**) para visualizar seus conteúdos; você pode aceitar o solver padrão já sugerido. Clique em OK para criar a etapa e sair da caixa de diálogo **Edit Step**





Name	Procedure	Nlgeom	Time
✓ Initial	(Initial)	N/A	N/A
✓ Harmonica	Steady-state dynamics, Direct	OFF	0

Buttons: Create... Edit... Replace... Rename... Delete... Nlgeom... Dismiss

Veja que, na árvore e na barra de ajuda, em Steps, podemos visualizar os dois *steps da análise*, o “Initial”, e o recém criado “Harmonica”



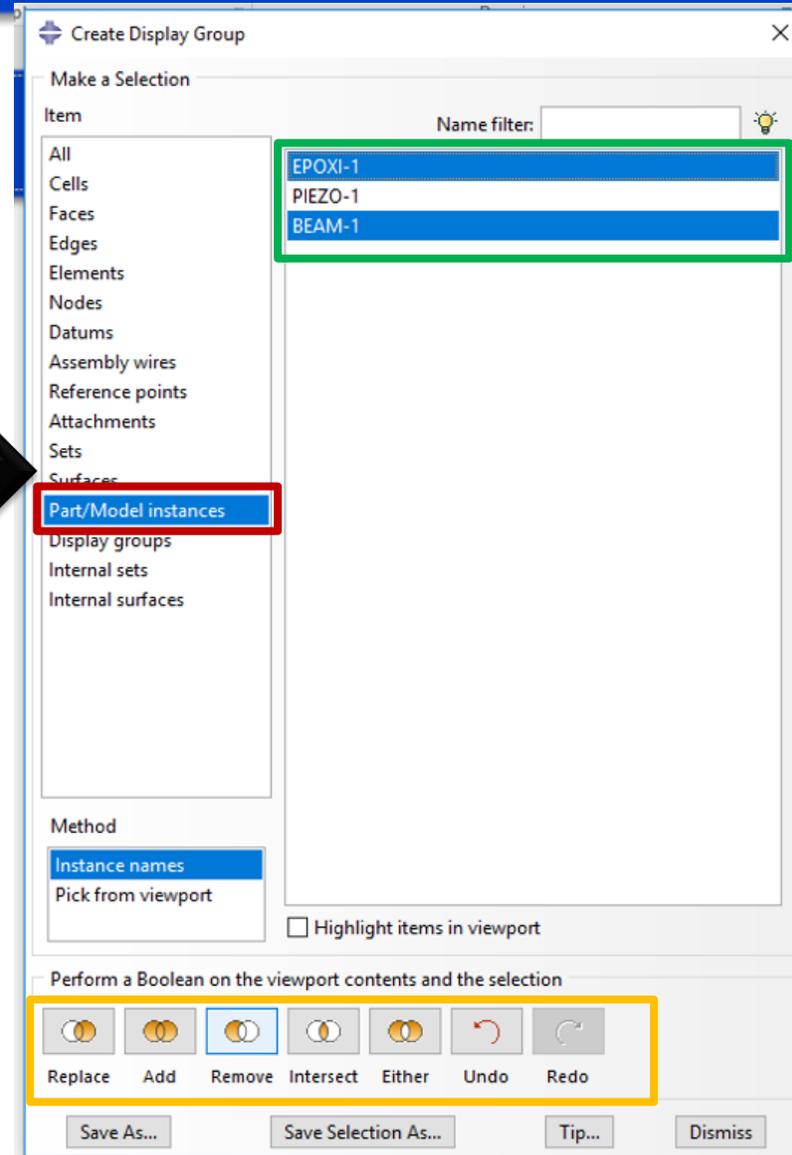
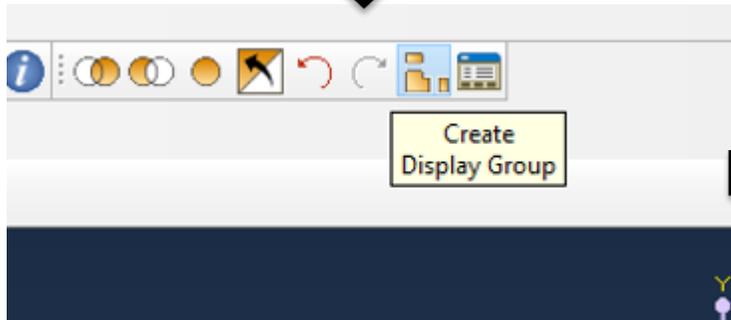
- Quando você envia seu *Job* para análise (calma, faremos mais adiante...), o software escreve os resultados da análise em um banco de dados de saída. Quando você cria um STEP, ABAQUS/CAE gera uma solicitação de saída padrão para o step. Para cada *step* que você criar, você pode usar o ***Field Output Requests Manager*** e o ***History Output Requests Manager*** para fazer o seguinte:
 - Selecione as variáveis que ABAQUS irá escrever no banco de dados de saída.
 - Selecione os pontos de seção para os quais o ABAQUS irá gerar dados.
 - Selecione a região do modelo para a qual o ABAQUS irá gerar dados.
 - Mude a frequência na qual o ABAQUS irá gravar dados no banco de dados de saída.



- A análise de voltagem nos interessa somente para o material piezo. Portanto, vamos gerar um SET com a geometria da parte PIEZO e chamaremos de VOLTAGEM. Isso ajuda a diminuir o tamanho dos arquivos de saída.
- Para selecionar somente a geometria PIEZO, aprenda, no próximo slide, a “deletar” do Display as outras partes...



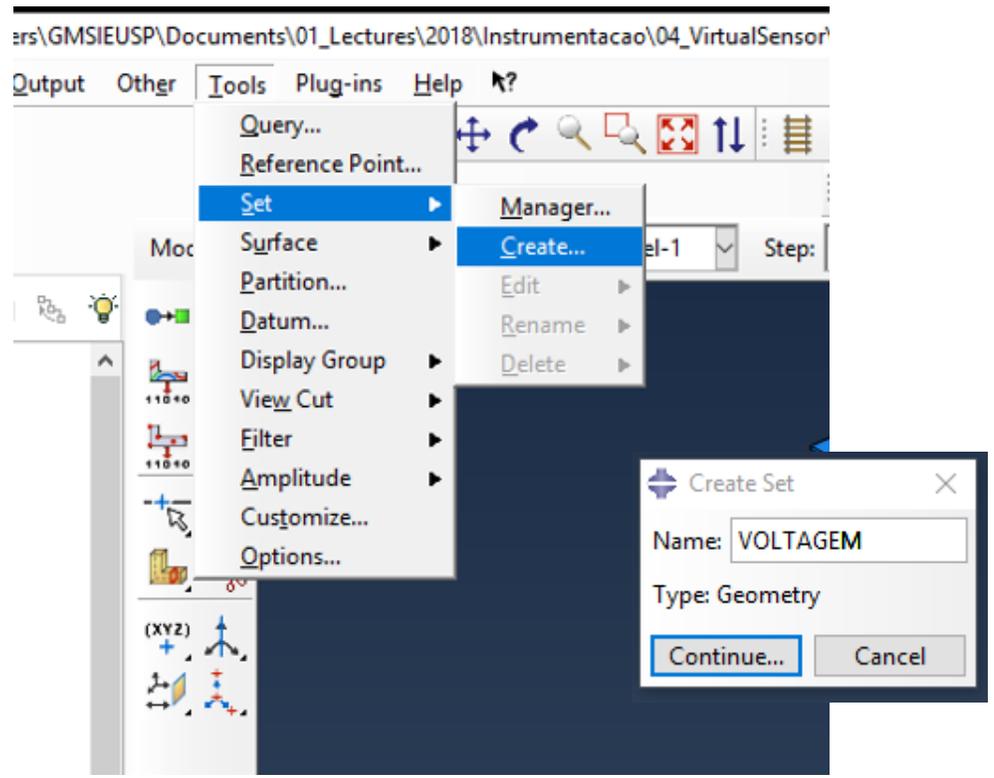
Para remover partes do Display, clique em “Create Display Groups”



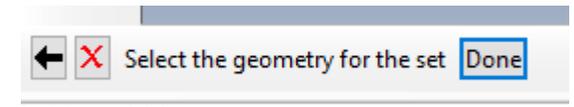
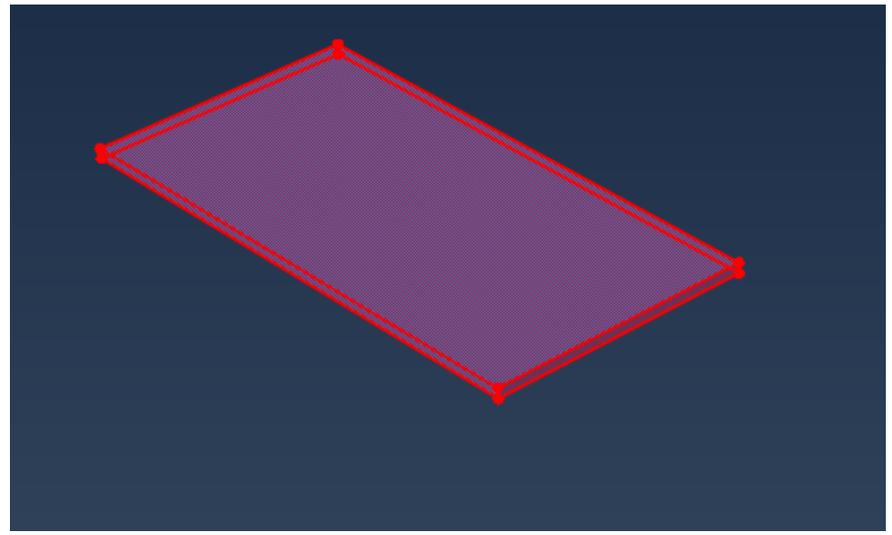
- Selecione “Part/Model instances”
- Selecione as partes que você quer remover
- Clique em “Remove”
- Para retornar as partes, selecione e clique em “Add”



- A análise de voltagem nos interessa somente para o material piezo. Portanto, vamos gerar um SET com a geometria da parte PIEZO e chamaremos de VOLTAGEM. Isso ajuda a diminuir o tamanho dos arquivos de saída.



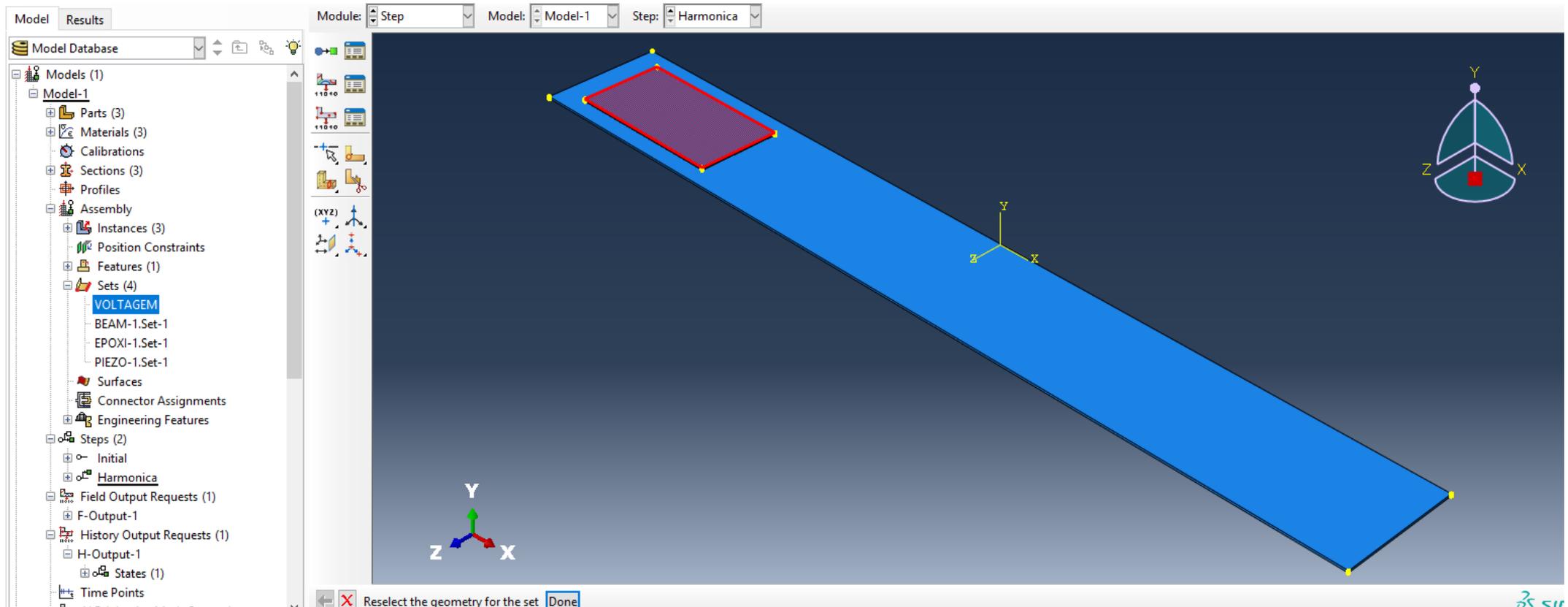
➔
Selecione toda parte PIEZO (as outras não aparecem porque você deletou)



Clique "Done"

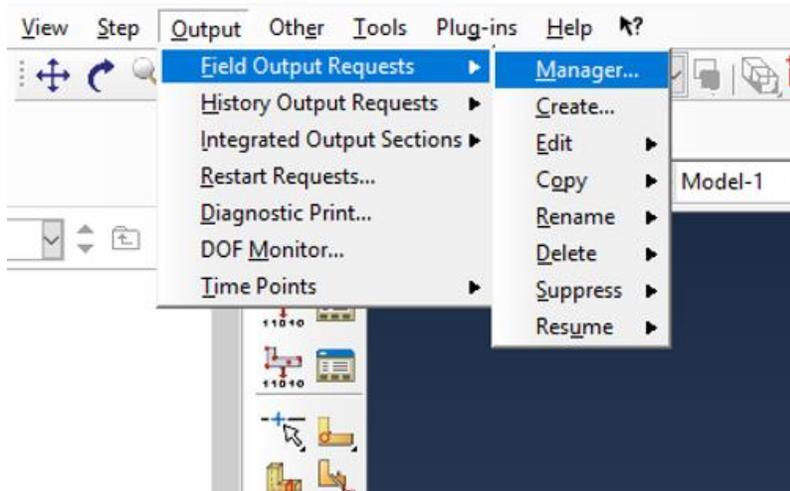


- Vamos voltar agora para organizar os dados de saída da sua análise...
- Retorne as partes BEAM e EPOXI que você removeu e vamos em frente...

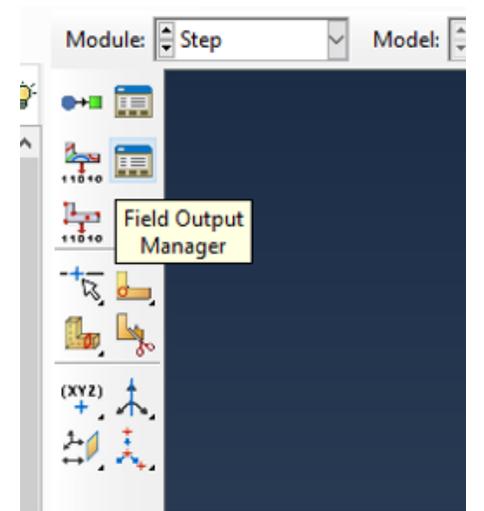




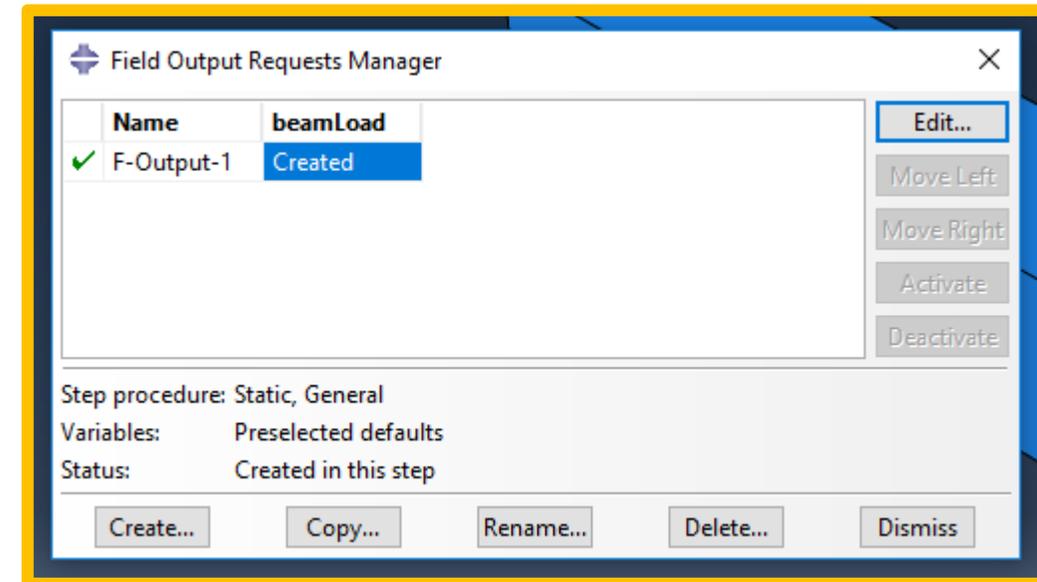
- No menu principal, selecione *Output* → *Field Output Requests* → *Manager*:



- Ou :



Abre-se uma janela com a lista de outputs requeridos pelos steps criados.
Clique em Edit...





Edit Field Output Request

Name: F-Output-1
Step: Harmonica
Procedure: Steady-state dynamics, Direct

Domain: Whole model Exterior only

Frequency: Every n increments n: 1

Output Variables

Select from list below Preselected defaults All Edit variables

S, MISES, LE, U, V, A, RF, CF

- Stresses
- Strains
- Displacement/Velocity/Acceleration
- Forces/Reactions
- Contact
- Energy
- Failure/Fracture
- Thermal
- Electrical/Magnetic

Note: Some error indicators are not available when Domain is Whole Mode

Output for rebar

Output at shell, beam, and layered section points:
 Use defaults Specify:

Include local coordinate directions when available

OK Cancel

Frequência de saída da resposta

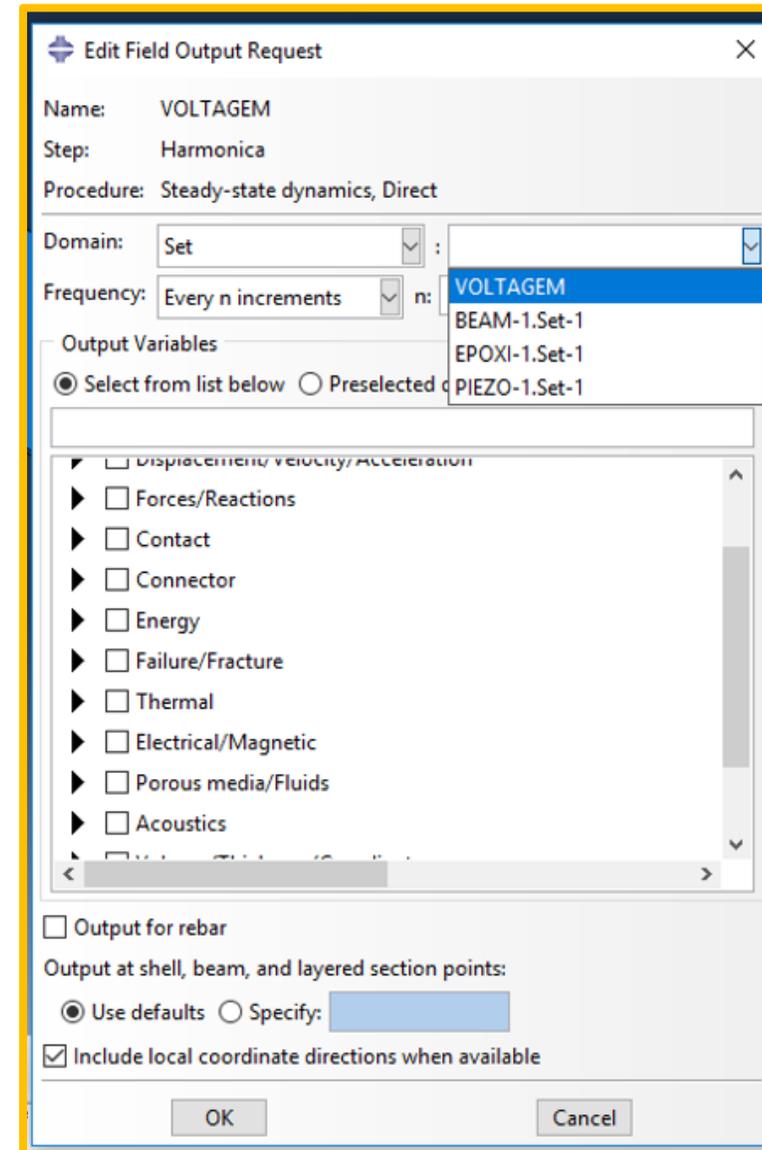
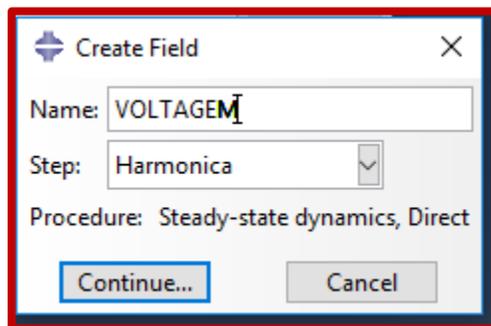
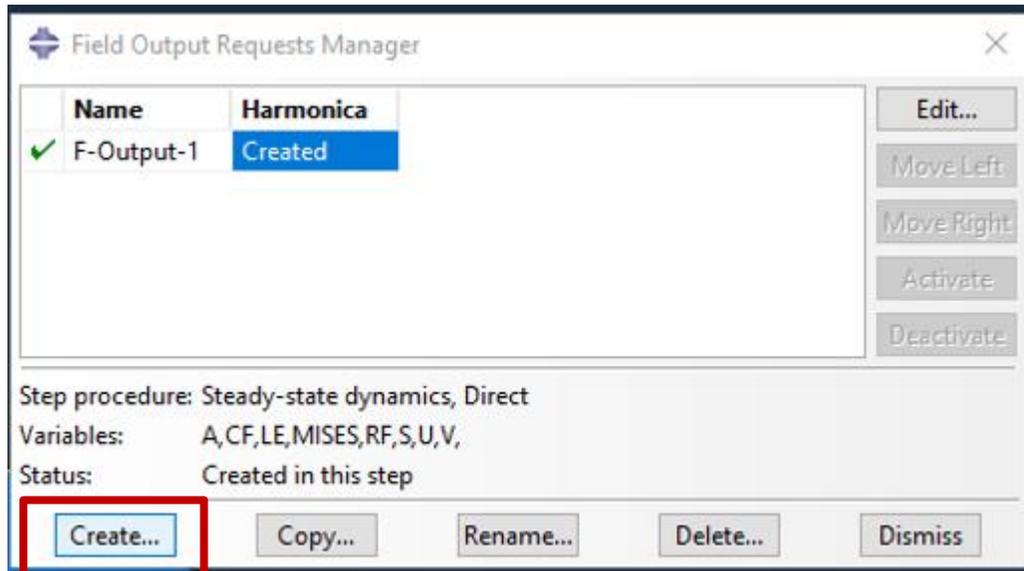
Quais as variáveis de saída. Abra uma delas (estresses, por exemplo) e veja o que será armazenado no arquivo de saída em termos de tensões. Selecione Mises. Clique **Ok** e, depois, **Dismiss**.

Stresses

- S, Stress components and invariants
- MISES, Mises equivalent stress
- MISESMAX, Maximum Mises equivalent stress
- TSHR, Transverse shear stress (for thick shells)
- CTSR, Transverse shear stress in stacked continuum shells
- ALPHA, Kinematic hardening shift tensor
- TRIAX, Stress triaxiality
- VS, Stress in the elastic-viscous network
- PS, Stress in the elastic-plastic network
- CS11, Average contact pressure for link and three-dimensional li
- ALPHAN, All tensor components of all the kinematic hardening
- SSAVG, Average shell section stress
- MISESONLY, Mises equivalent stress only
- PRESSONLY, Equivalent pressure stress only



Crie outro campo de saída,



Em “Domain” escolha “Set” e Selecione o set que criamos e chamamos de “Voltagem”.



Edit Field Output Request

Name: VOLTAGEM
Step: Harmonica
Procedure: Steady-state dynamics, Direct

Domain: Set : VOLTAGEM

Frequency: Every n increments n: 1

Output Variables

Select from list below Preselected defaults All Edit variables

EPOT,EPG,RCHG,CECHG,RECUR,CECUR,ECD,ECDA,ECDT,ECDTA,EFLX,NCL

- Connector
- Energy
- Failure/Fracture
- Thermal
- Electrical/Magnetic**
- Porous media/Fluids
- Acoustics
- Volume/Thickness/Coordinates
- Error indicators
- State/Field/User/Time

Output for rebar

Output at shell, beam, and layered section points:

Use defaults Specify:

Include local coordinate directions when available

OK Cancel

Selecione a saída
Electrical/Magnetic.
Clique **Ok** e, depois,
Dismiss.

Field Output Requests Manager

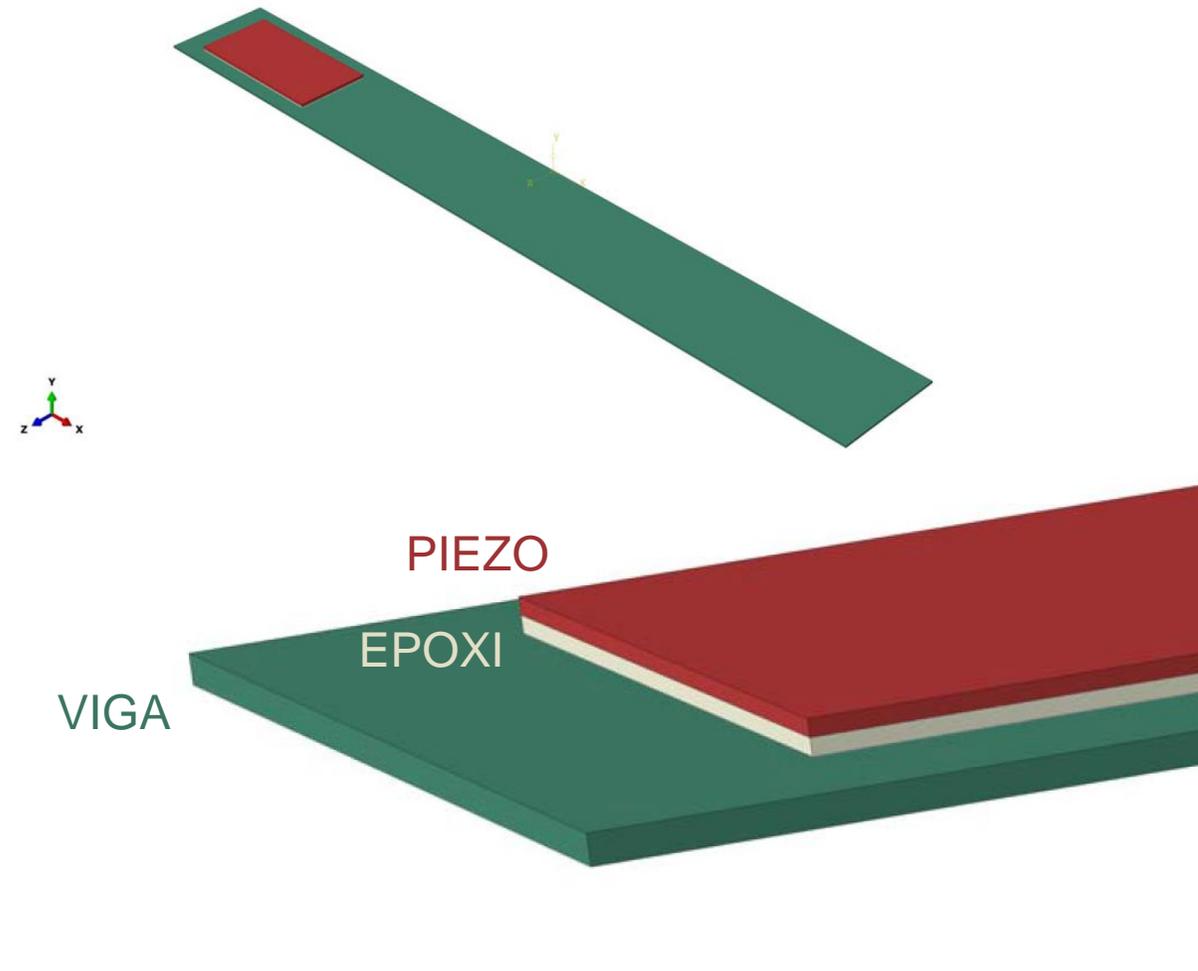
Name	Harmonica
✓ F-Output-1	Created
✓ VOLTAGEM	Created

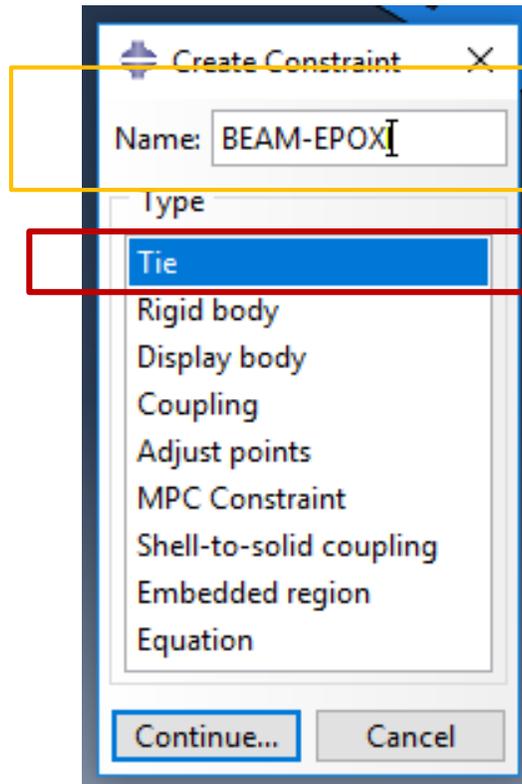
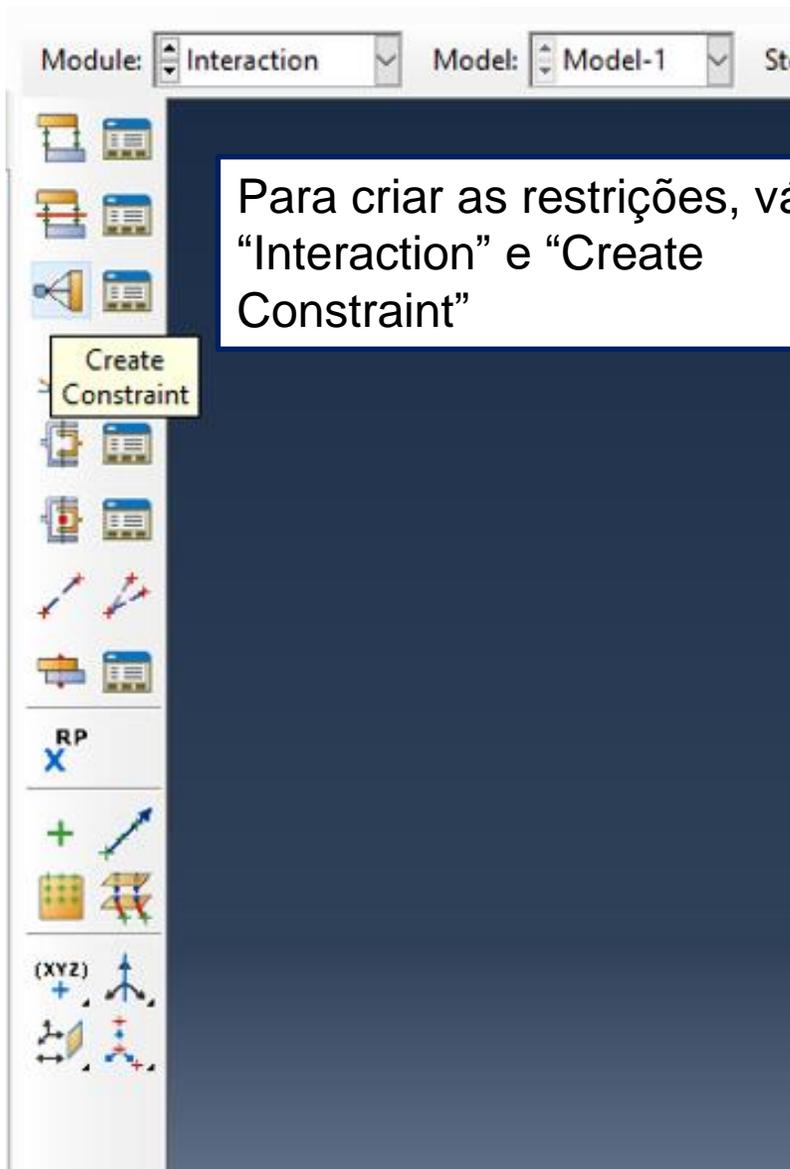
Step procedure: Steady-state dynamics, Direct
Variables: CECHG,CECUR,ECD,ECDA,ECDT,ECDTA,EFLX,EPG,EPOT,NC...
Status: Created in this step

Create... Copy... Rename... Delete... Dismiss



O passo **Interaction** é necessário quando temos que definir a relação entre partes. Por exemplo, o atrito, contato, movimentos dependentes entre partes... Em nosso caso, temos que “prender” a parte EPOXI à parte BEAM e à parte PIEZO.



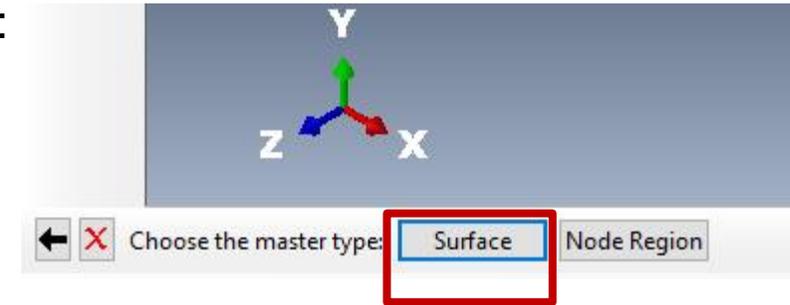
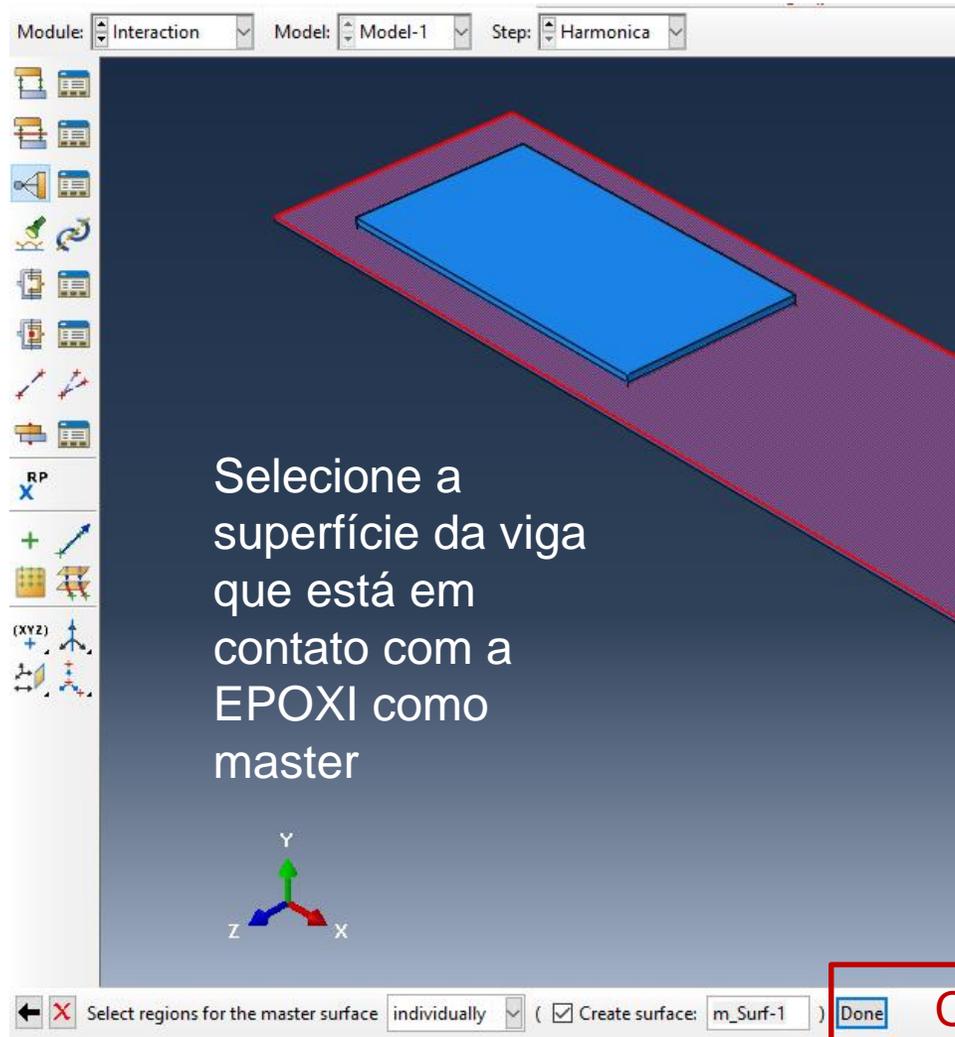


Você pode dar um nome. Ajuda na procura de bugs...

Em "Create Constraint", escolha a opção "Tie"



Você irá definir as superfícies Master e depois Slave da restrição:



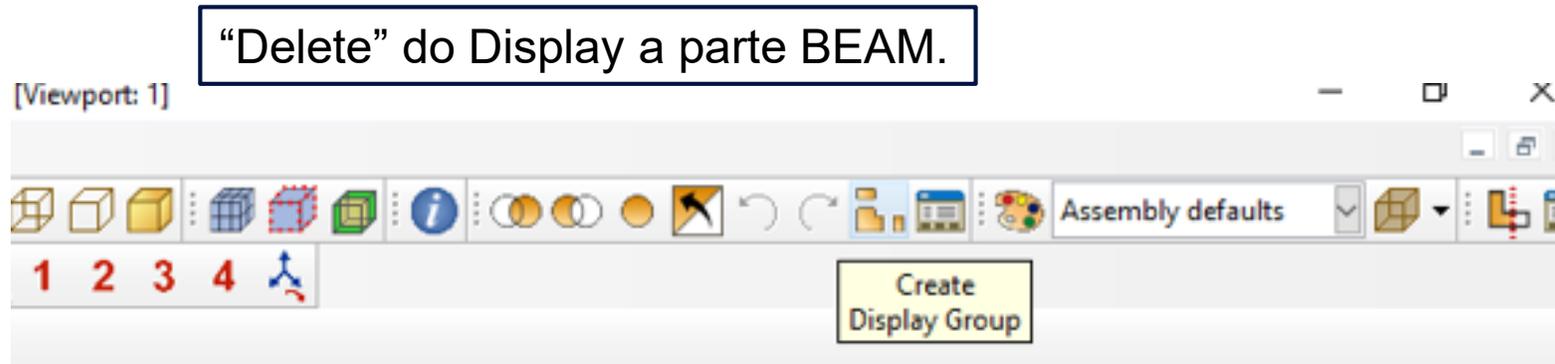
Master é a superfície superior da parte BEAM

Clique em "Done"

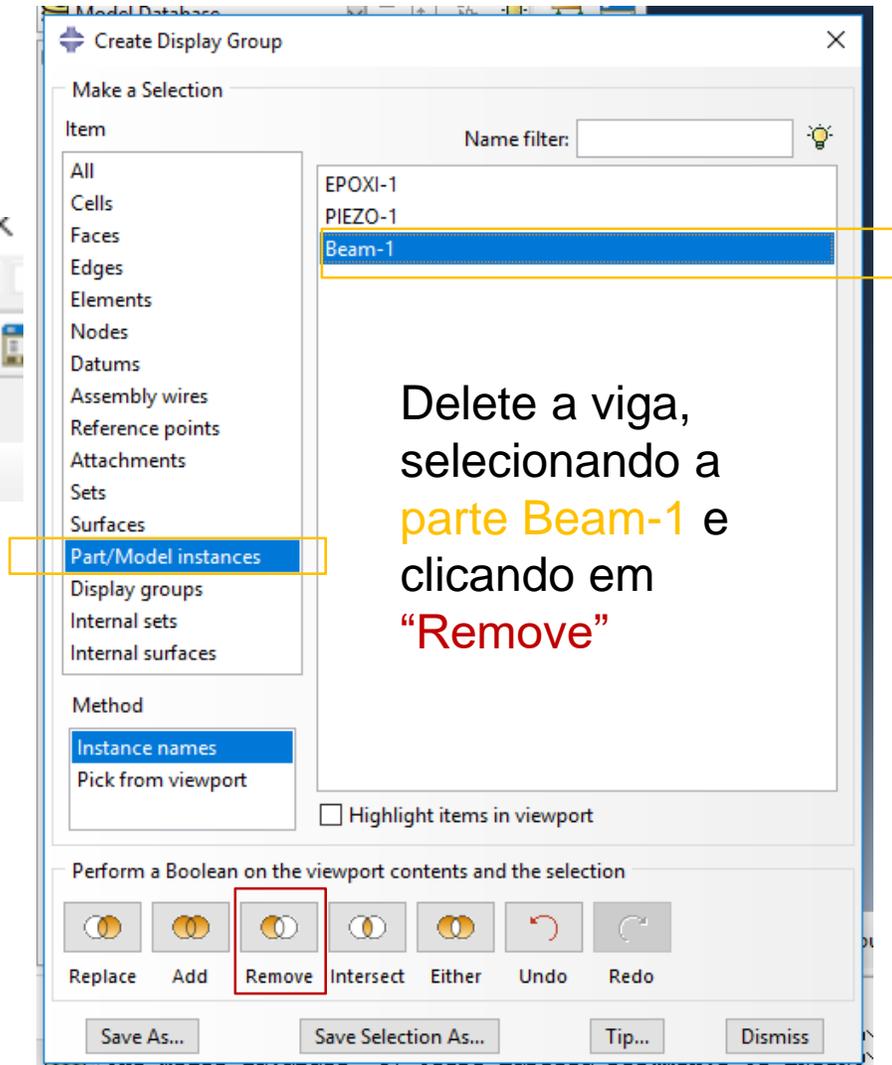
Agora, como selecionar a superfície da EPOXI como slave?



Slave é superfície inferior da parte EPOXI.



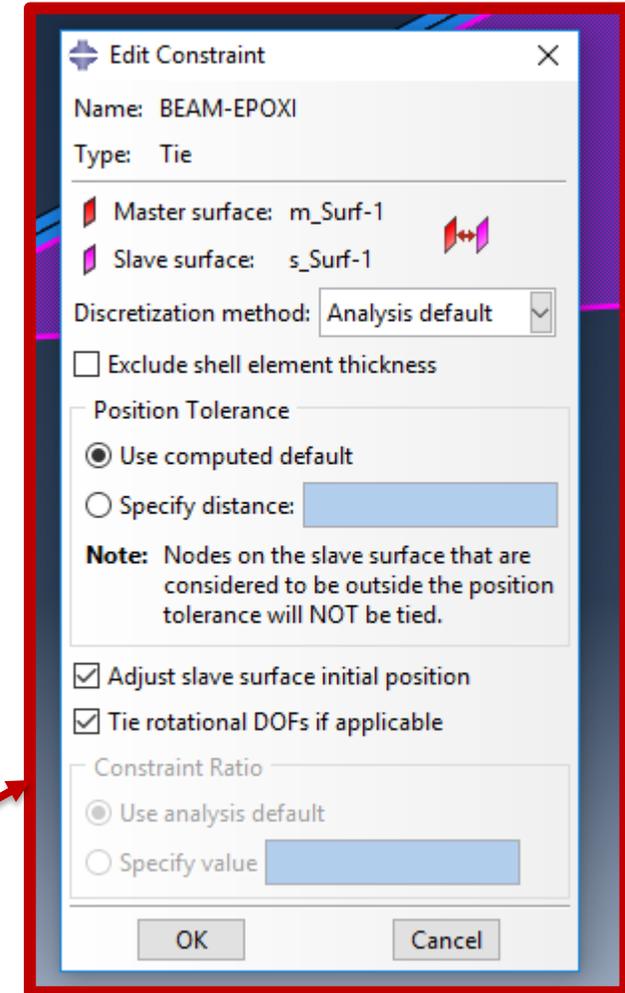
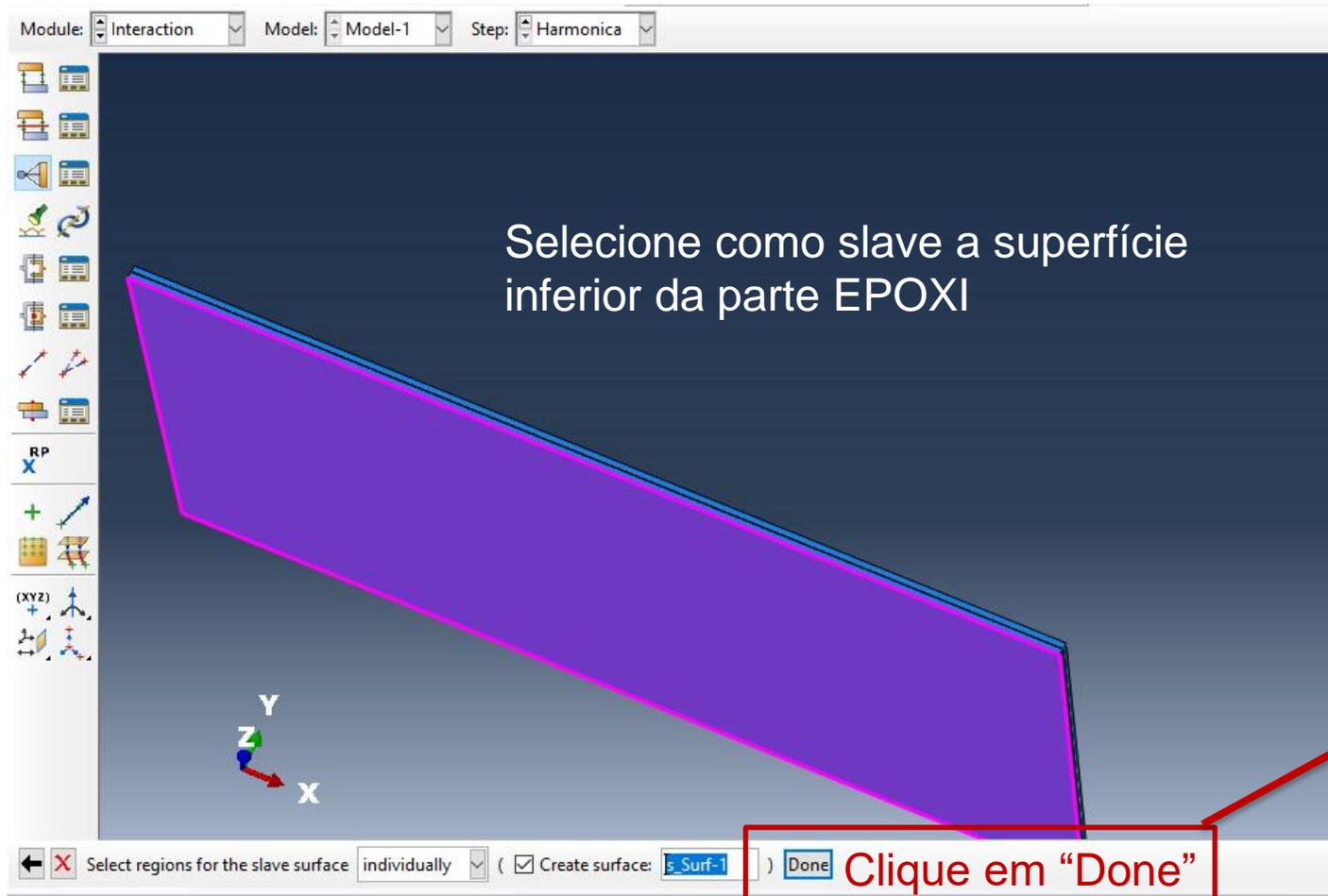
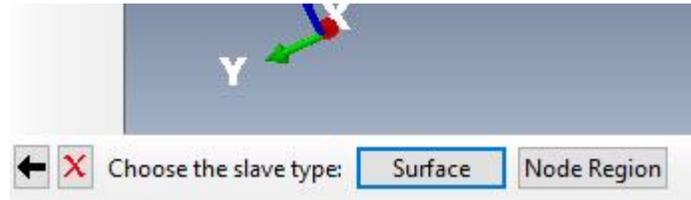
Sem a viga atrapalhando seu caminho você pode selecionar a superfície inferior da parte EPOXI como *slave*...



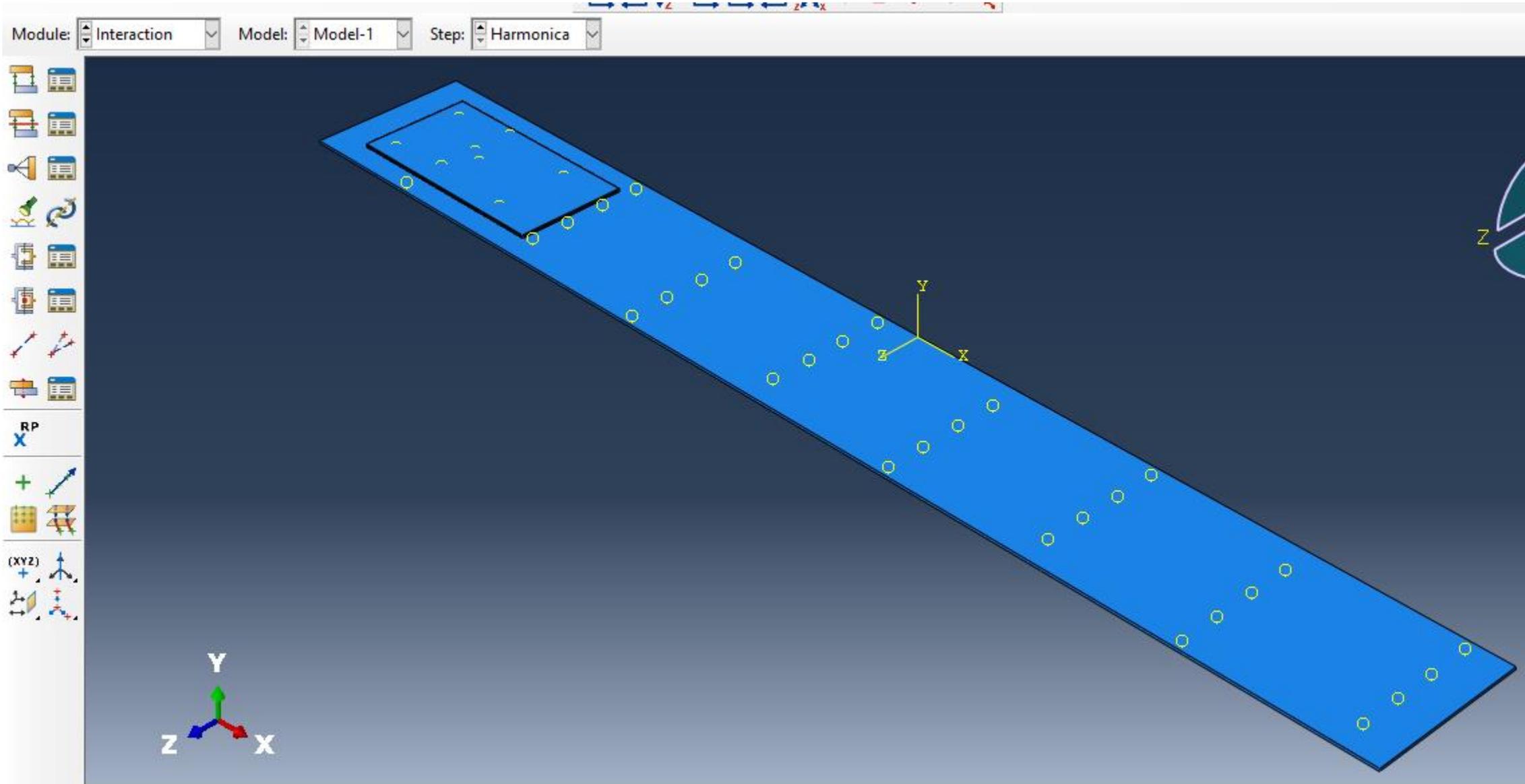
Constraint BEAM-EPOXI



Escolha surface (tipo geometria que você vai definir a interação será superfície)

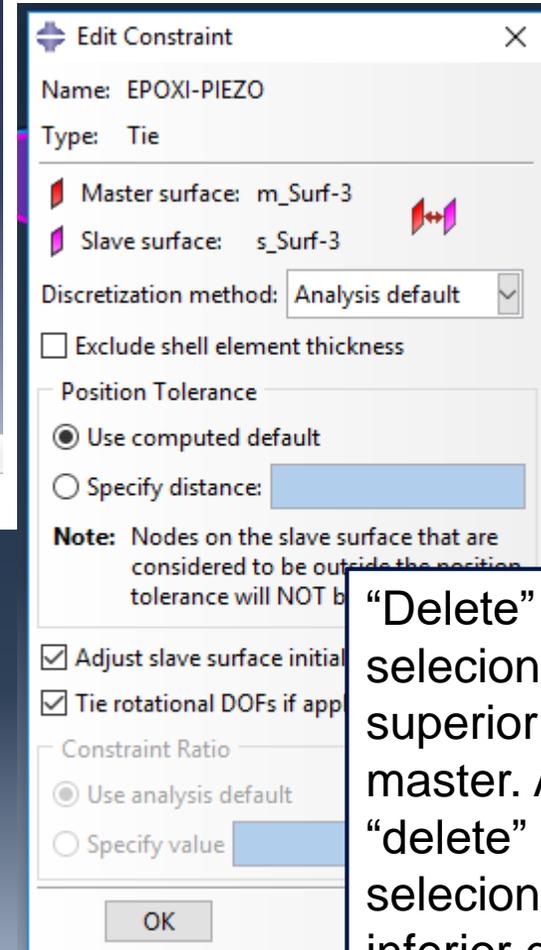
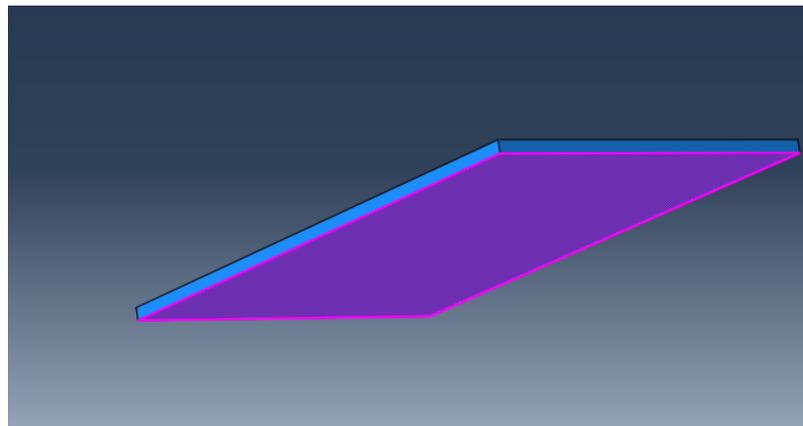
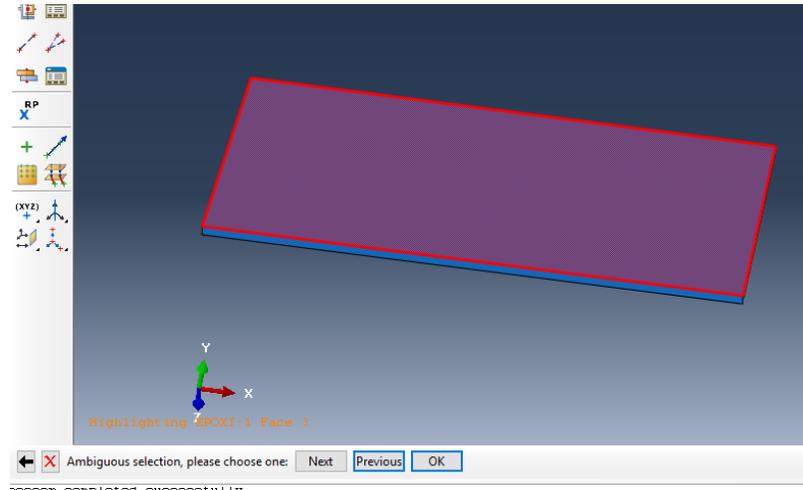
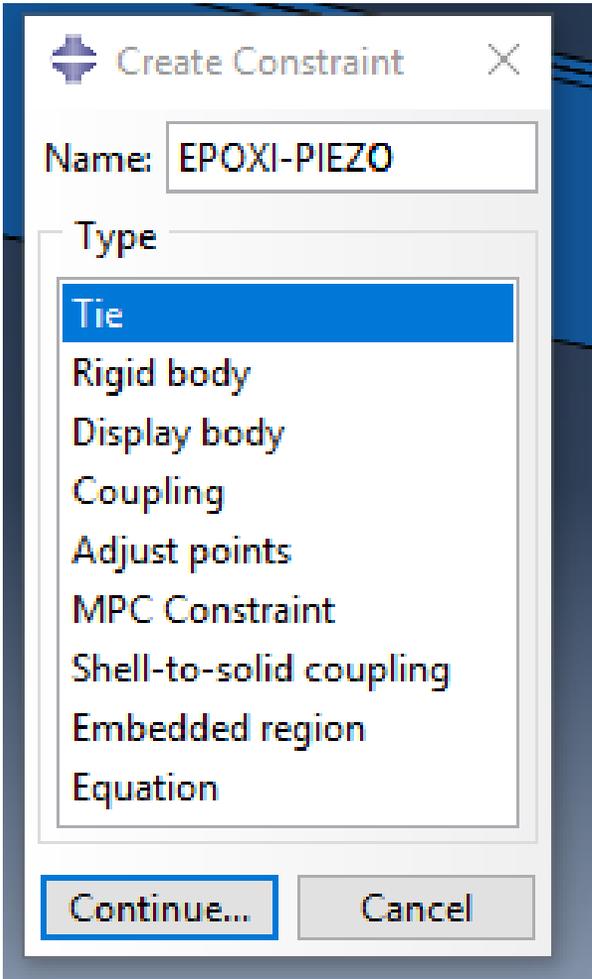


Aceite o default e clique em OK



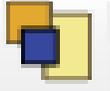


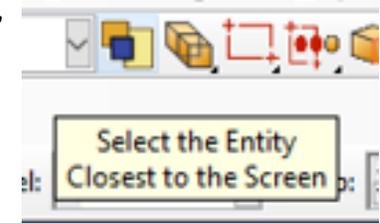
Siga os mesmos passos para criar a constraint entre EPOXI e PIEZO



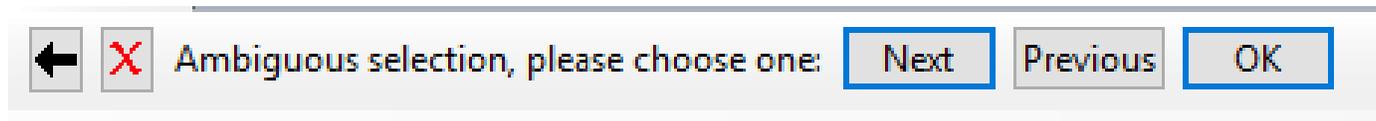
“Delete” a parte PIEZO para selecionar a superfície superior da EPOXI como master. Adicione a PIEZO e “delete” a EPOXI, para selecionar a superfície inferior da PIEZO como slave. Depois *traga de volta todas as partes....*



- Para selecionar a face correta será necessário girar as partes, pois quando você clica em uma região em que várias faces se sobrepõem, ABAQUS/CAE seleciona, por default, a face que está "mais próxima" na tela.
- Existe outra maneira de selecionar, sem girar. Aprender essa alternativa pode ser bastante útil em modelos mais complexos! Para isso você deve desativar o ícone , que se refere a "Select the Entity Closest to the Screen":



- Aparecerá, na área prompt, as opções: **Next**, **Previous**, e **OK**



- Clique em **Next**, **Previous** até que a face desejada seja realçada e clique **OK**.

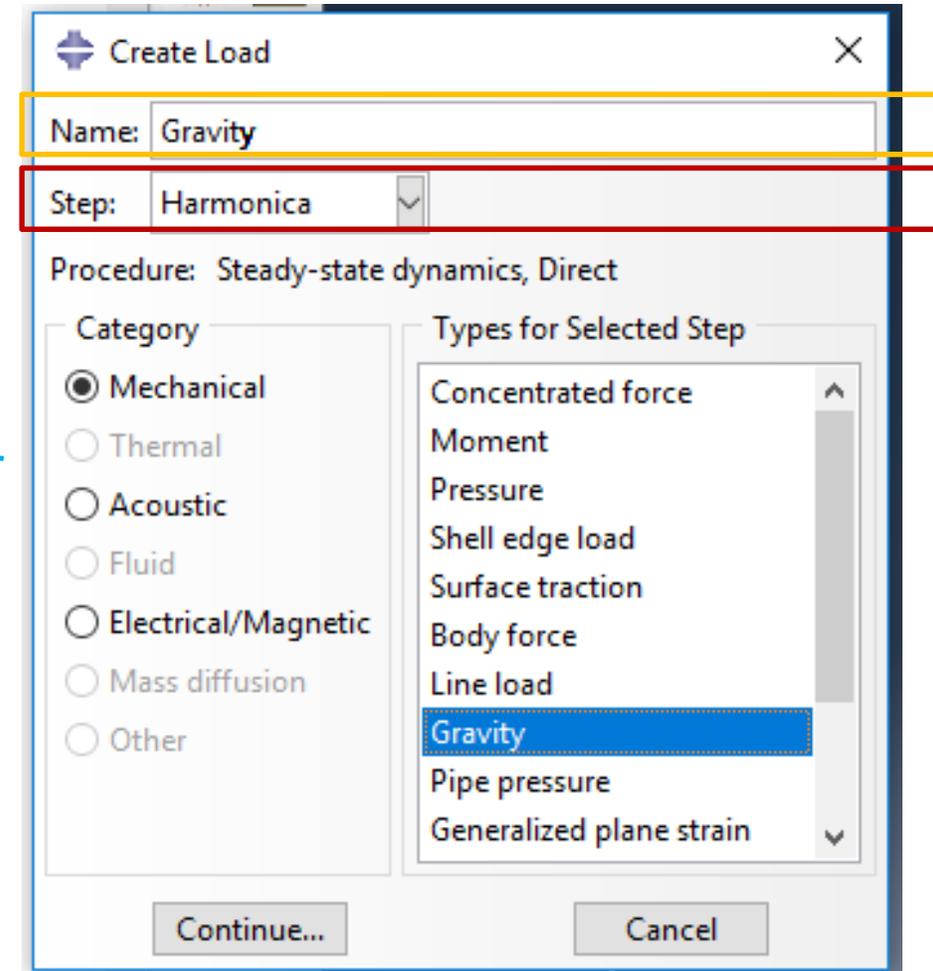
Aplique inicialmente a gravidade



Dê um nome ao carregamento (Gravity);

Ele surge no Step: Harmonica

Na lista de Categorias selecione *Mechanical* e na caixa *Types for Selected Step* disponível selecione *Gravity*, e clique em Continue...





Gravidade de -9800 mm/s na direção y (2).

Edit Load [Close]

Name: Gravity
Type: Gravity
Step: Harmonica (Steady-state dynamics, Direct)
Region: (Whole Model) [Mouse]

Distribution: Uniform [Dropdown] $f(x)$

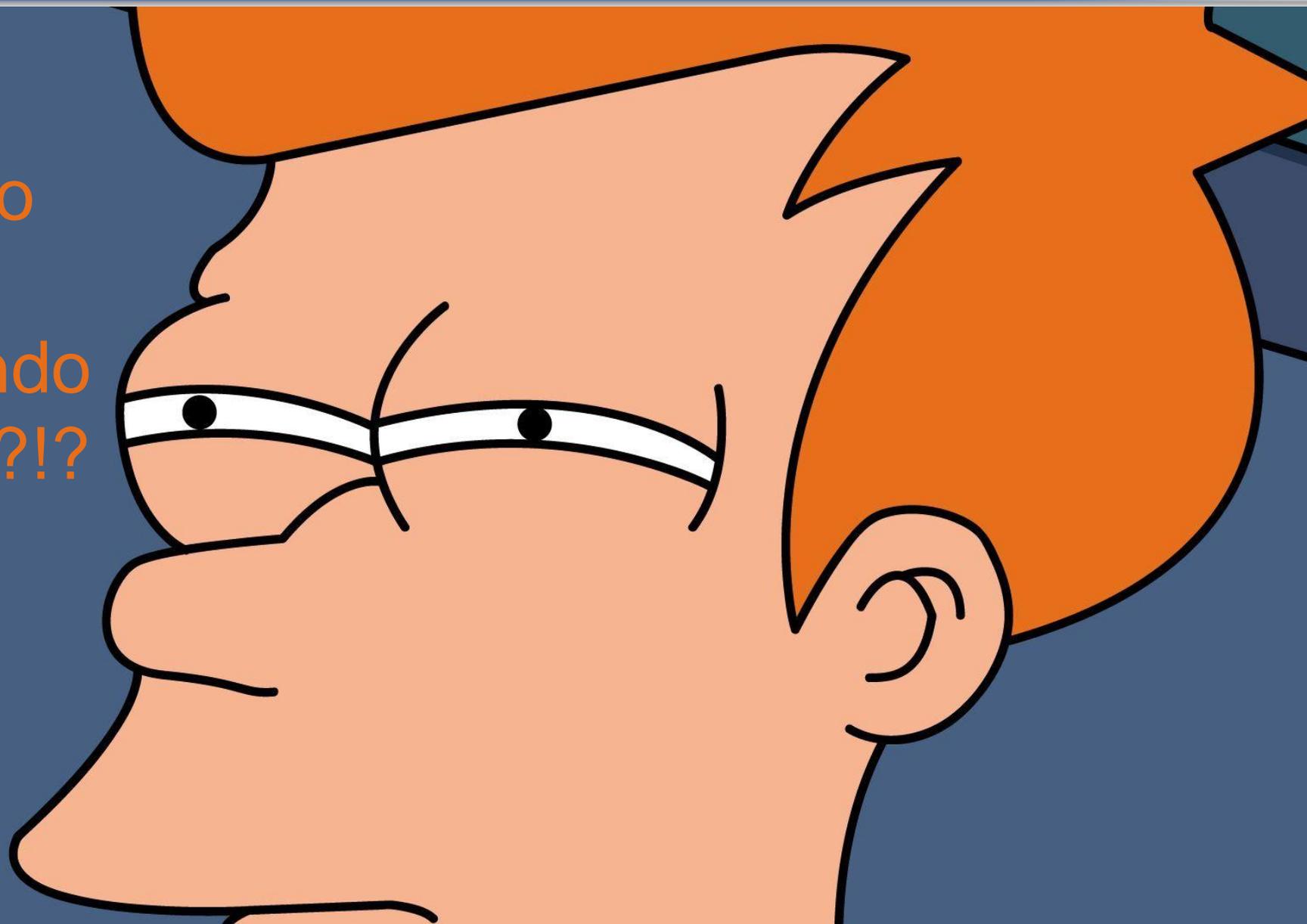
Component 1: 0 + 0 i
Component 2: -9800 + 0 i
Component 3: 0 + 0 i

Amplitude: (Instantaneous) [Dropdown] $f(x)$

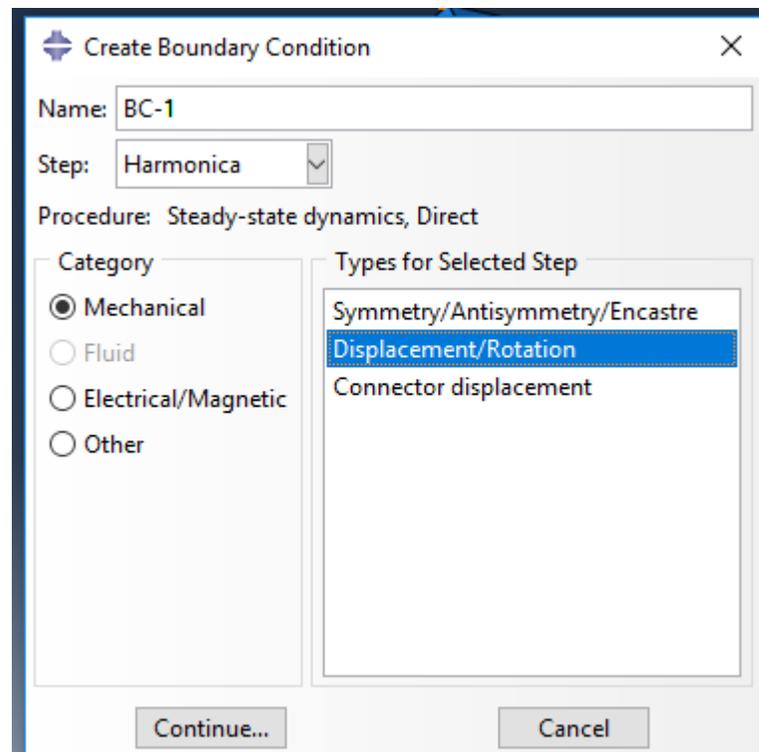
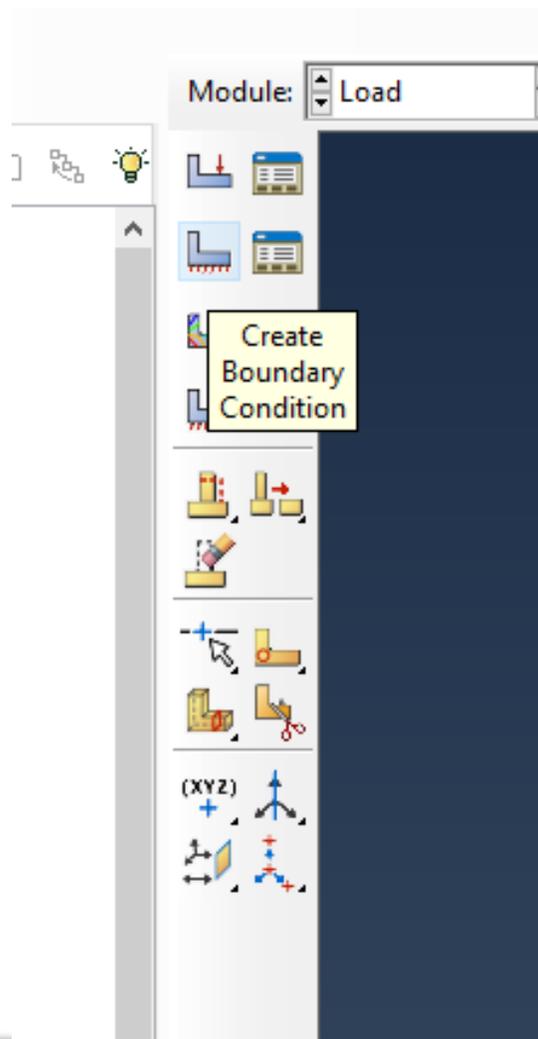
[OK] [Cancel]



Vocês não
estão
esquecendo
de salvar?!?



Agora vamos prender a lateral de nossa viga.



Em Load, clique em “Create Boundary Condition”

- Se quiser, nomeie a condição de contorno
- Selecione Step “Harmonica”, category “Mechanical”
- Para “Types for Selected Step” selecione “Displacement/Rotation”
- Clique “Continue...”



Module: Load Model: Model-1 Step: Harmonica

Selecione toda a face que será engastada. Atenção para selecionar SOMENTE a face lateral da parte BEAM.
Clique "Ok" e depois "Done"

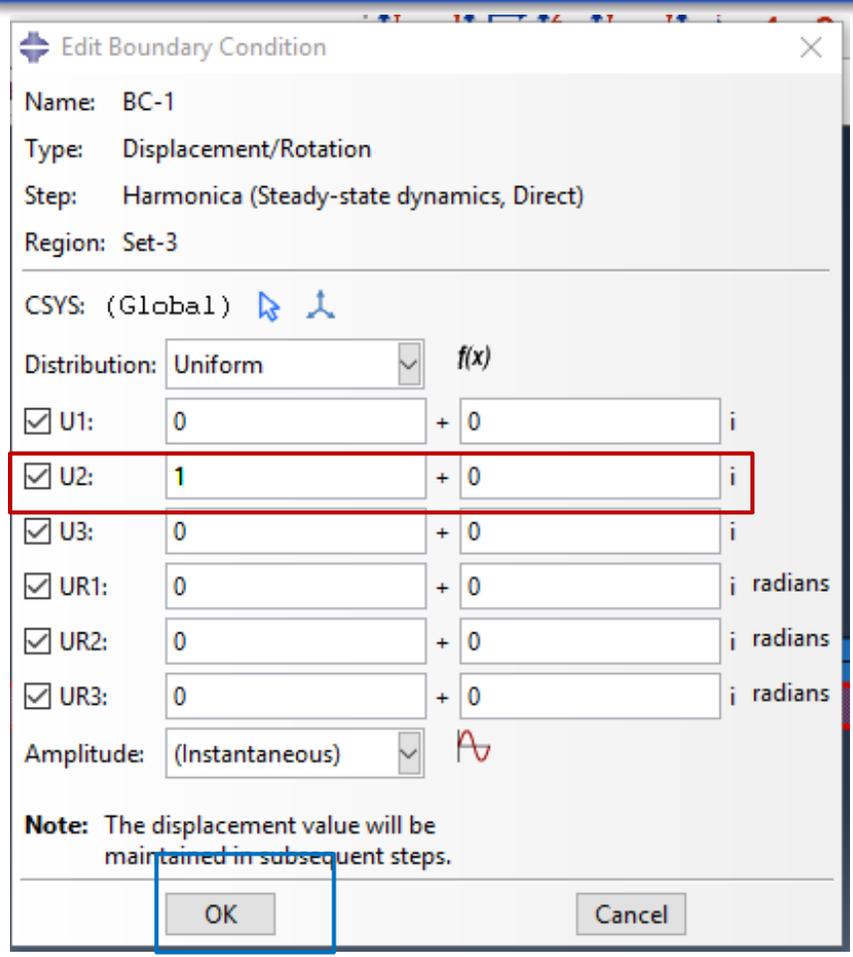
Y
Z

Y
Z

Select regions for the boundary condition (Create set: Set-3) Done

Sets... SIMULIA

* COMO selecionar a face correta da viga?? Girando a viga.



Selecione todos os graus de liberdade.
Verifique que somente U2 terá amplitude unitária, os demais serão zero.



Sua viga mostrará as condições de contorno impostas.

Clique "OK"



Na lista Module, localizada na barra de ferramentas, clique em Mesh para entrar no módulo de malhamento do problema.

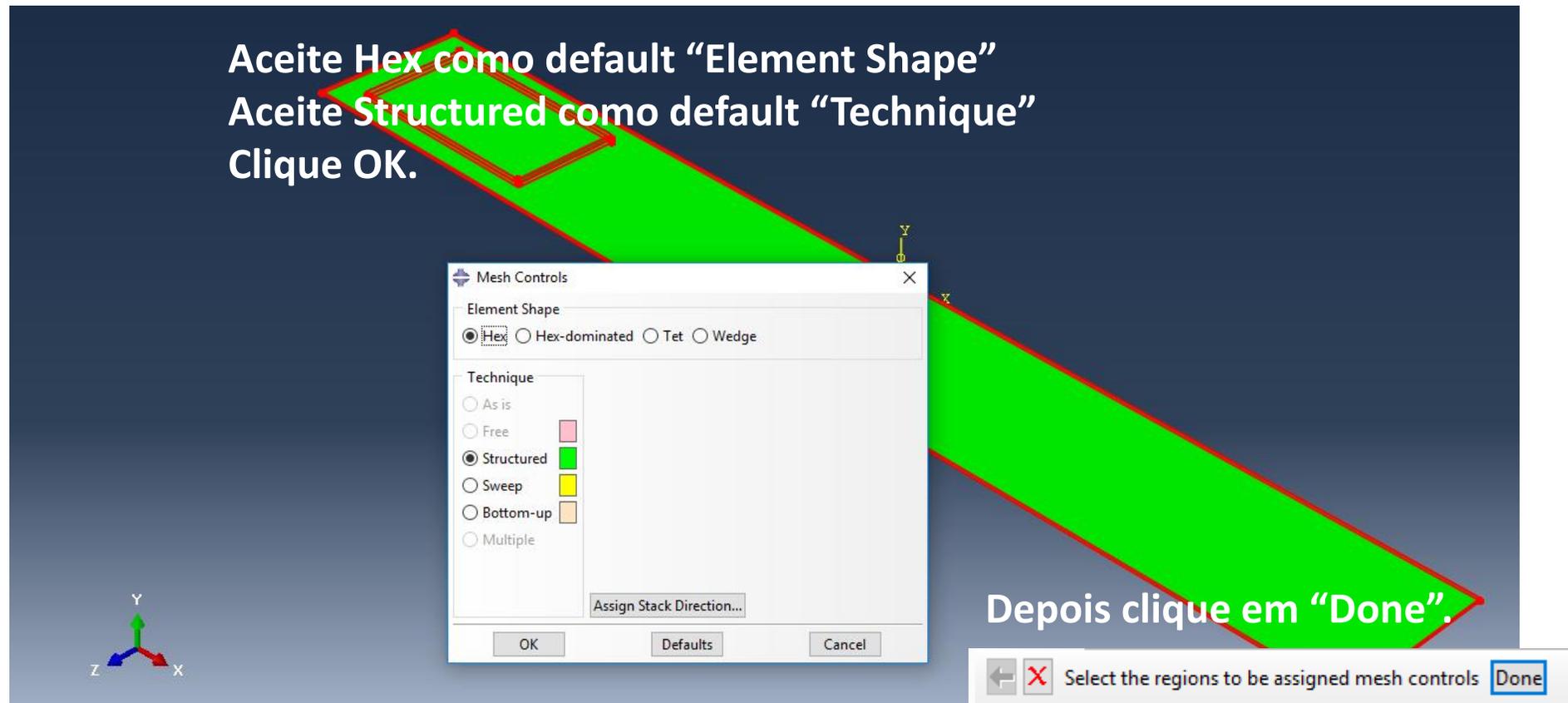
Importante:

Embora você possa criar uma malha em qualquer ponto após a criação da **Assembly**, é uma *boa prática* fazer isso depois de configurar o resto do modelo, já que itens como cargas, condições de contorno e etapas ***dependem da geometria subjacente e não da malha***. Se você faz com que dependam da malha (por exemplo, impõe condições de contorno (cc) nos nós e não na face), cada vez que mudar a malha deverá refazer as cc.

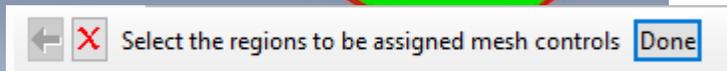


Clique em “Assign Mesh Controls”, selecione todas as partes e clique “Done”. A caixa de diálogo *Mesh Controls* é exibida. ABAQUS colore as regiões do seu modelo para indicar qual técnica ele usará para fazer a malha nessa região. Como usará malhas estruturadas para a viga, exibirá a geometria em verde.

Aceite Hex como default “Element Shape”
Aceite Structured como default “Technique”
Clique OK.



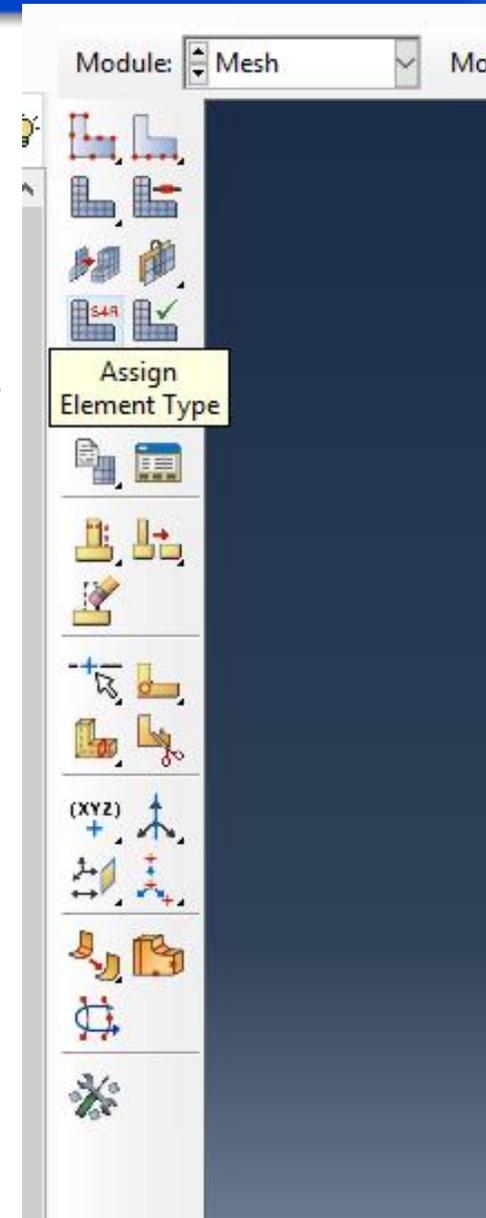
Depois clique em “Done”.



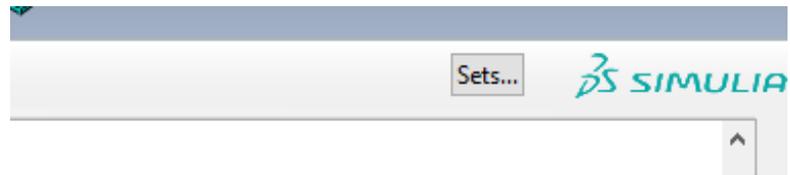


Para escolher o tipo de elemento, primeiro definiremos o tipo das partes EPOXI e BEAM:

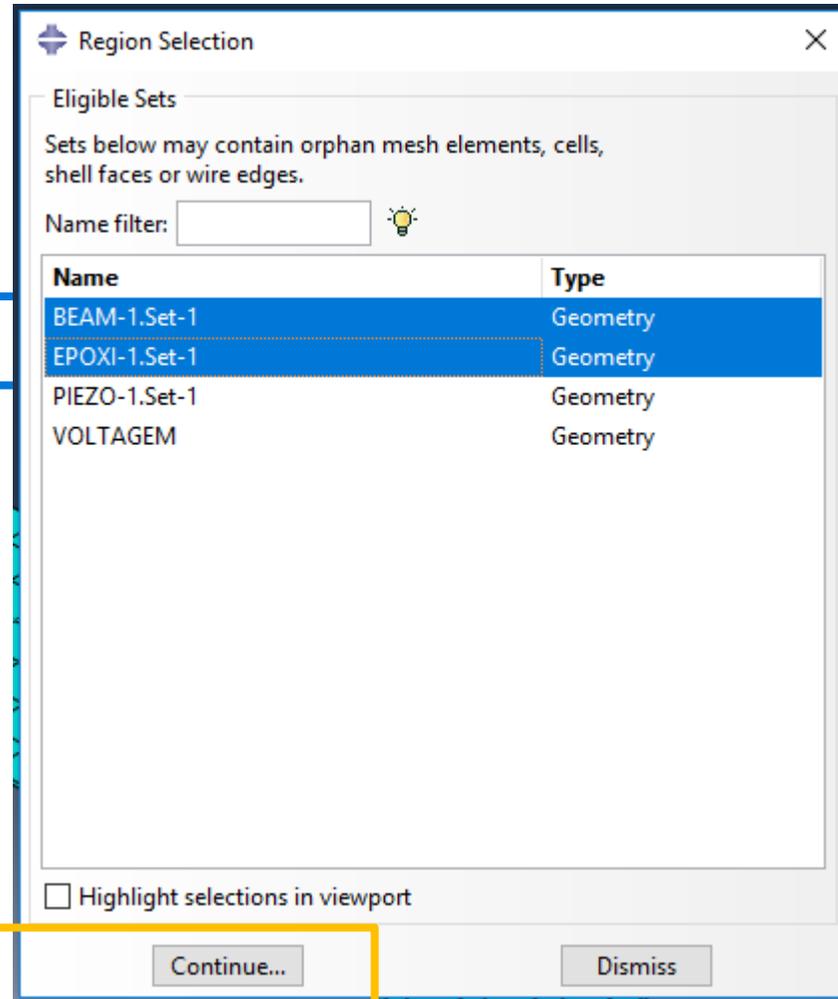
Clique em “Assign Element Type”



Selecione a geometria: "Sets..."



Selecione as partes



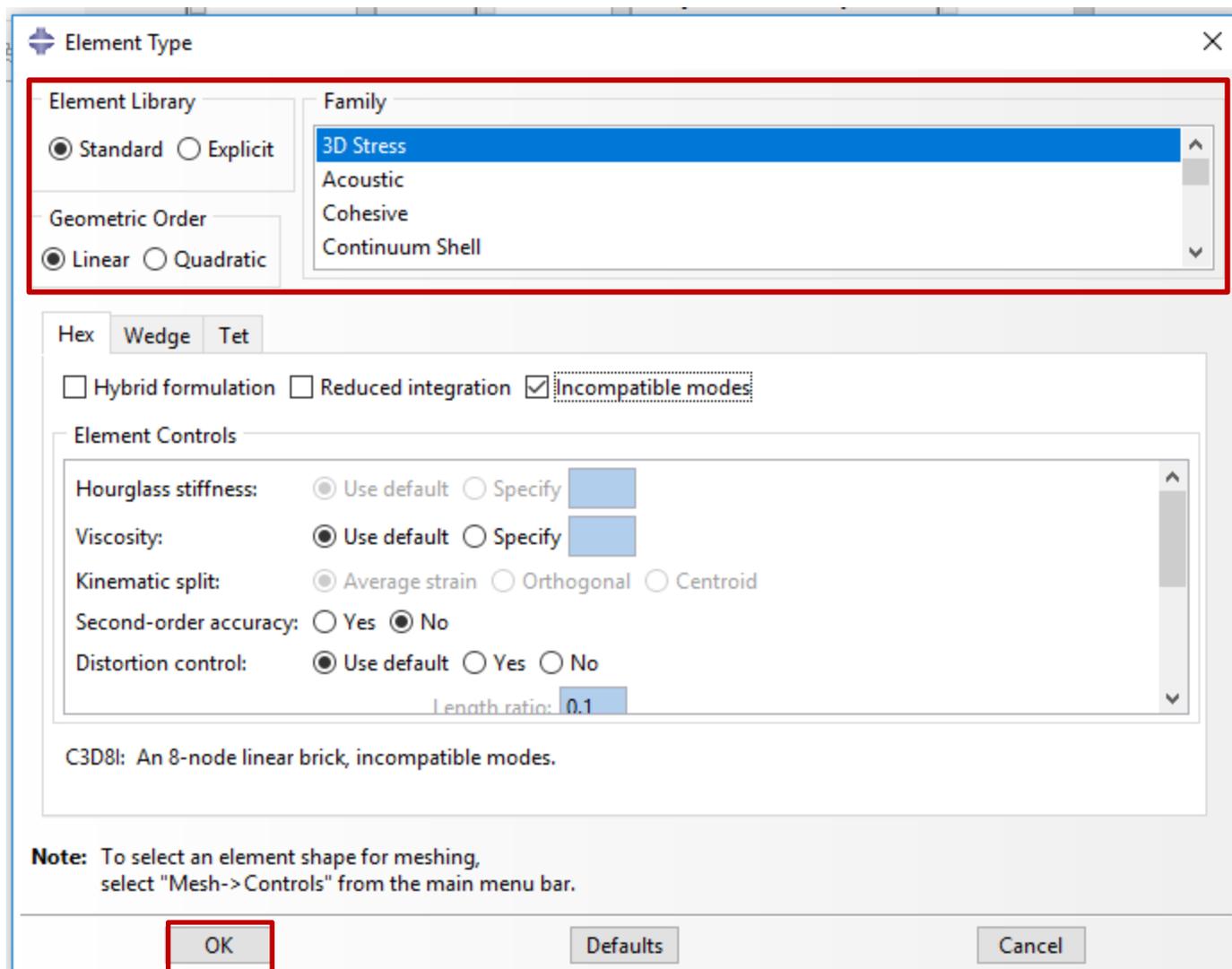
Continue



Na caixa de diálogo que se abriu, aceite as seguintes seleções default que controlam os elementos disponíveis:

- **Standard** é a seleção **Element Library** default.
- **Linear** é a **Geometric Order** default .
- **3D Stress** é a **Family** default dos elementos.

Não clique Ok ainda





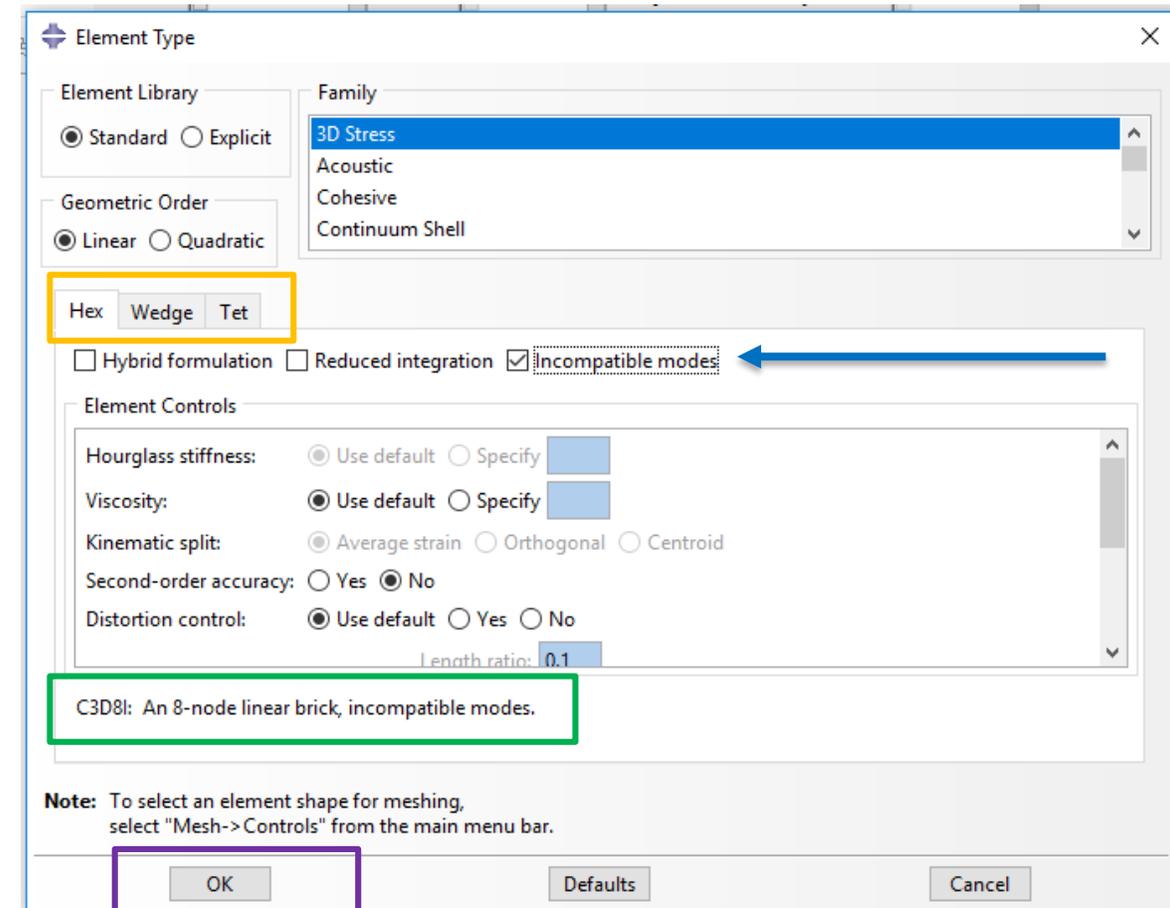
Na parte inferior da caixa de diálogo, examine as opções de forma do elemento. Uma breve descrição da seleção de elemento padrão está disponível na parte inferior de cada aba.

Uma vez que o modelo é um sólido tridimensional, são mostrados apenas os tipos de elementos sólidos tridimensionais - hexaédricos na página **Hex**, prisma triangular na página **Wedge** e tetraédrico na página **Tet**.

Clique na guia **Hex** e selecione **Incompatible modes** na lista de controles de elementos.

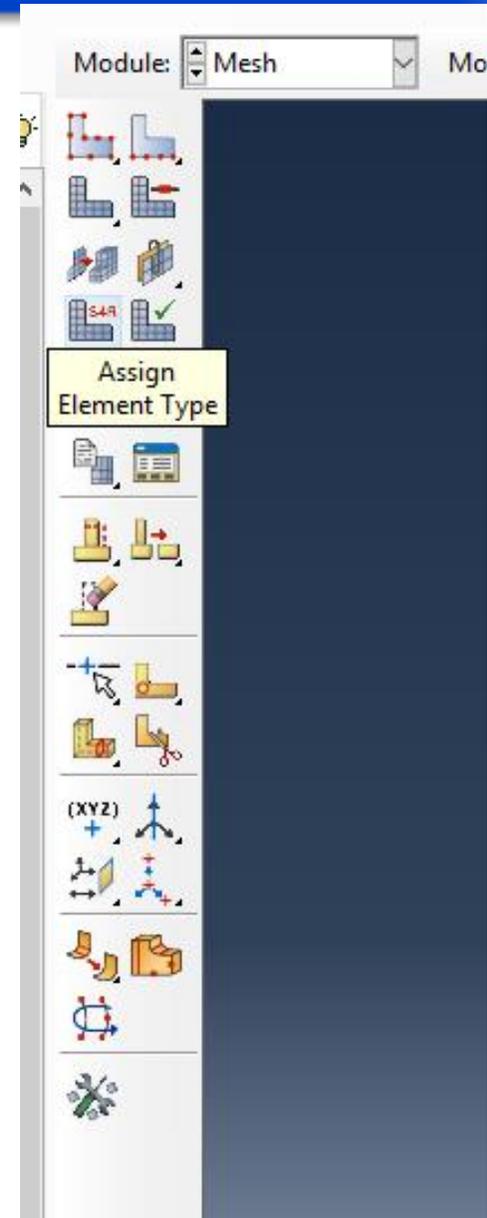
Uma descrição do tipo de elemento C3D8I aparece na parte inferior da caixa de diálogo. O software agora irá associar elementos C3D8I com os elementos na malha.

Clique OK



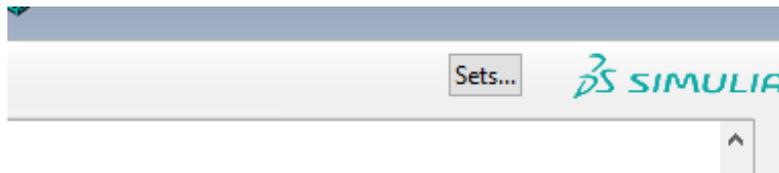


Clique em “Assign Element Type”

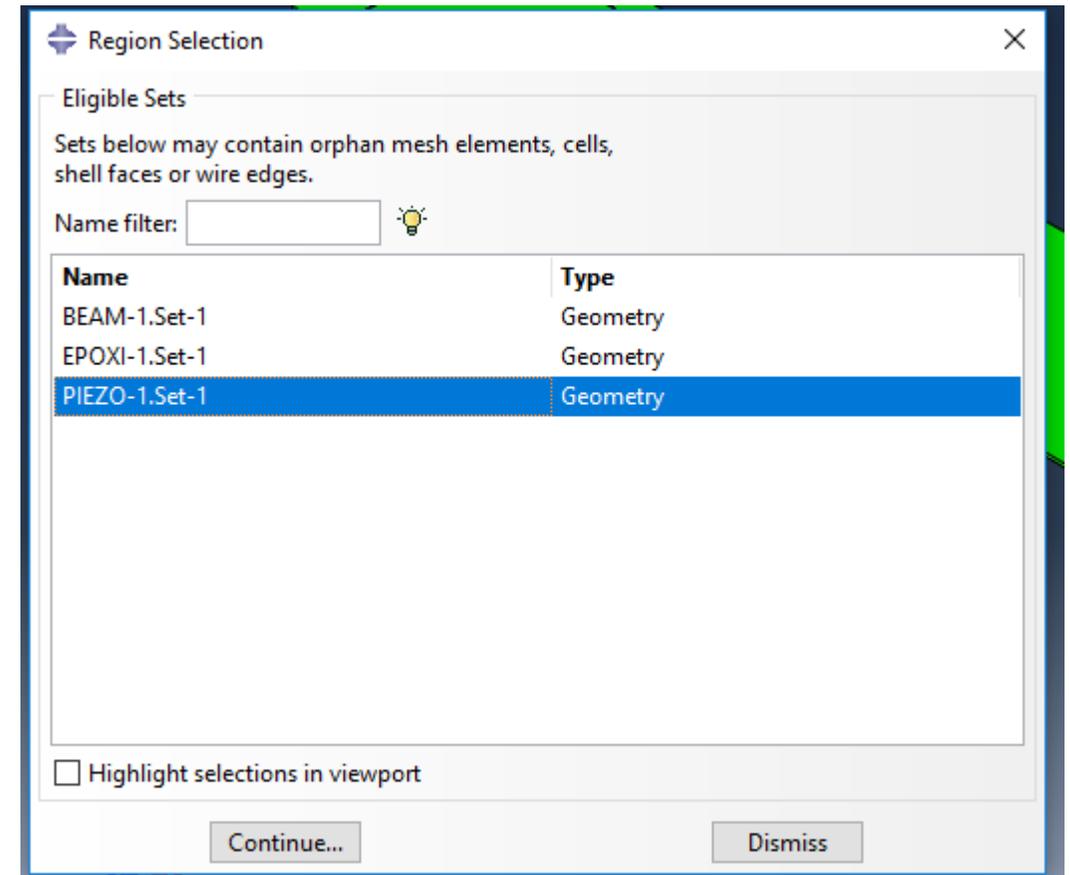


Agora definiremos o tipo da parte PIEZO:

Seleção a geometria: "Sets..."

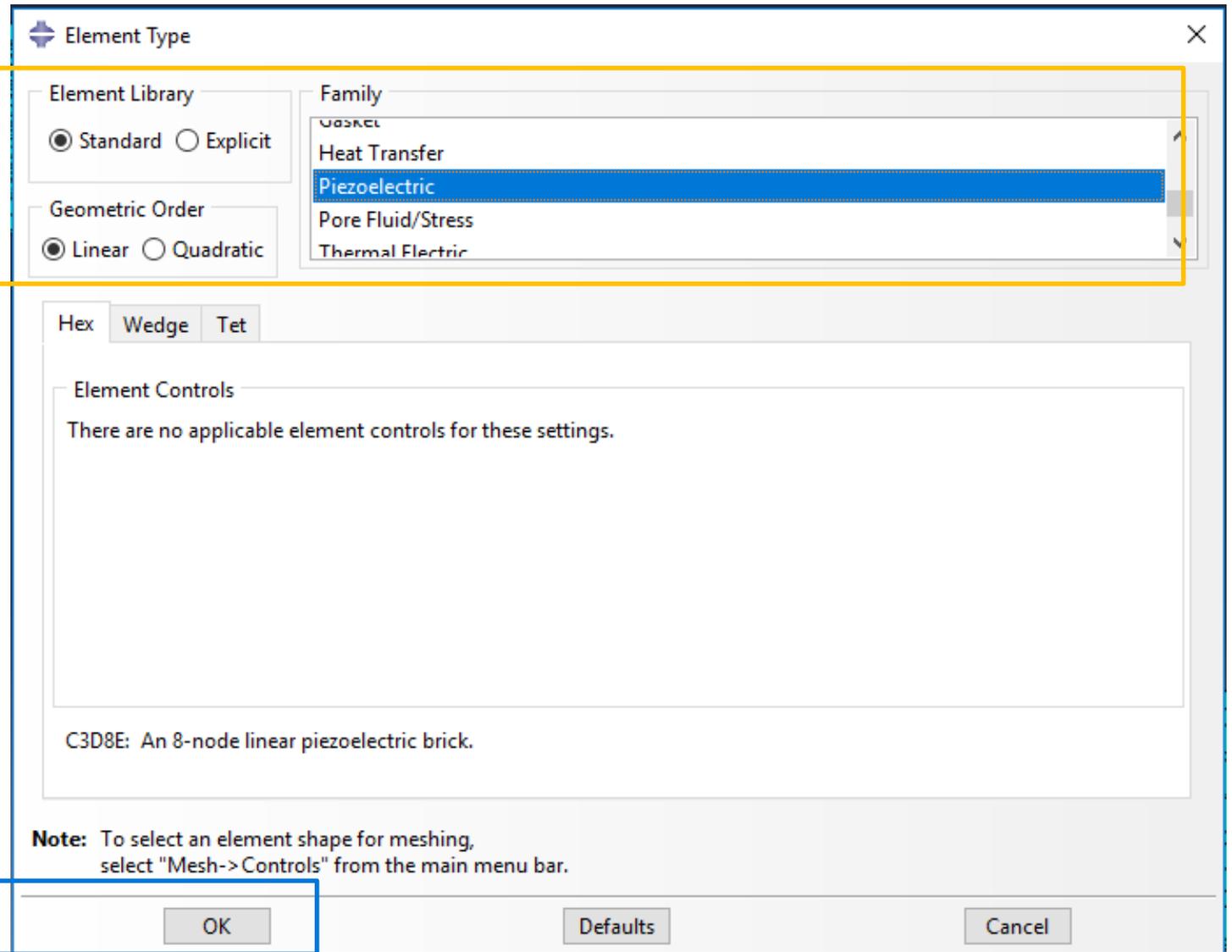


- Seleção a parte;
- "Continue";





Escolha, em "Family",
o elemento *Piezoelectric*

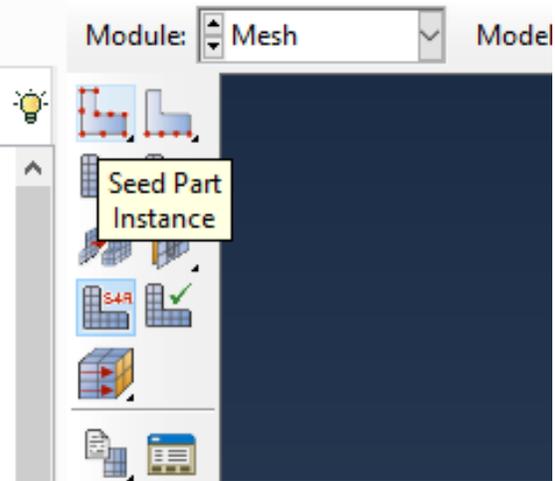


OK

OK

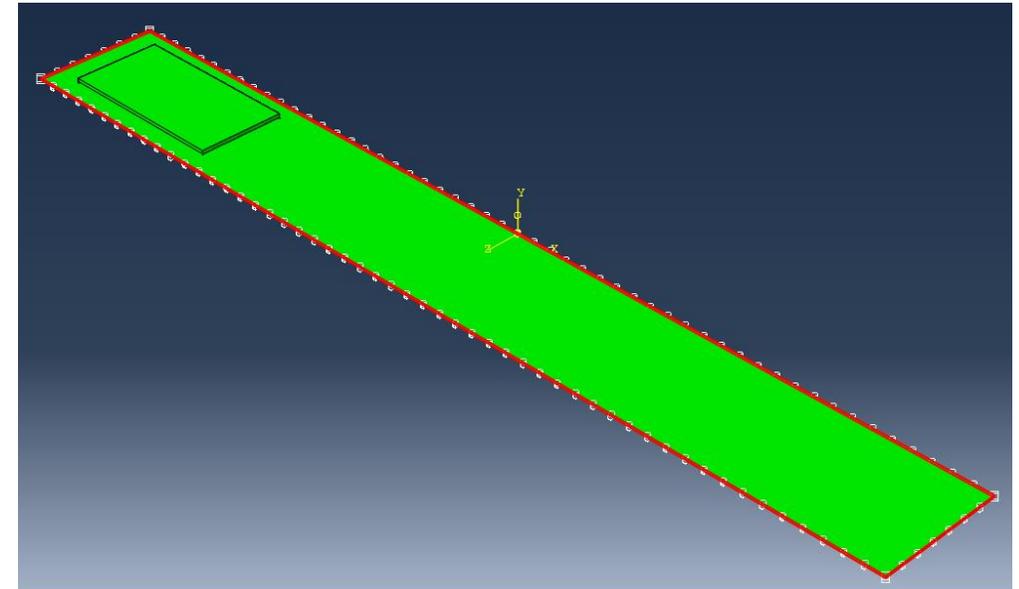
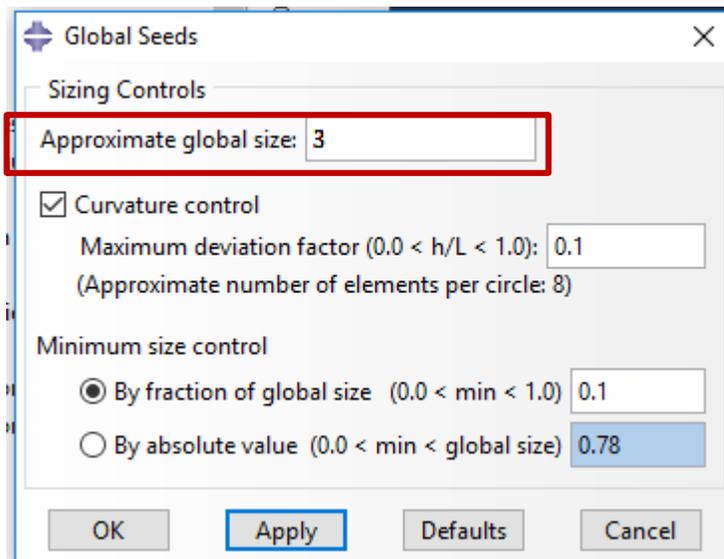
Defaults

Cancel



Clique em “Seed Part Instance” para definir a dimensão da malha, selecione a parte BEAM e clique “Done”.

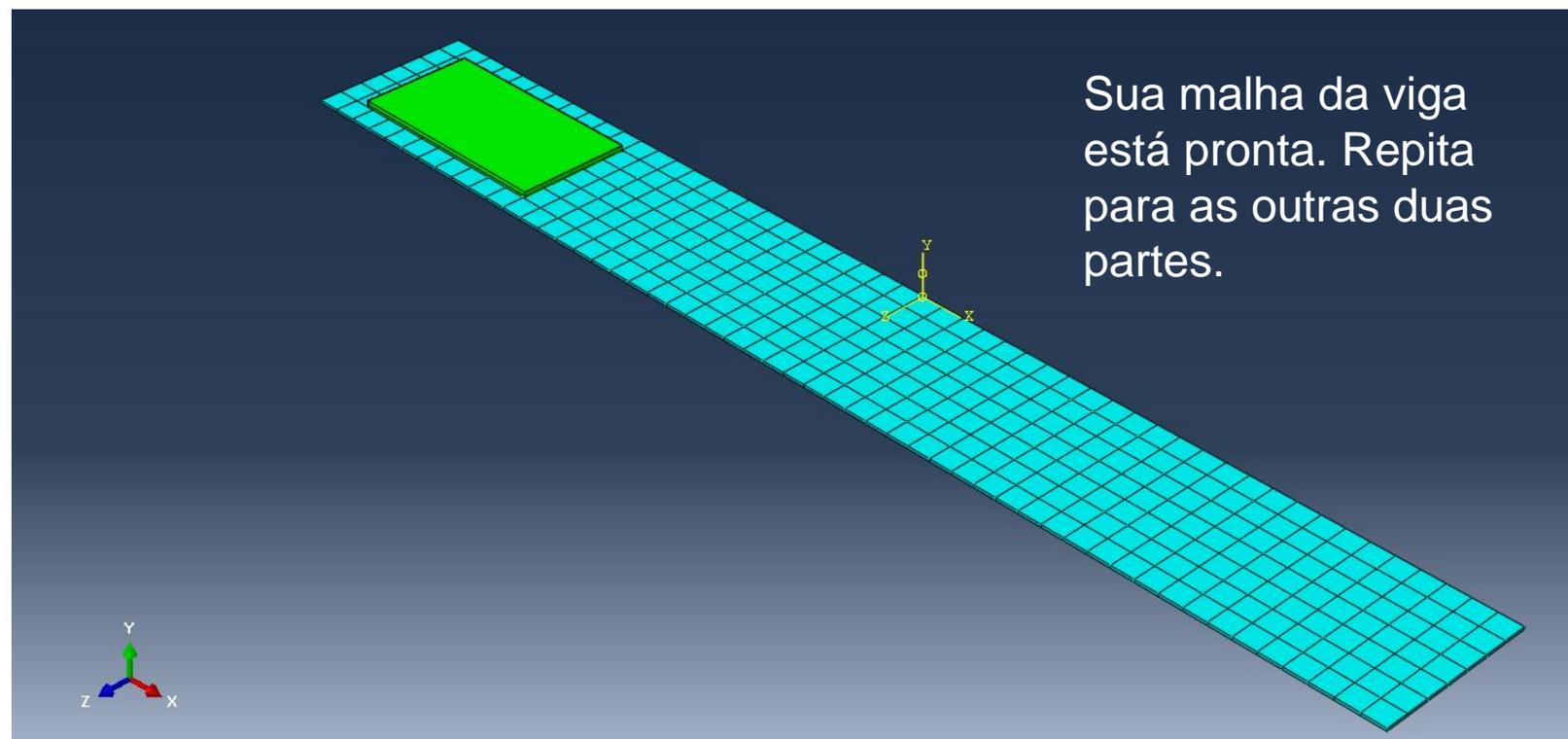
Escolha uma dimensão aproximada para seu elemento. Em geral, menor elemento, maior precisão, maior custo computacional.



Essa será a visão da viga no Viewport



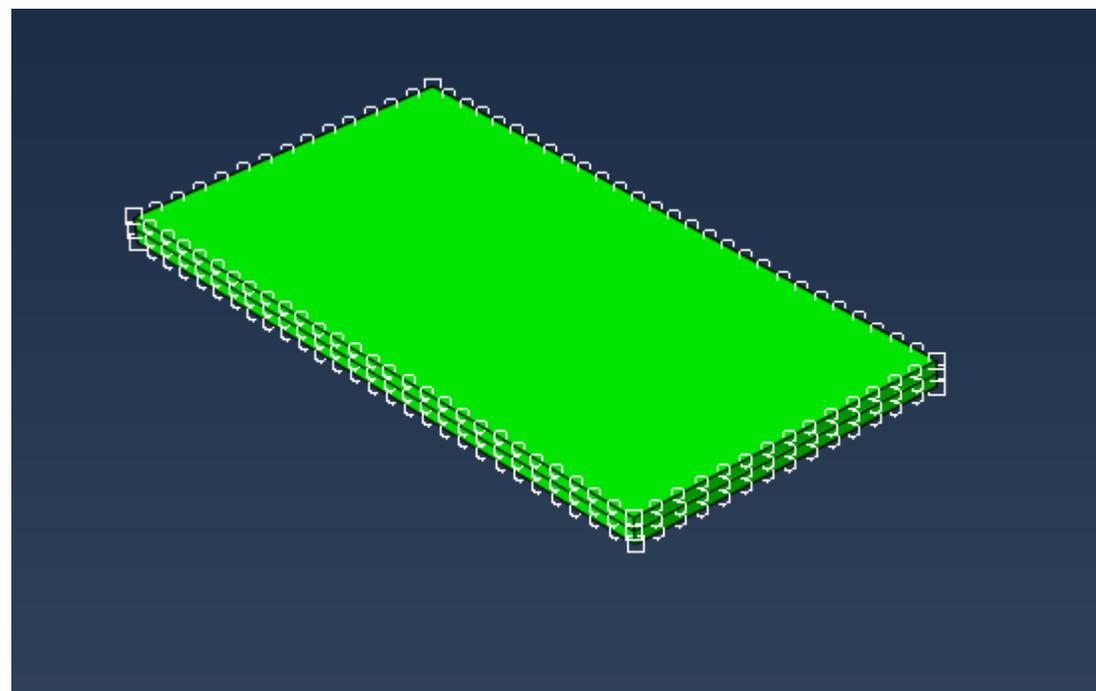
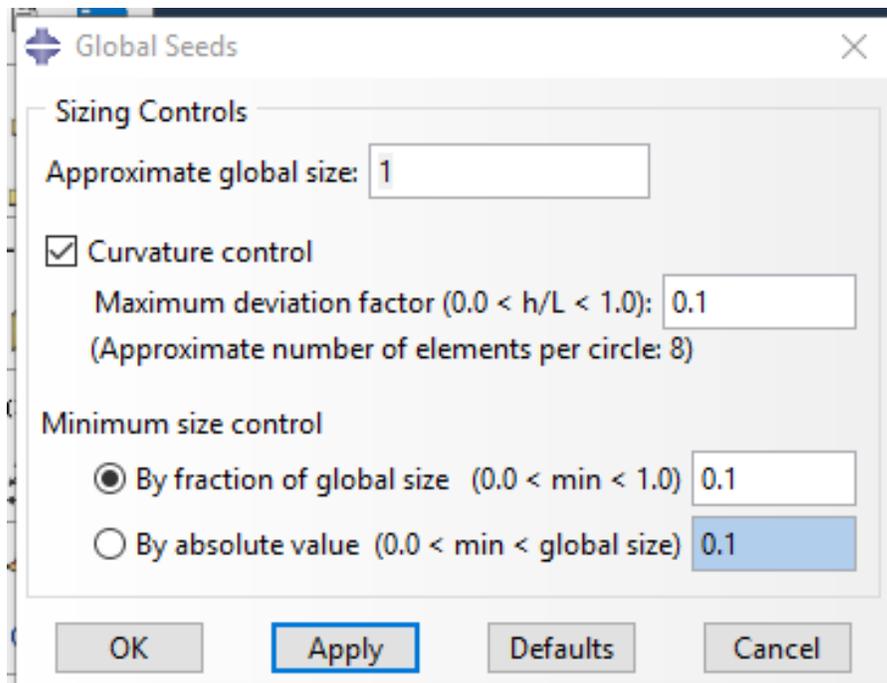
Clique em “Mesh Part Instance” para gerar a malha e selecione a parte BEAM e clique em “Done”.

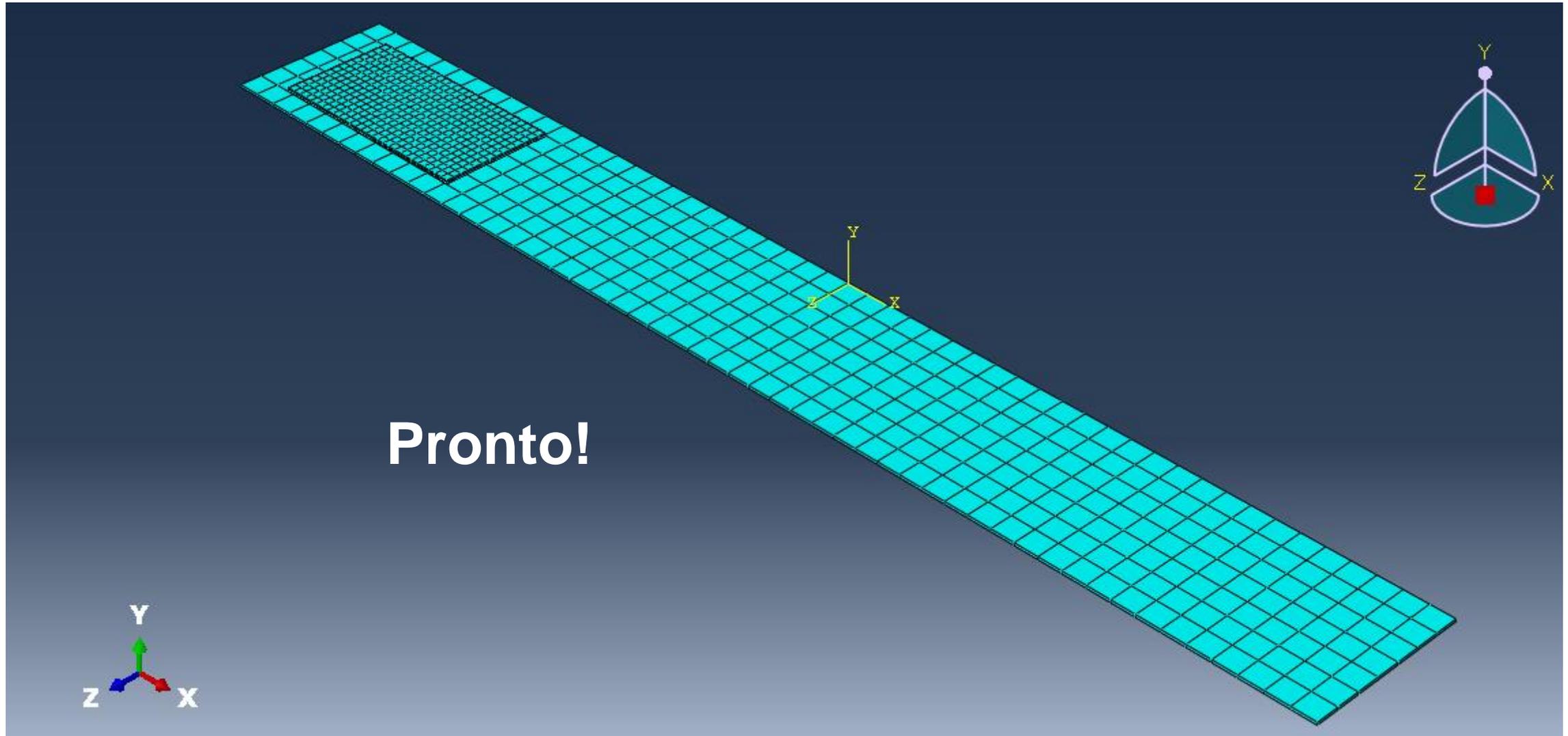


Sua malha da viga está pronta. Repita para as outras duas partes.



Lembre-se, primeiro “Seed Part Instance”, depois “Mesh Part Instance”.
Se ficar mais fácil, “delete” a viga.

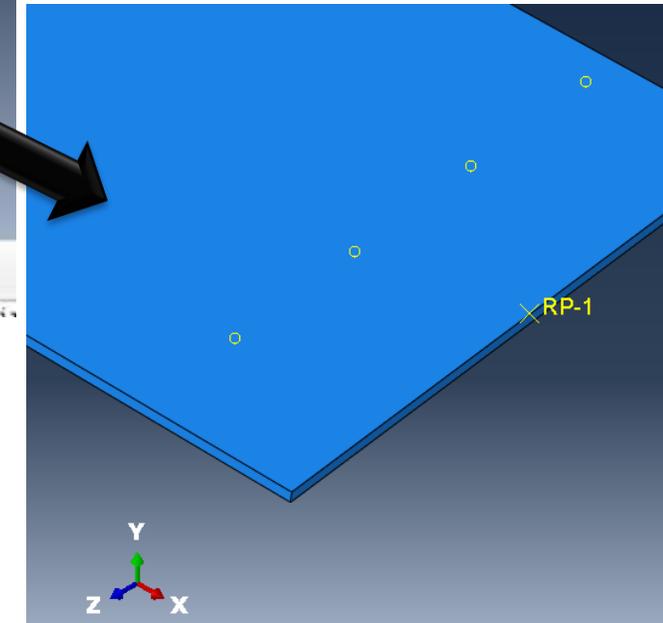
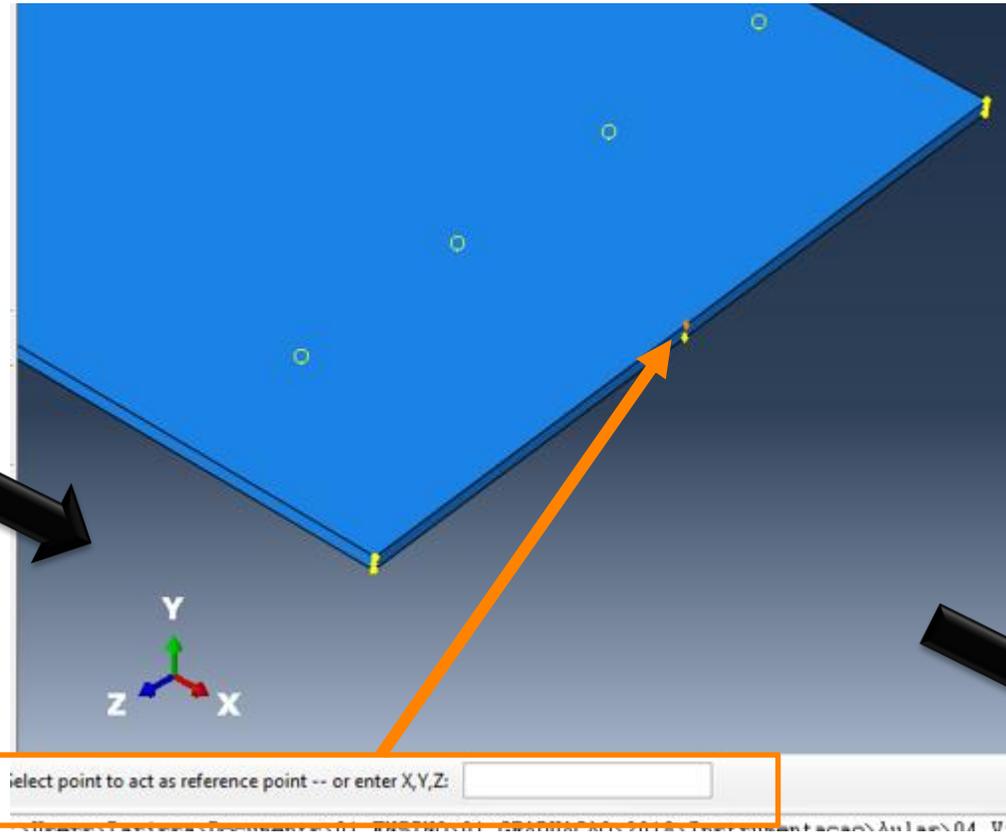
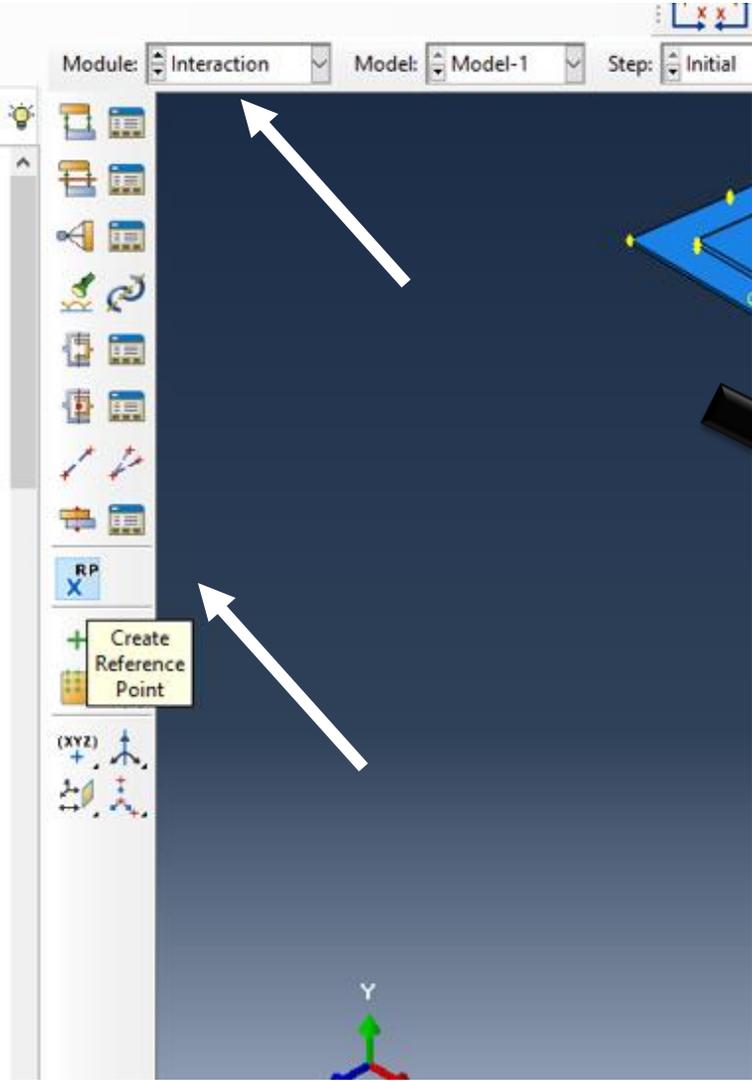






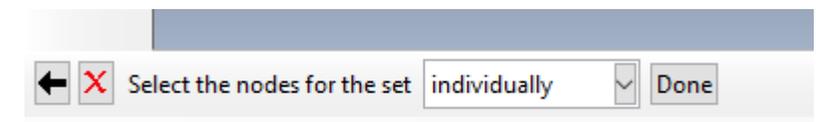
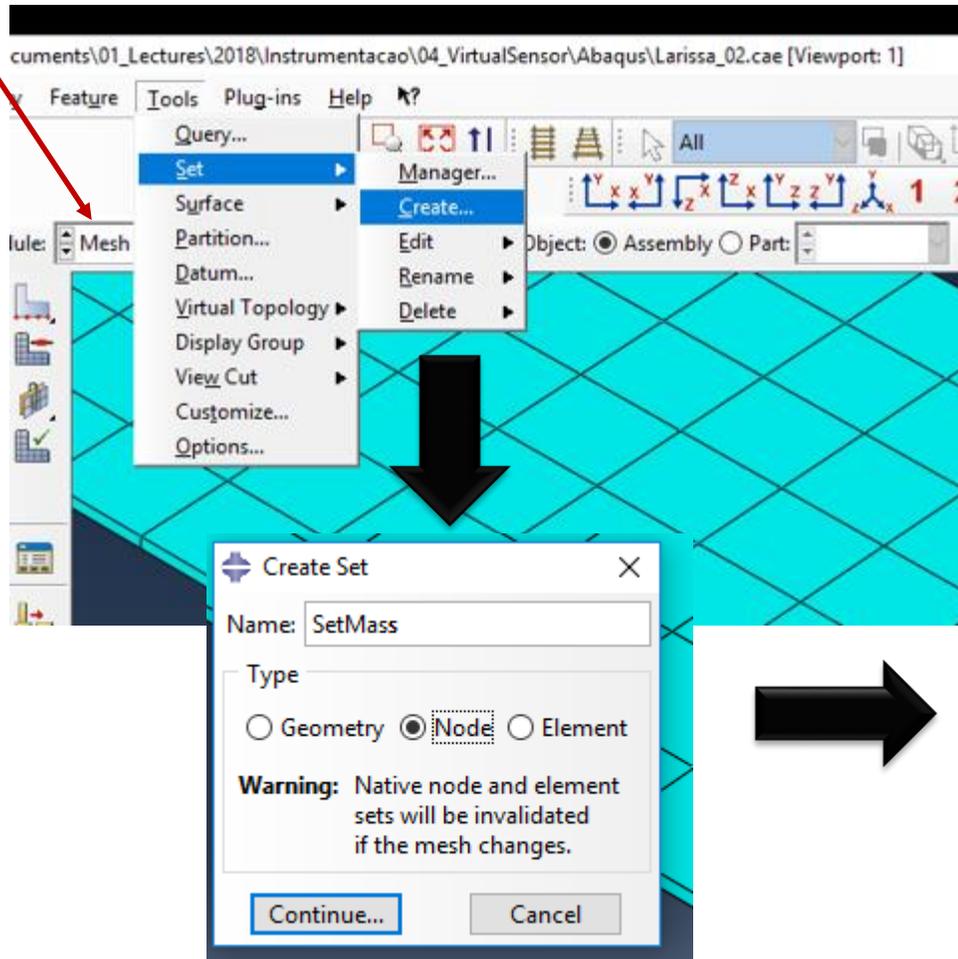
- No módulo Assembly há a opção de “Engineering Features”. Ali colocaremos a massa concentrada;
- Para controlar a região de distribuição da massa, ela será aplicada em um ponto de restrição (*constraint point*) de um **acoplamento cinemático**, que deve ser criado no módulo “Interaction”.
- Vamos por parte...
 - Criamos o ponto (Mass) onde colocaremos a *Feature* (que no caso será a massa de 1,6g) ;
 - Criamos a região (SetMass) onde essa Feature será distribuída;
 - Fazemos um acoplamento cinemático entre o ponto Mass e a região SetMass.
- Existem outras maneiras de fazer isso? **COM CERTEZA!** Essa foi a que consideramos mais simples para um tutorial já bastante complexo... Você pode tentar outras maneiras, se já for um expert do Abaqus...

Primeiro criaremos o ponto...

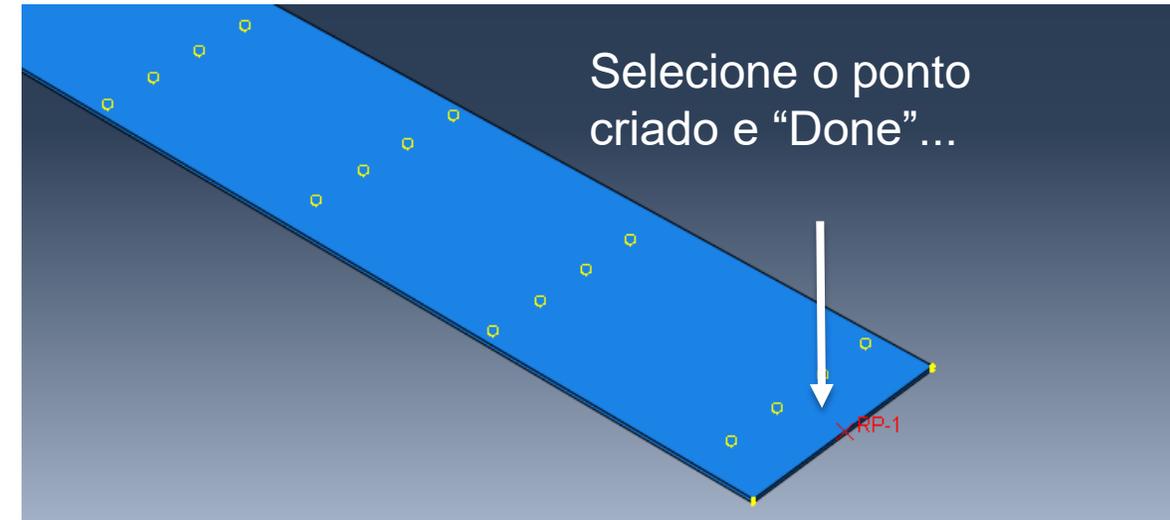
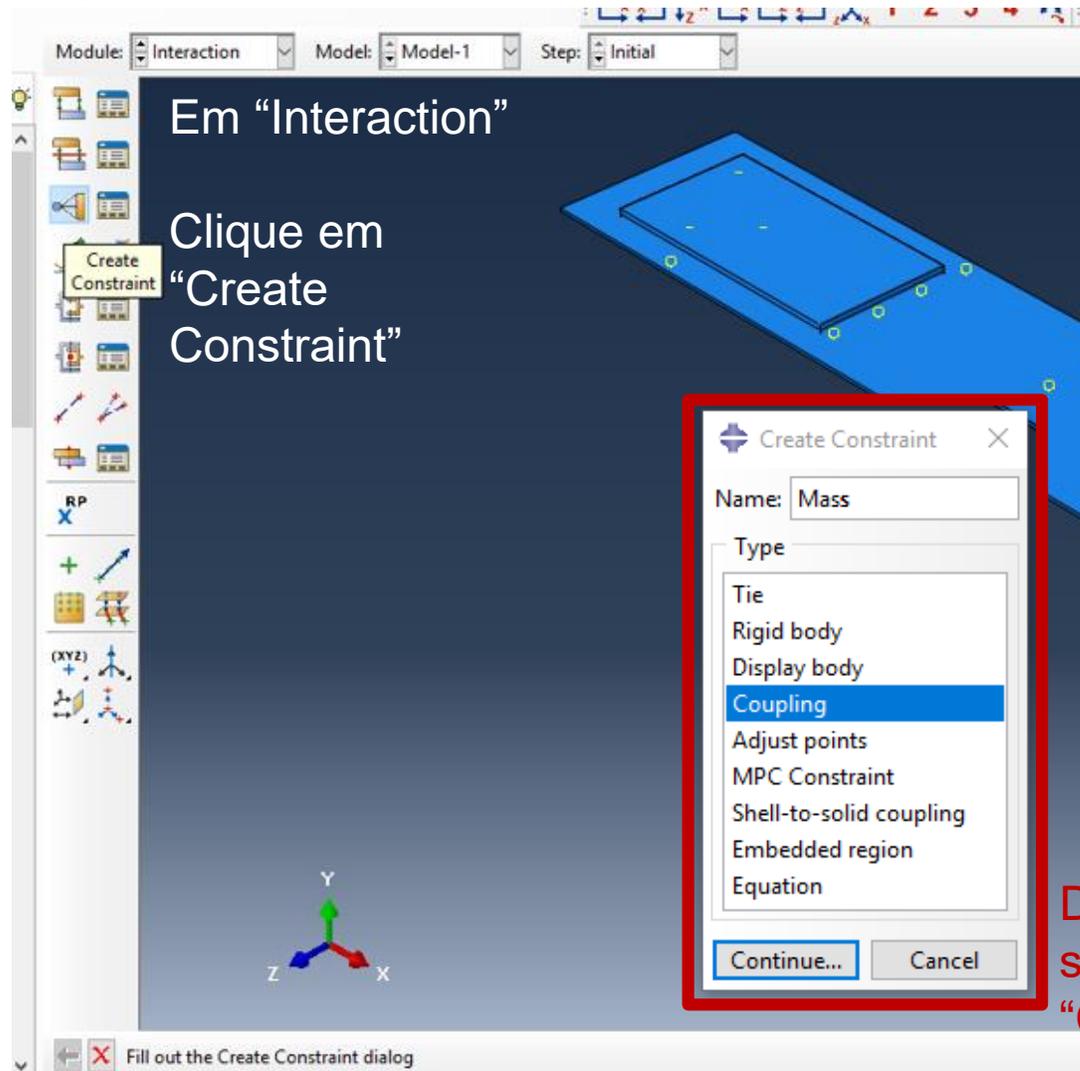


Agora criaremos um Set com os nós onde se distribuirá a massa

Module "Mesh"



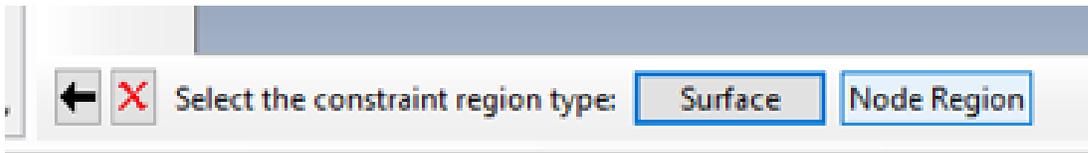
Agora criaremos o acoplamento cinemático do ponto com os nós da parte BEAM.



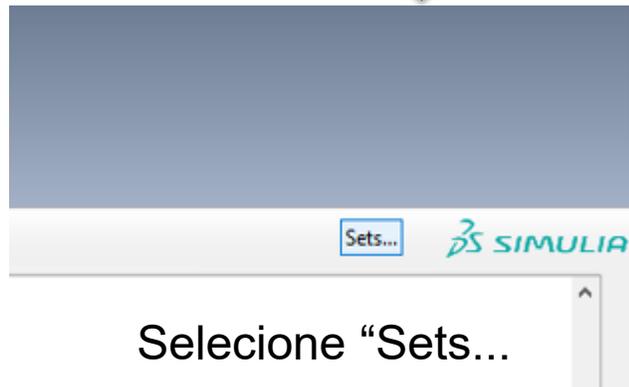
Dê um nome e selecione "Coupling" e "Continue..."



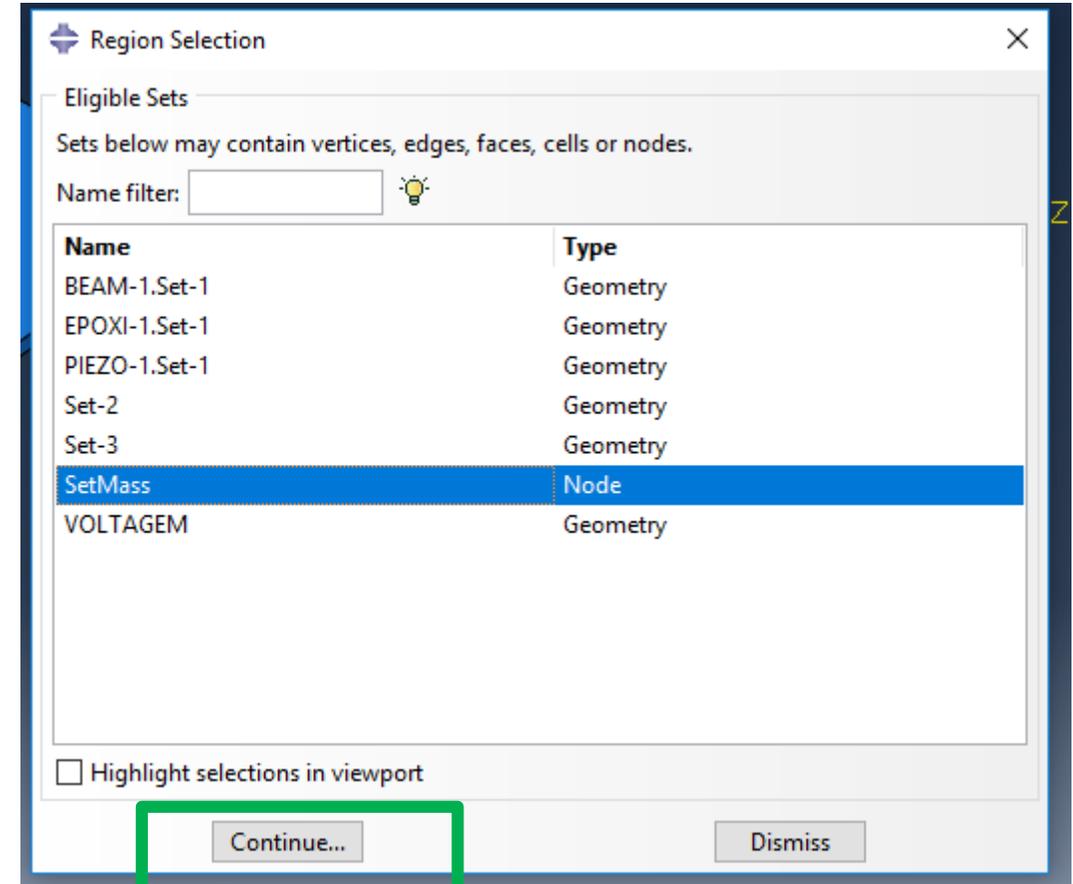
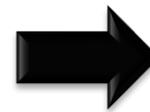
Selecione o Set de nós da superfície superior da parte BEAM...



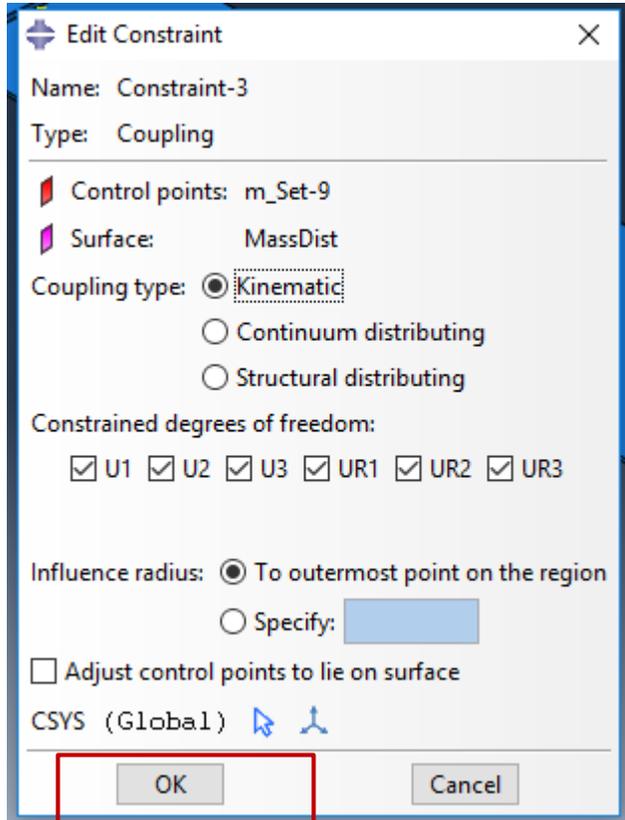
Selecione "Node Region"



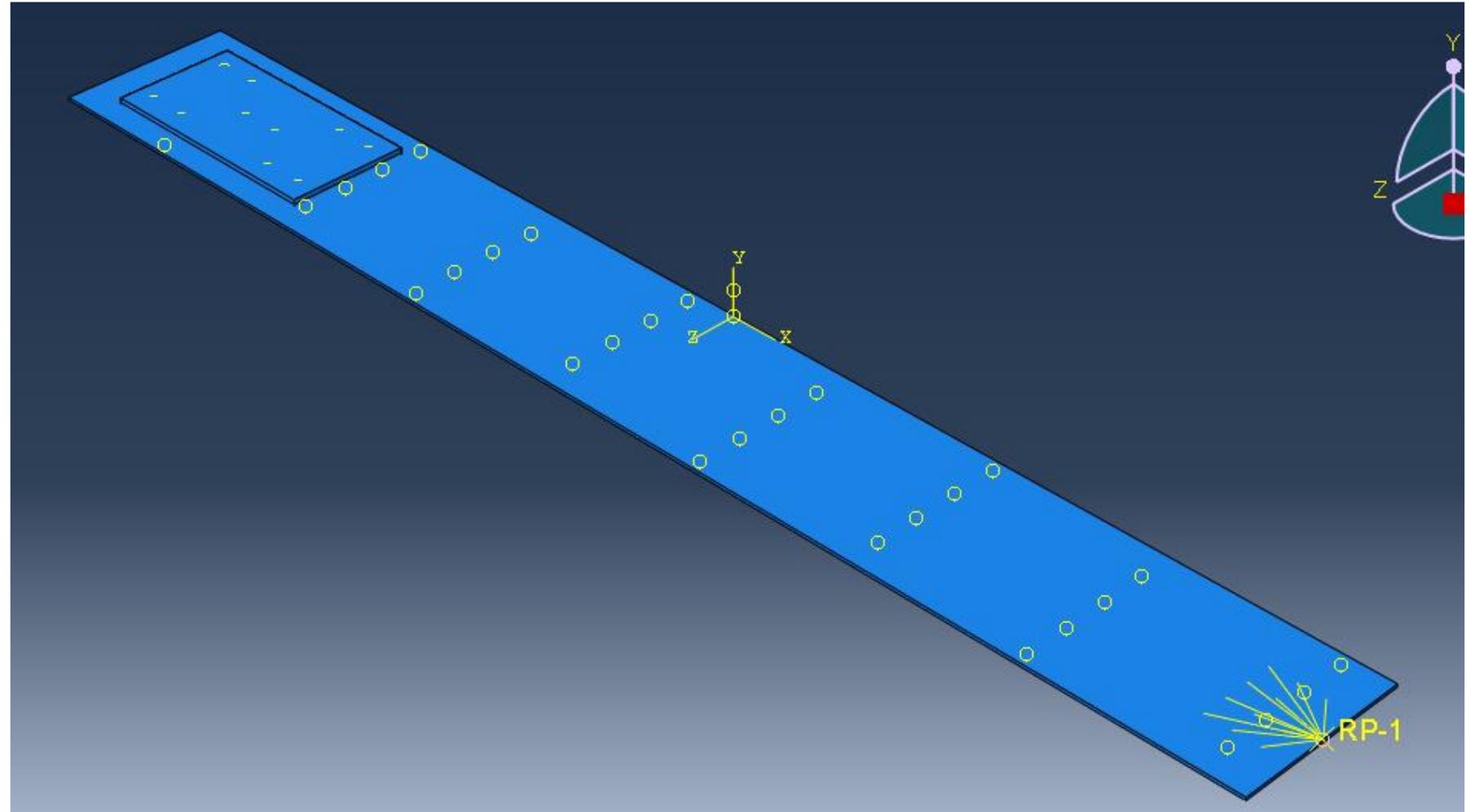
Selecione "Sets..."

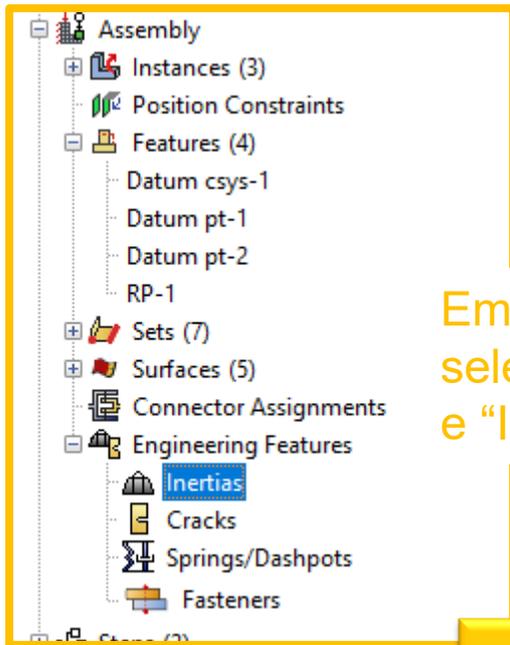
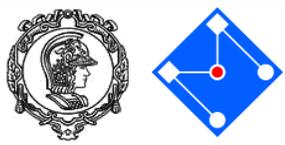


Continue

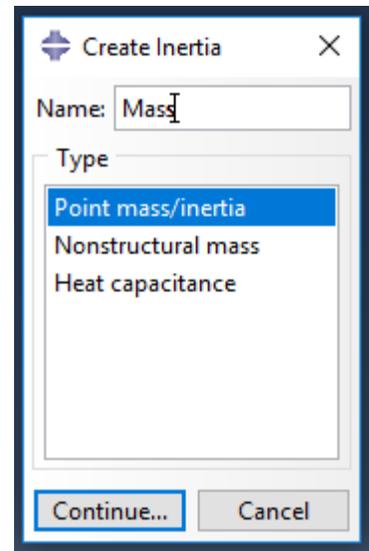


OK



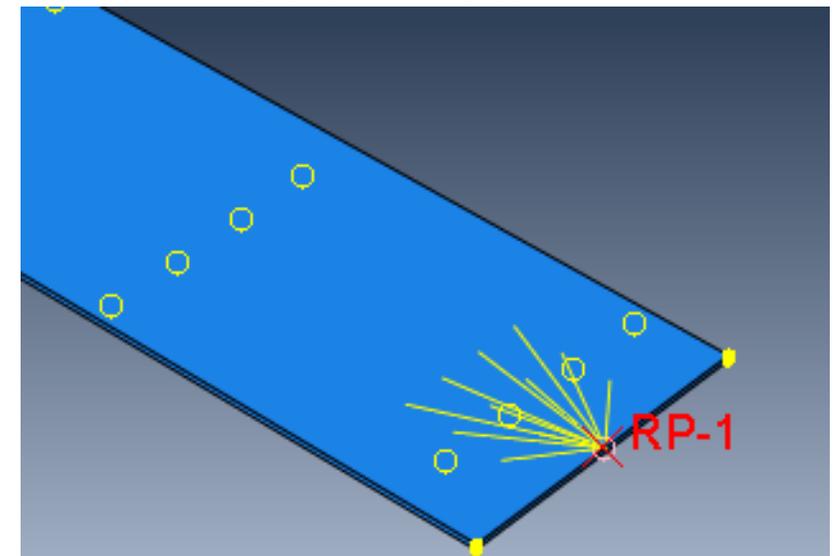


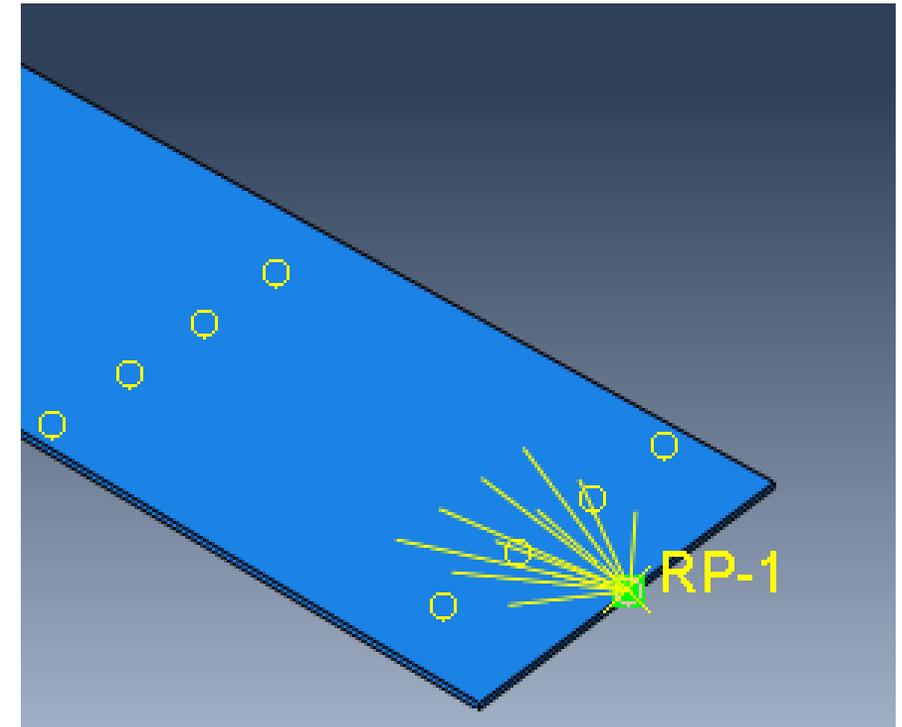
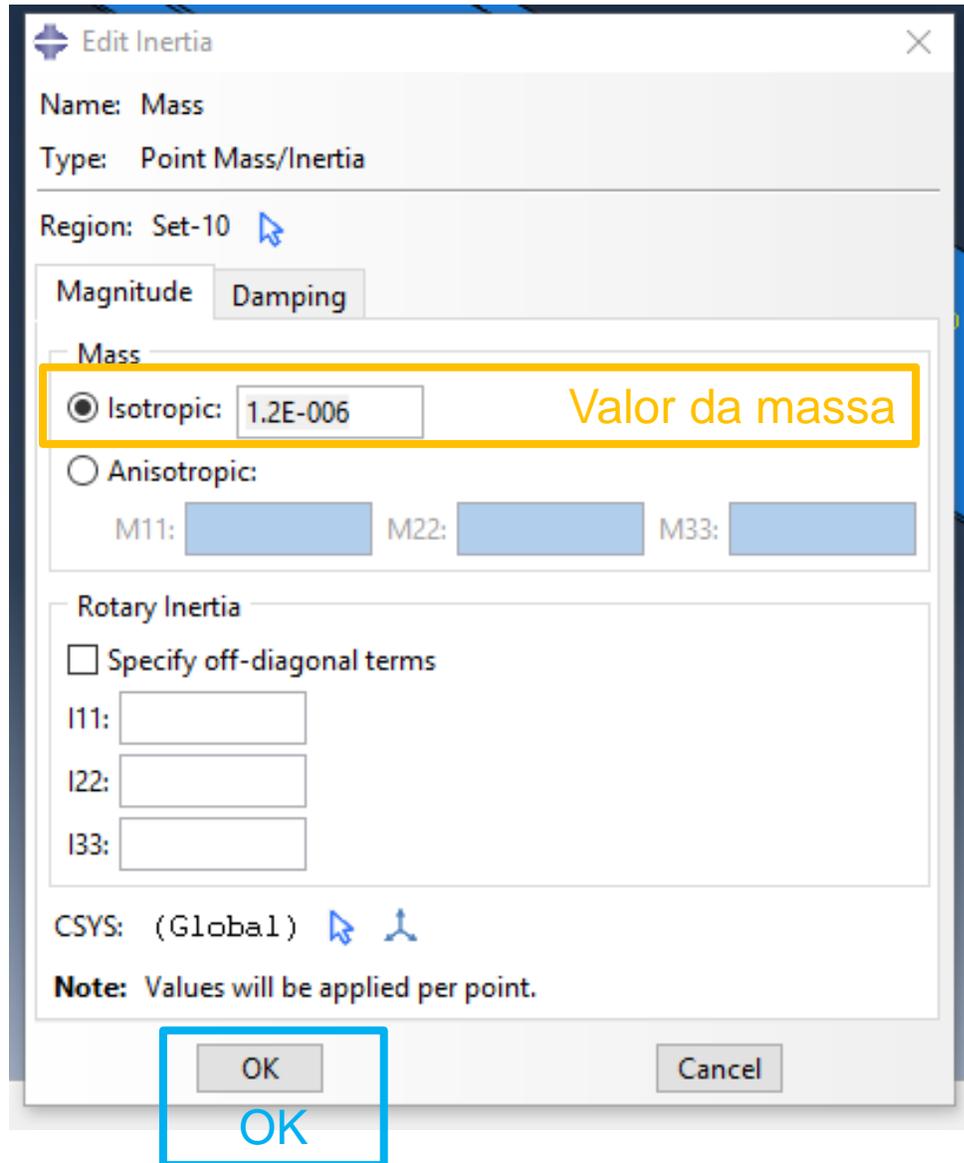
Em "Assembly",
selecione "Engineering Features"
e "Inertias"

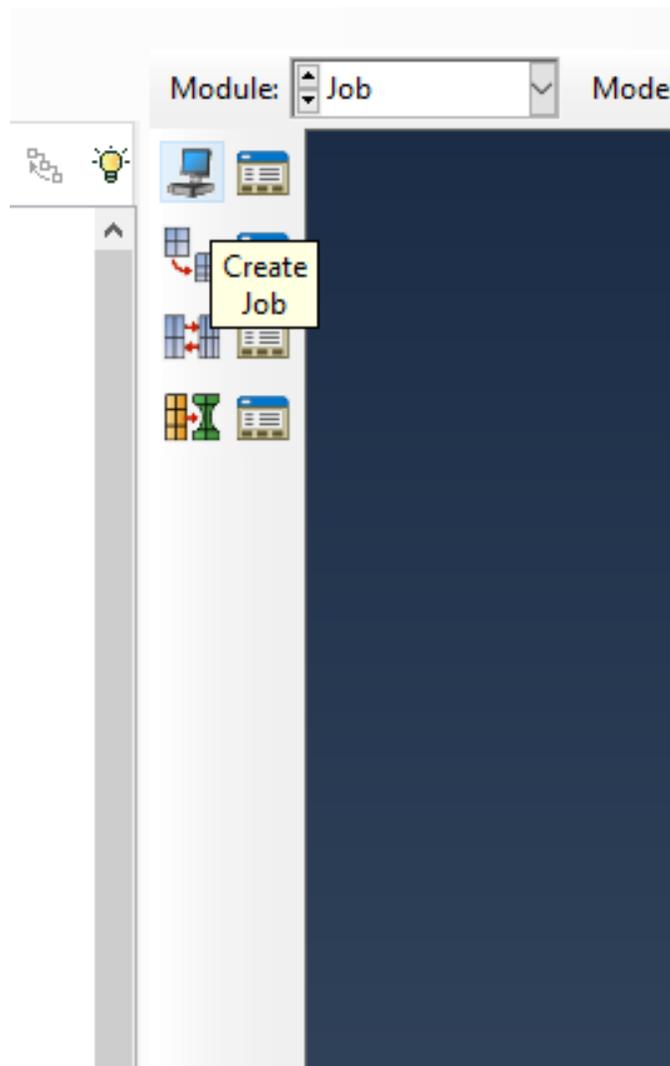


Selecione o ponto que você acabou de
gerar um acoplamento cinemático com
os nós da parte BEAM e "Done"

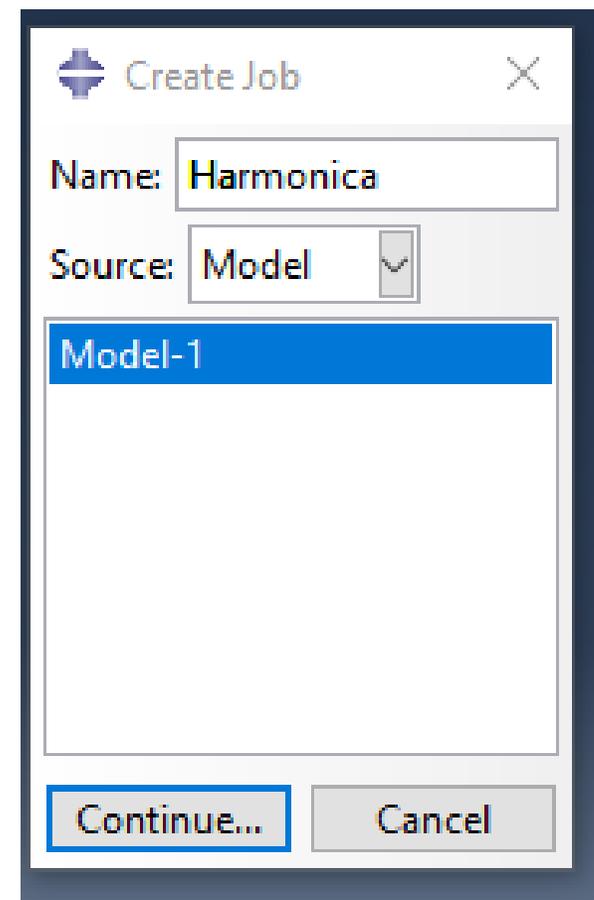
Select points to assign point mass/inertia (Create set: Set-7) Done







Clique em “Create Job”
Dê um nome para seu Job (Harmonica)
Clique em “Continue...”





Edit Job

Name: Harmonica

Model: Model-1

Analysis product: Abaqus/Standard

Description:

Submission General Memory **Parallelization** Precision

Job Type

Full analysis

Recover (Explicit)

Restart

Run Mode

Background Queue: Host name:
Type:

Submit Time

Immediately

Wait: hrs. min.

At:

OK **Clique "OK".** Cancel

Edit Job

Name: Deform

Model: Model-1

Analysis product: Abaqus/Standard

Description:

Submission General Memory **Parallelization** Precision

Use multiple processors

Use GPGPU acceleration

Abaqus/Explicit

Number of domains:

Parallelization method:

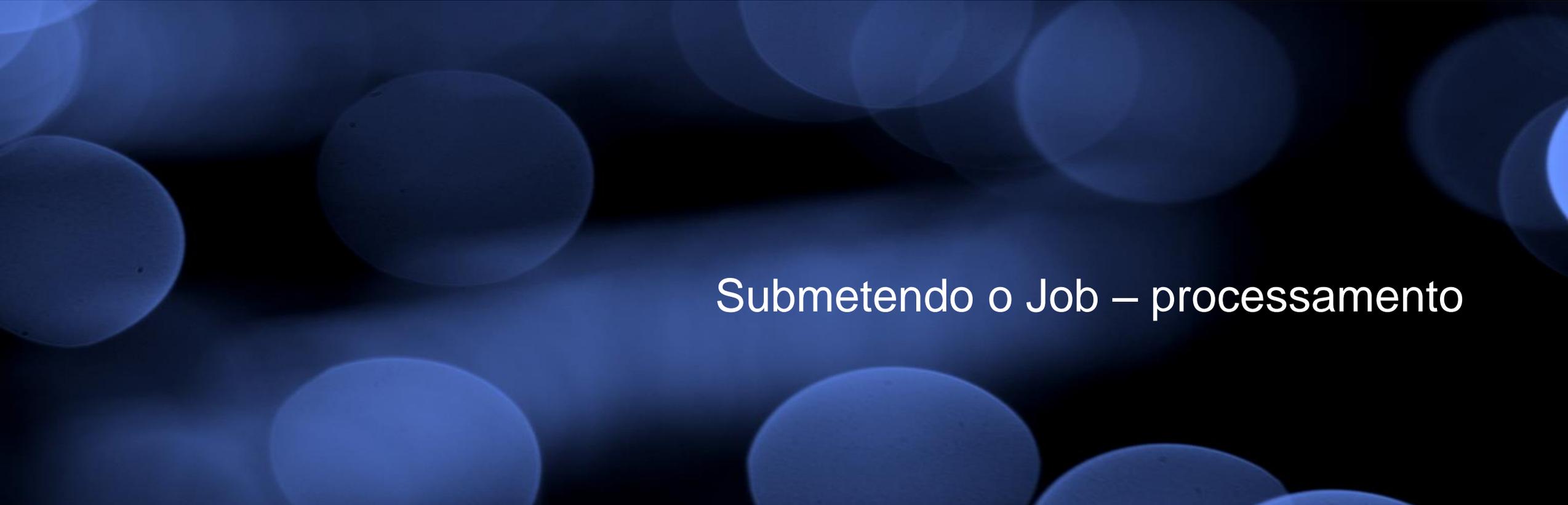
Multiprocessing mode:

Para problemas grandes, defina o número de processadores (aqui não é necessário).

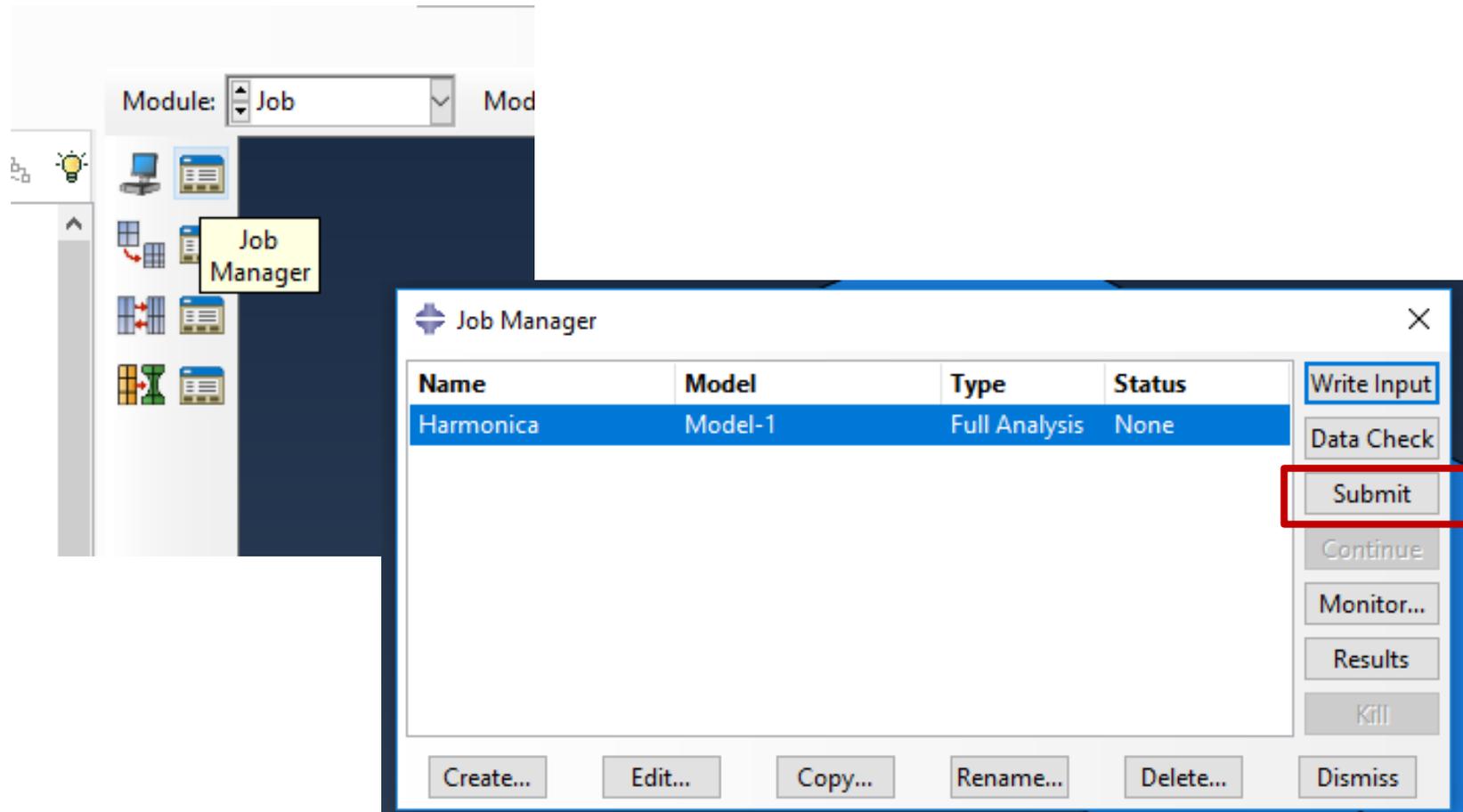
Clique "OK".

OK Cancel

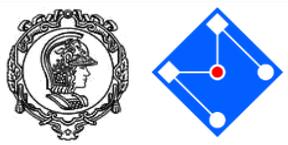
A janela de comandos inferior mostrará que o Job foi criado:
|| The job "Harmonica" has been created.



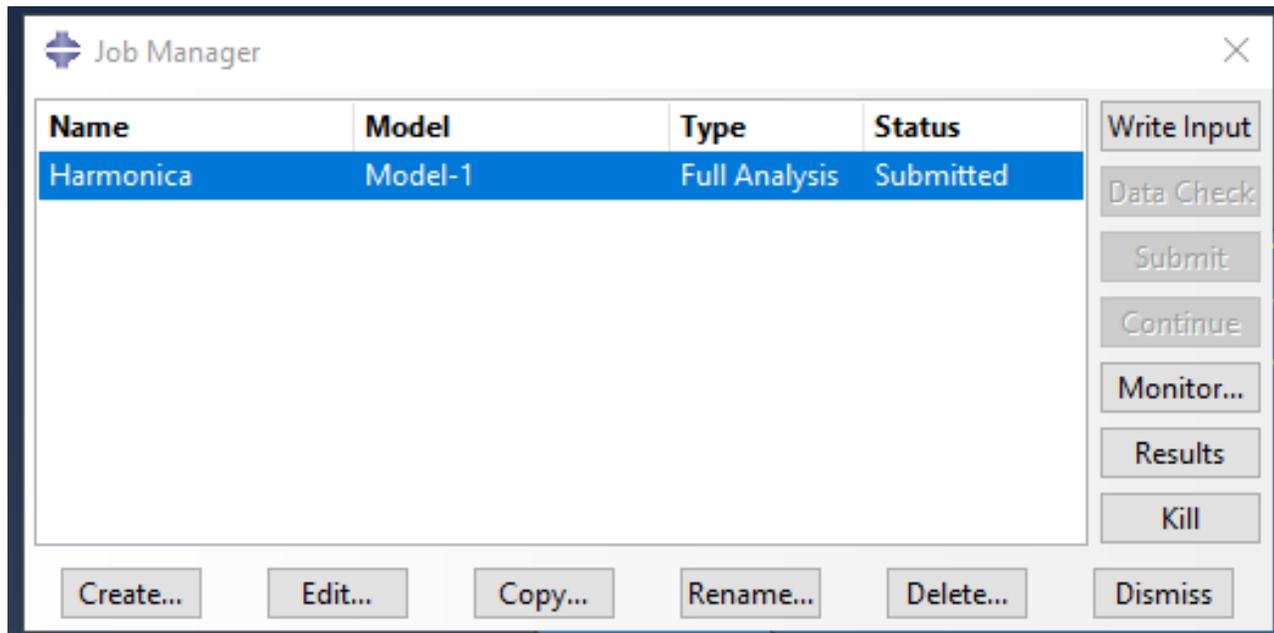
Submetendo o Job – processamento



Em "Job Manager",
submeta seu trabalho,



Primeiro, o programa irá analisar se seu modelo está ok (status Submitted)



```
The job "Harmonica" has been created.  
The job input file "Harmonica.inp" has been submitted for analysis.  
Job Harmonica: Analysis Input File Processor completed successfully.
```

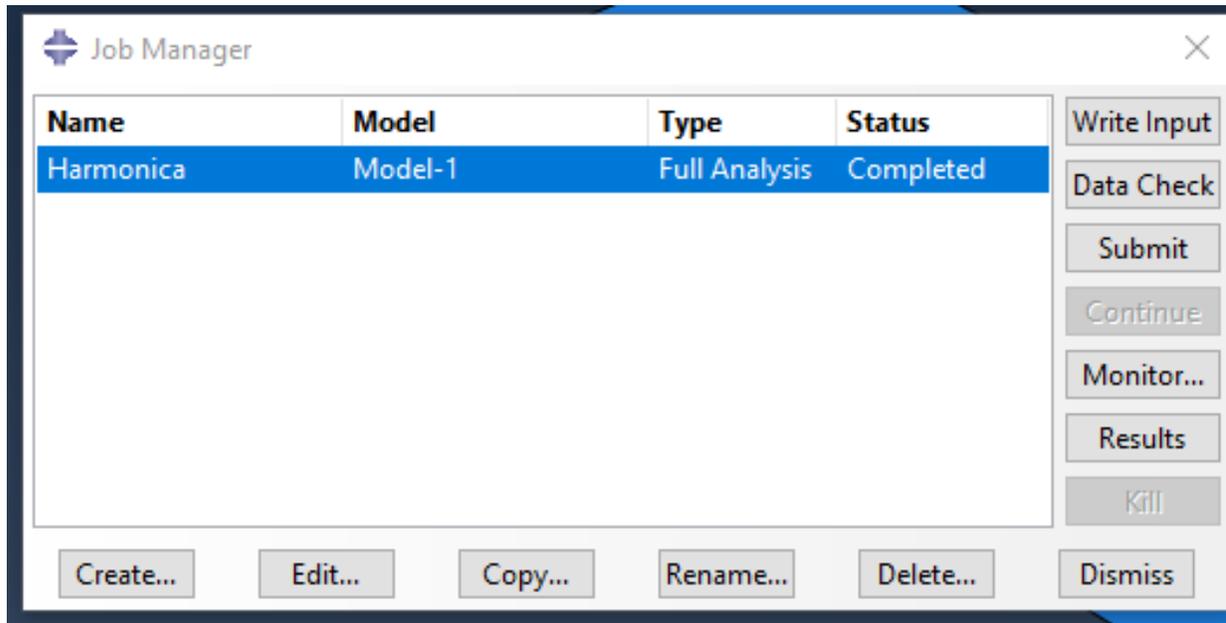


Depois, a análise se inicia (status Running).

The screenshot displays the 'Job Manager' window. It contains a table with the following data:

Name	Model	Type	Status
Harmonica	Model-1	Full Analysis	Running

Below the table, there are several control buttons: 'Write Input', 'Data Check', 'Submit', 'Continue', 'Monitor...', 'Results', 'Kill', 'Dismiss', 'Create...', 'Edit...', 'Copy...', 'Rename...', and 'Delete...'. The 'Running' status indicates that the analysis is currently in progress.



Quando a análise tiver terminado (status "Completed"), clique em "Results"

```
The job "Harmonica" has been created.  
The job input file "Harmonica.inp" has been submitted for analysis.  
Job Harmonica: Analysis Input File Processor completed successfully.  
Job Harmonica: Abagus/Standard completed successfully.  
Job Harmonica completed successfully.
```



Module: Visualization Model: C:/Temp/Harmonica.odb

Name	Model	Type	Status
Harmonica	Model-1	Full Analysis	Completed

Write Input
Data Check
Submit
Continue
Monitor...
Results
Kill
Dismiss

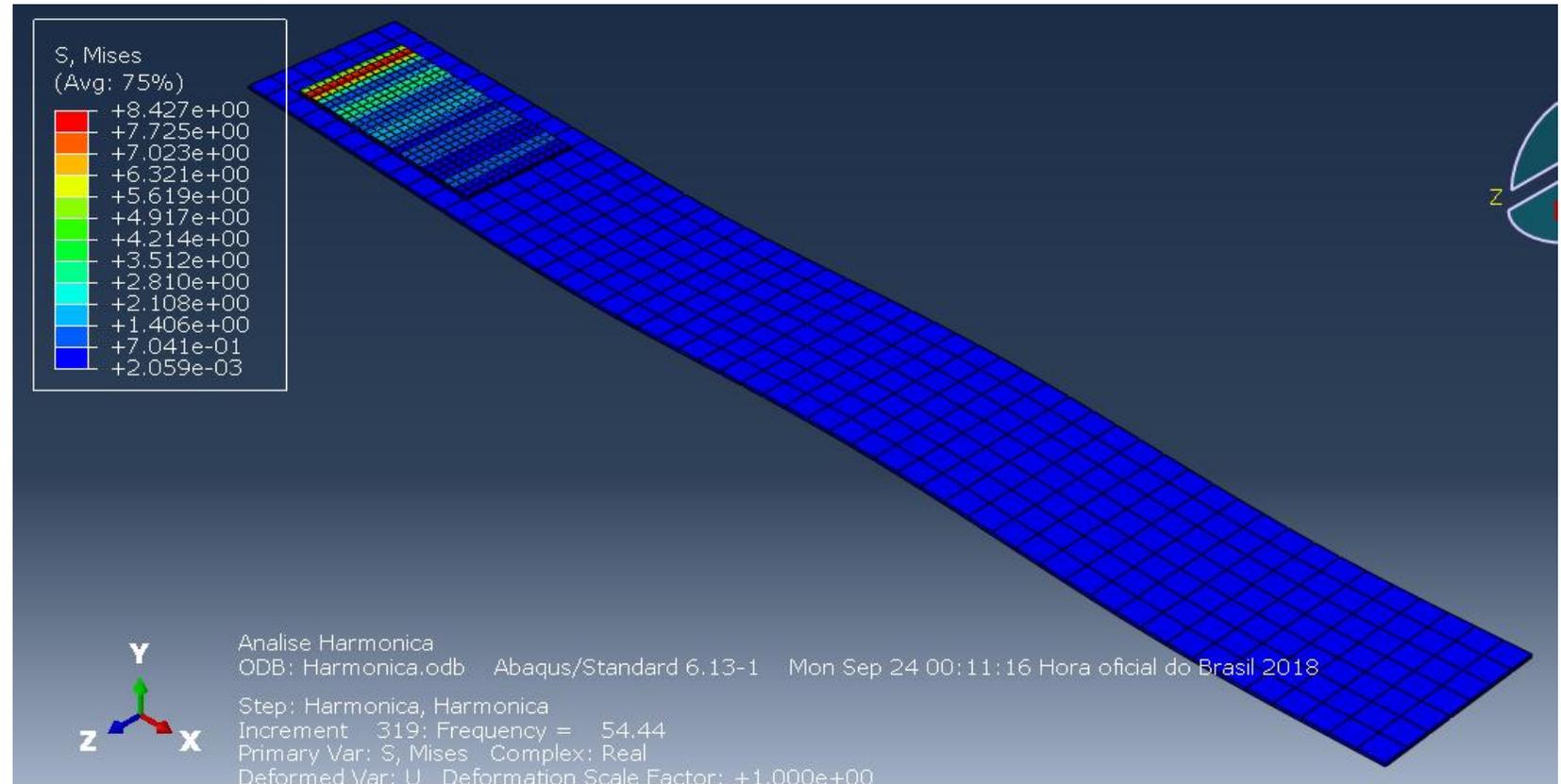
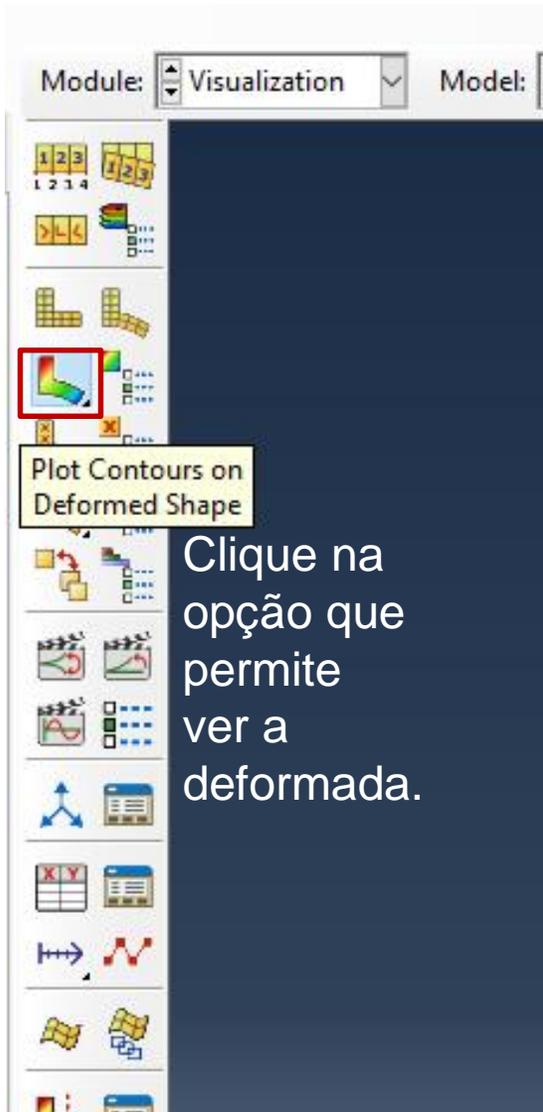
Click em *Results*

Análise Harmônica
ODB: Harmonica.odb Abaqus/Standard 6.13-1 Thu Sep 20 09:50:11 E. South America Standard Time 2018

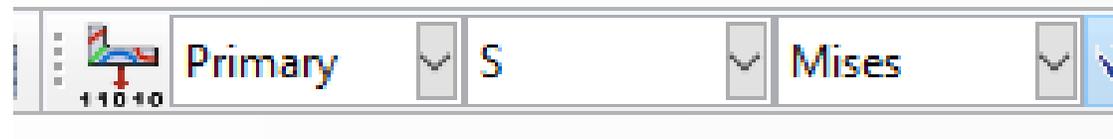
Step: Harmonics, Harmonics
Increment: 100; Frequency = 100.0



Resultados – Pós processamento

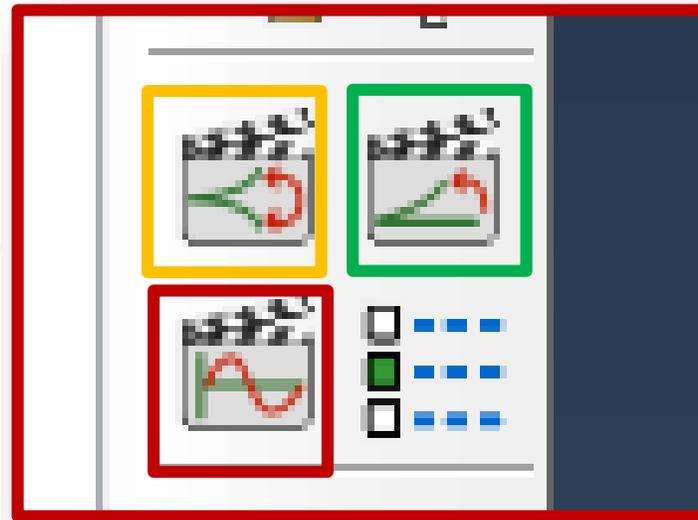


Essa visualização é da tensão de von Mises. Você pode visualizar outras variáveis mudando a seleção em:





exibe uma série de gráficos em rápida sucessão, dando um efeito de filme



Animate:

Scale Factor

Os gráficos individuais variam no fator de escala aplicado (veja no próximo slide como mudar).

Time History

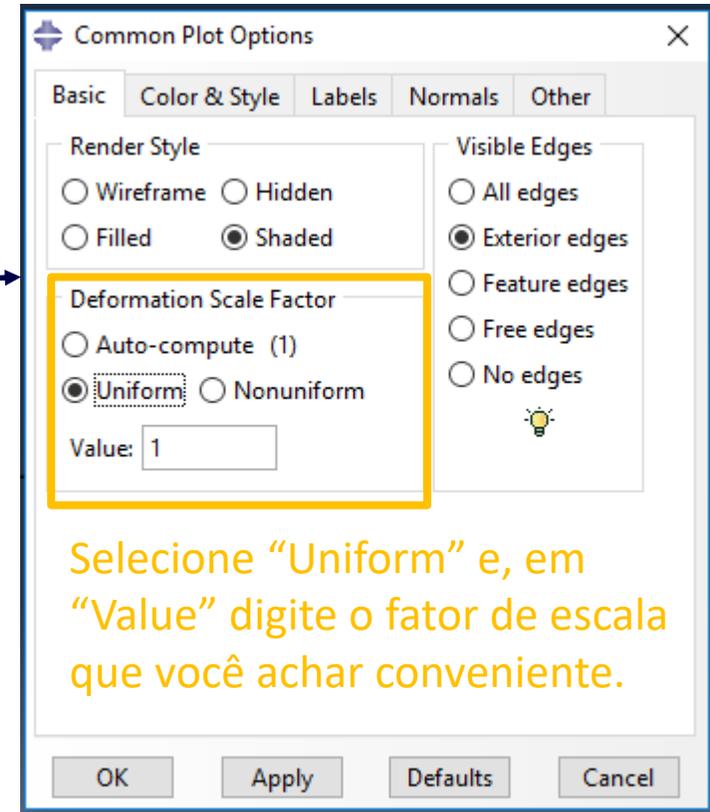
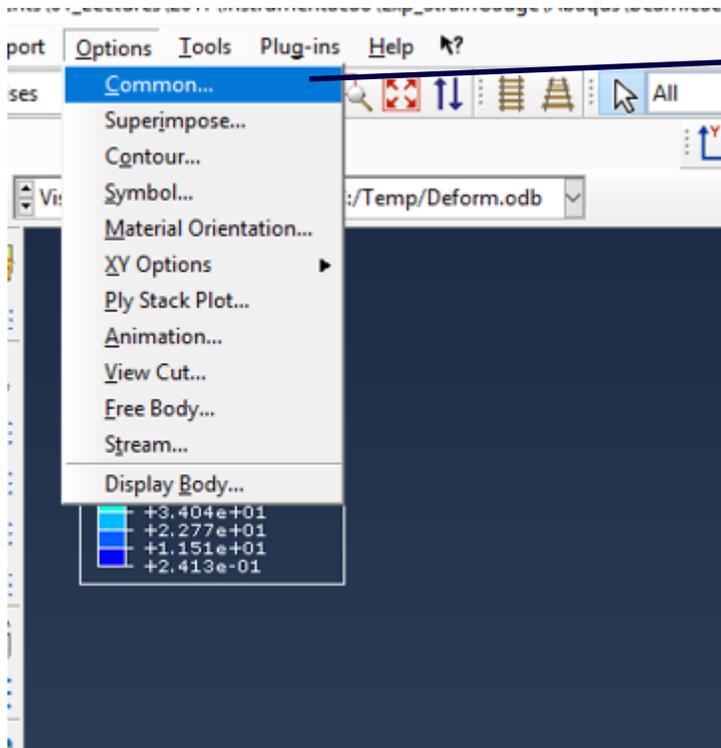
Percorre todos os incrementos (frequências) mostrando os modos

Harmonic

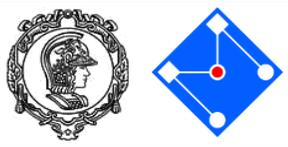
Fixada a frequência, mostra o modo de oscilação da estrutura



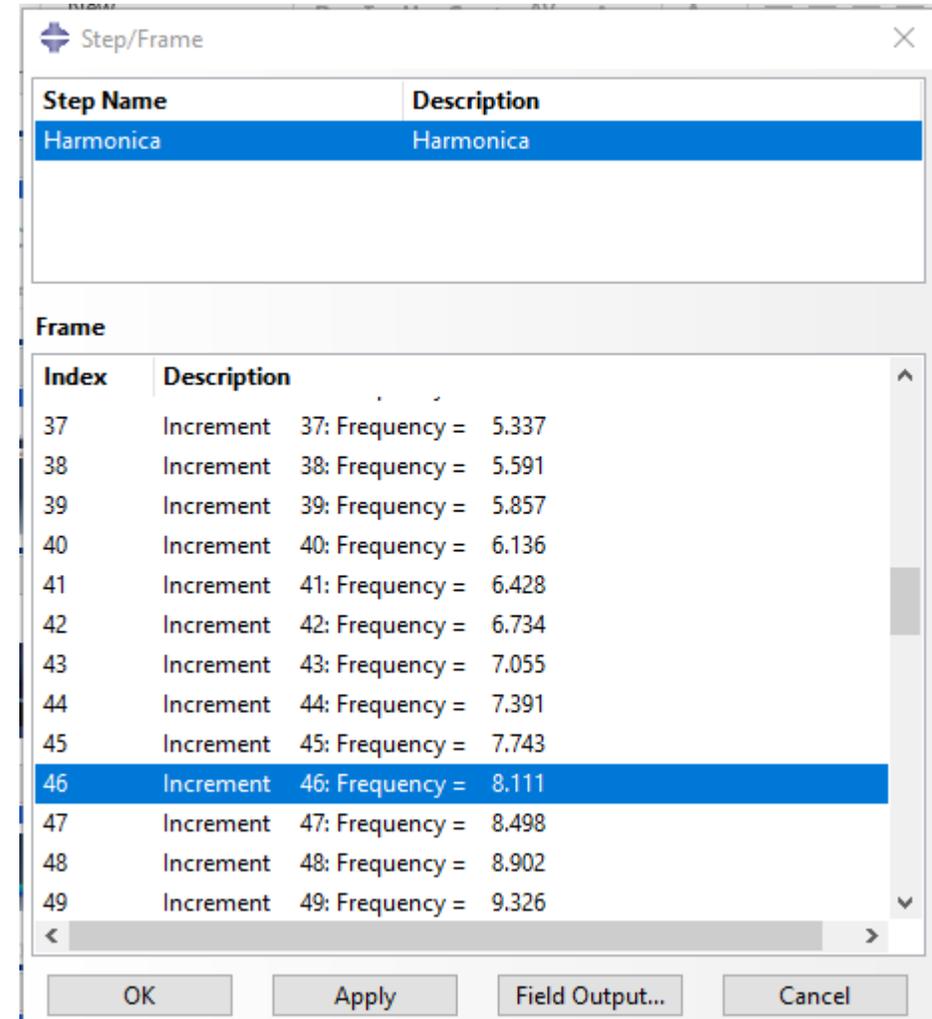
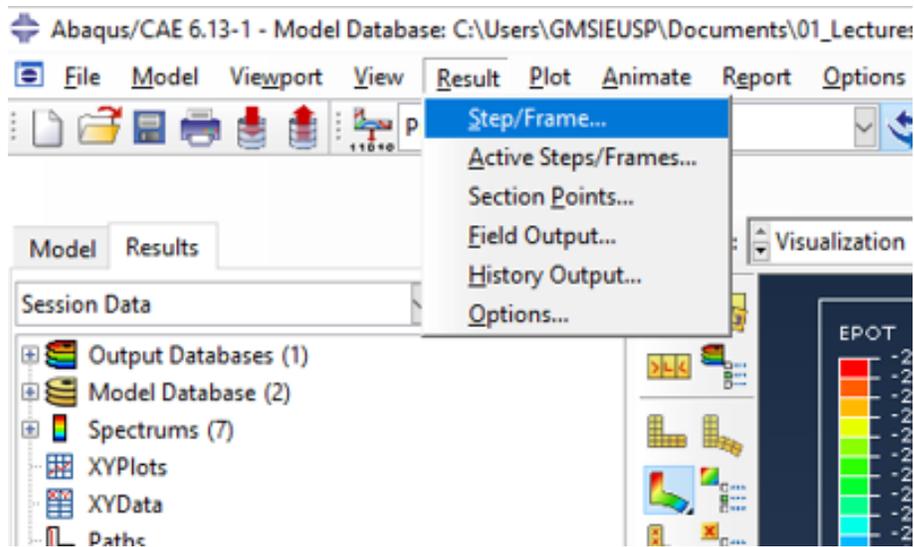
Para mudar o fator de escala da deformada, vá em Options... Common...



Selecione "Uniform" e, em "Value" digite o fator de escala que você achar conveniente.



Você pode definir o incremento que quer verificar o modo.



Plotando a voltagem



Module: Visualization Model:

Source

- ODB history output
- ODB field output
- Thickness
- Free body
- Operate on XY data
- ASCII file
- Keyboard
- Path

Continue... Cancel

Create XY Data

XY Data from ODB Field Output

Steps/Frames

Note: XY Data will be extracted from the active steps/frames Active Steps/Frames...

Variables Elements/Nodes

Output Variables

Position: Unique Nodal

Click checkboxes or edit the identifiers shown next to Edit below.

- Integration Point
- Centroid
- Element Nodal
- Unique Nodal
- Whole Element
- Element Face Nodal
- Surface Face Nodal
- Element Face
- E: Strain components
- EFLX: Electrical flux vector
- EPG: Electrical potential gradient vector
- EPOT: Electrical potential
- RCHG: Reactive electrical nodal charge
- RF: Reaction force
- RM: Reaction moment

Edit:

Section point: All Select Settings...

Save Plot Dismiss

XY Data from ODB Field Output

Steps/Frames

Note: XY Data will be extracted from the active steps/frames Active Steps/Frames...

Variables Elements/Nodes

Output Variables

Position: Unique Nodal

Click checkboxes or edit the identifiers shown next to Edit below.

- A: Spatial acceleration
- AR: Rotational acceleration
- CECHG: Concentrated electrical nodal charge
- CF: Point loads
- CM: Point moments
- E: Strain components
- EFLX: Electrical flux vector
- EPG: Electrical potential gradient vector
- EPOT: Electrical potential
- RCHG: Reactive electrical nodal charge
- RF: Reaction force
- RM: Reaction moment

Edit: EPOT

Section point: All Select Settings...

Save Plot Dismiss



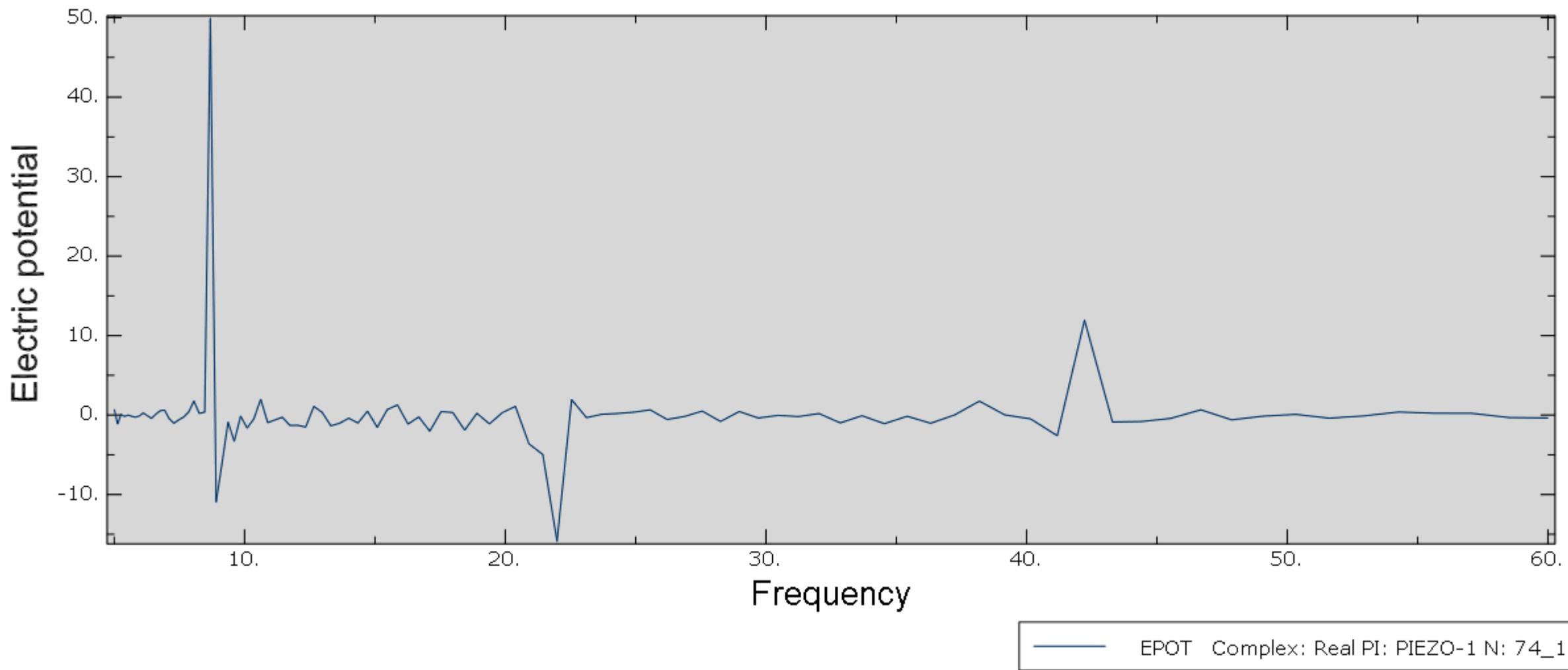
The screenshot shows the 'XY Data from ODB Field Output' dialog box in Abaqus. The 'Variables' tab is set to 'Elements/Nodes'. Under the 'Selection' section, the 'Method' dropdown is set to 'Pick from viewport'. The 'Edit Selection' button is highlighted with a blue arrow. The 'Plot' button at the bottom of the dialog is highlighted with a red box. The background shows a green mesh with a single node highlighted in orange.

Selecione o nó na malha
Clique em "Edit Selection"



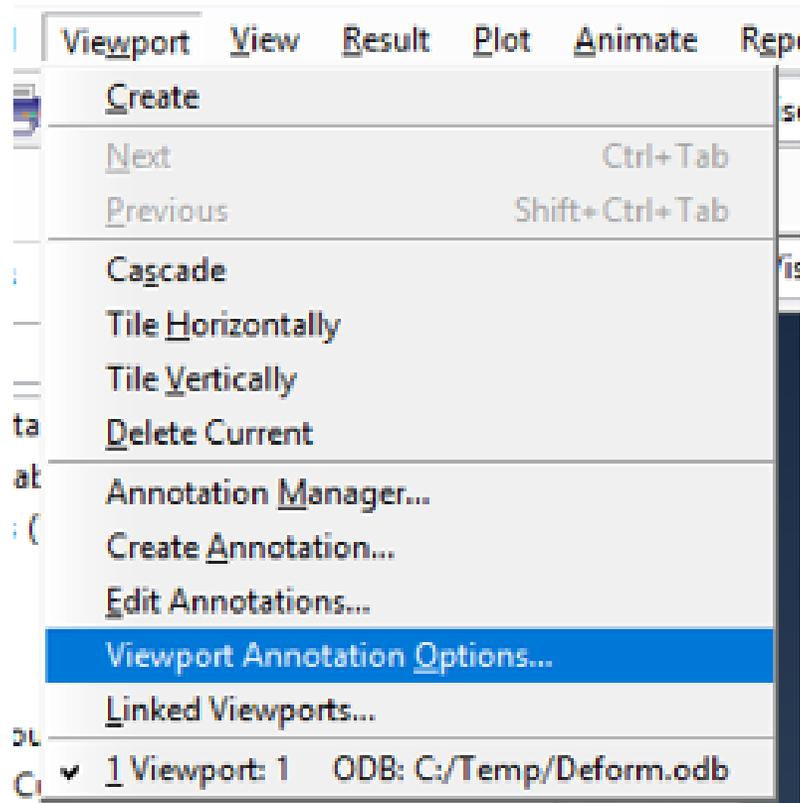
This close-up shows the 'Edit Selection' button, the 'Add Selection' button, and the 'Delete Selection' button. Below them, a list box contains the text '1 Nodes selected'.

clique em "Plot"



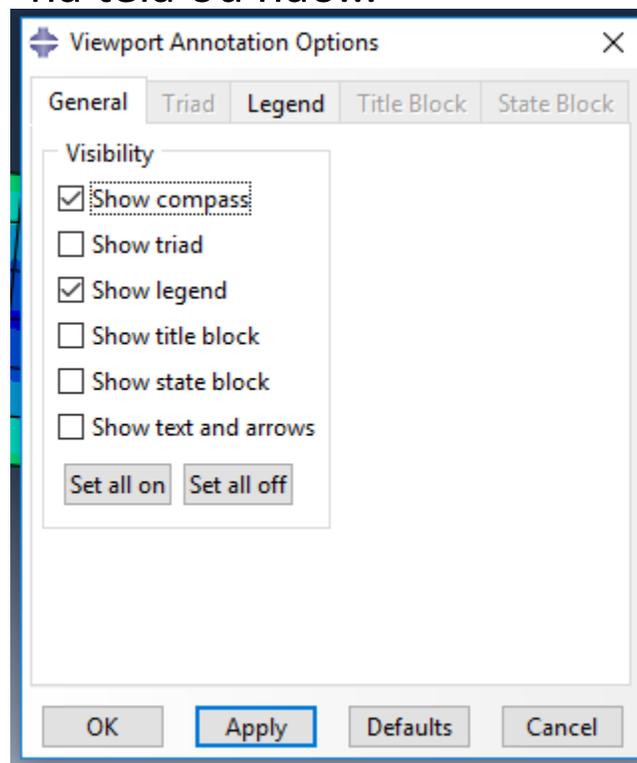


Results - Visualization

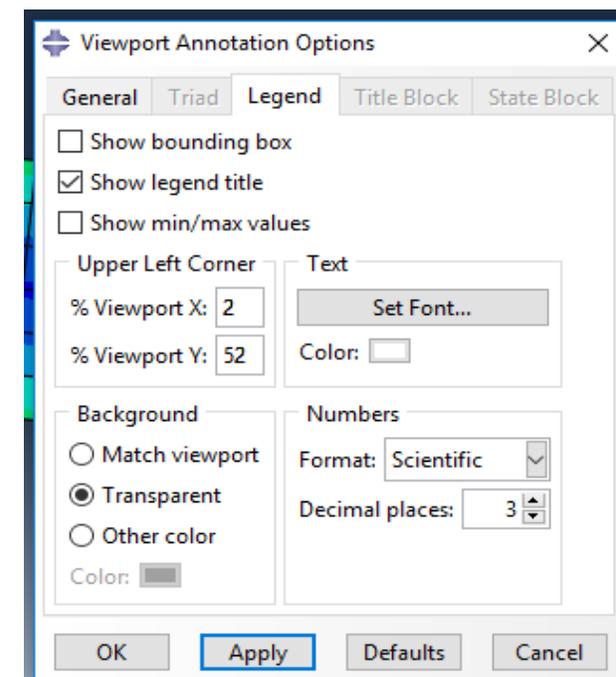


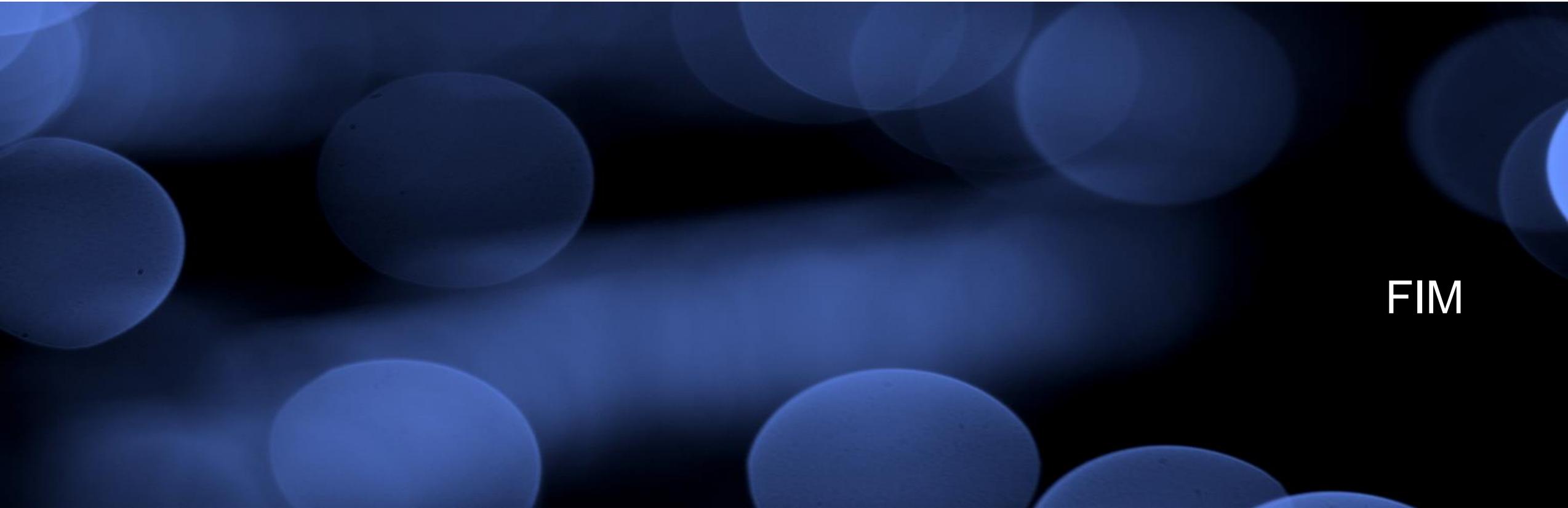
Em **Viewport** → **Viewport Annotation Options...**

Defina o que você quer ver na tela ou não...



Ou os dados da legenda...





FIM