

Alguns pontos importantes de Mecânica dos Sólidos e Método dos Elementos Finitos

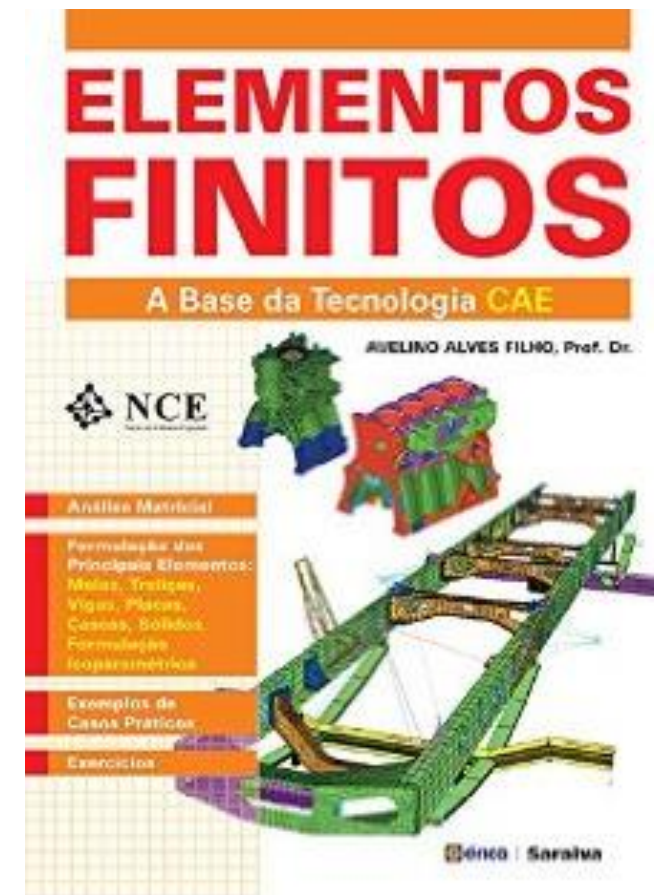
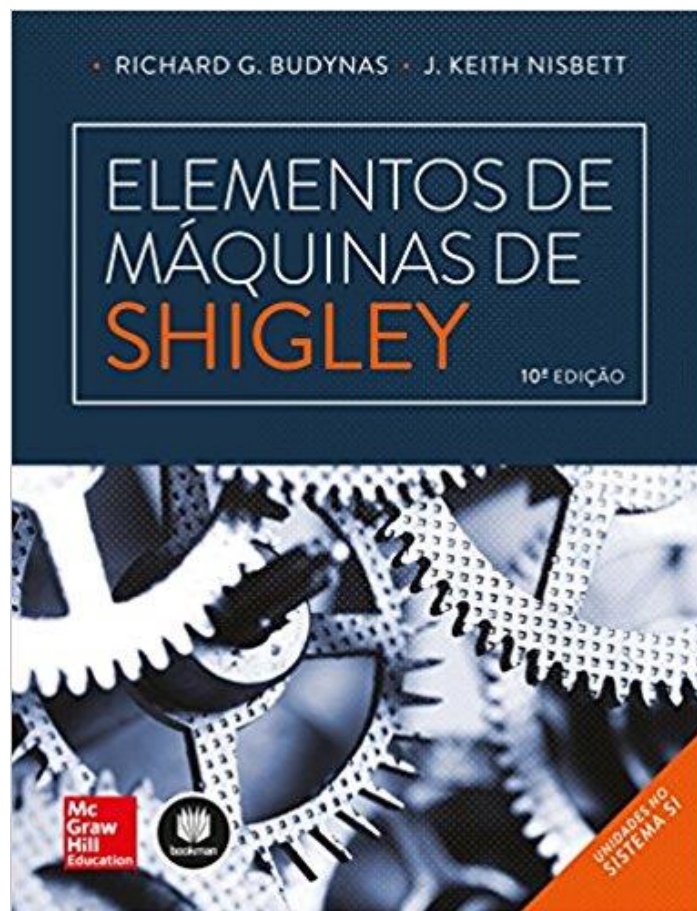
Profa. Dra. Larissa Driemeier

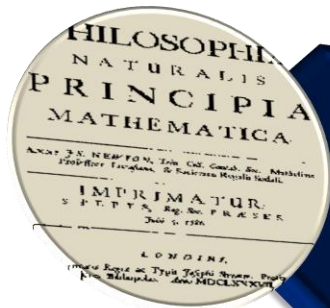
Prof. Dr. Marcilio Alves

Prof. Dr. Rafael Traldi Moura



- Esta aula é baseada nos livros:

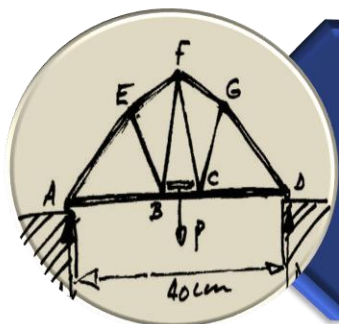




Teórica

Lida com leis fundamentais e princípios da mecânica, com intrínseco valor científico.

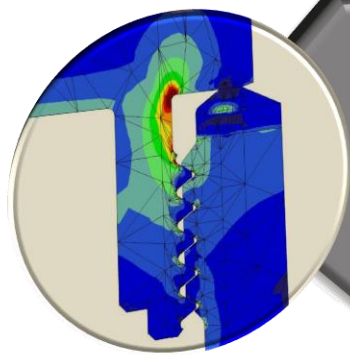
Prova a existência de problemas e soluções.



Aplicada

Transfere o conhecimento teórico para aplicações científicas e de engenharia: construção de modelo matemático do fenômeno físico.

Procura por problemas que se encaixam nas soluções.



Computacional

Resolve problemas específicos através de simulações utilizando ferramentas numéricas implementadas em computadores.

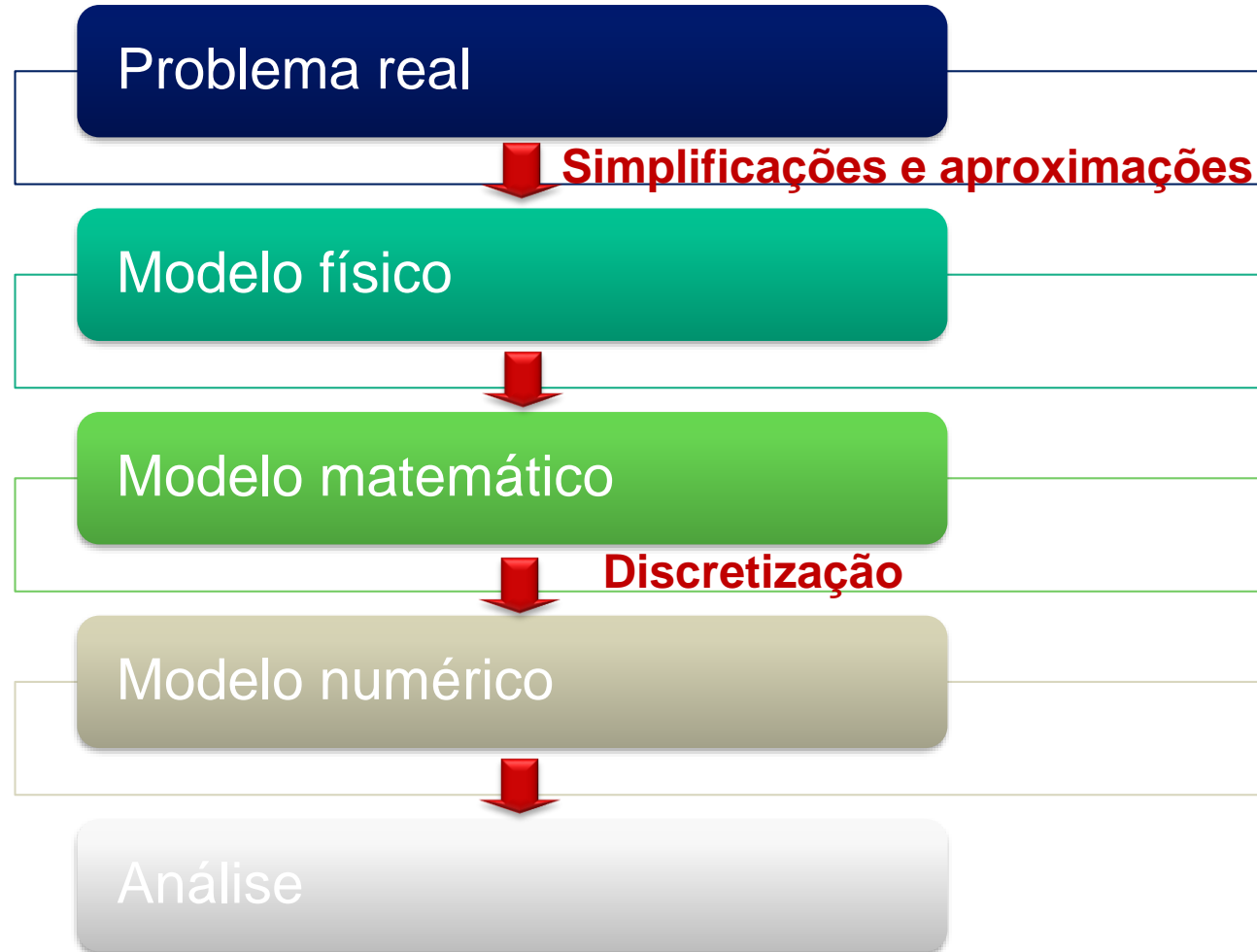
Procura soluções para um dado problema



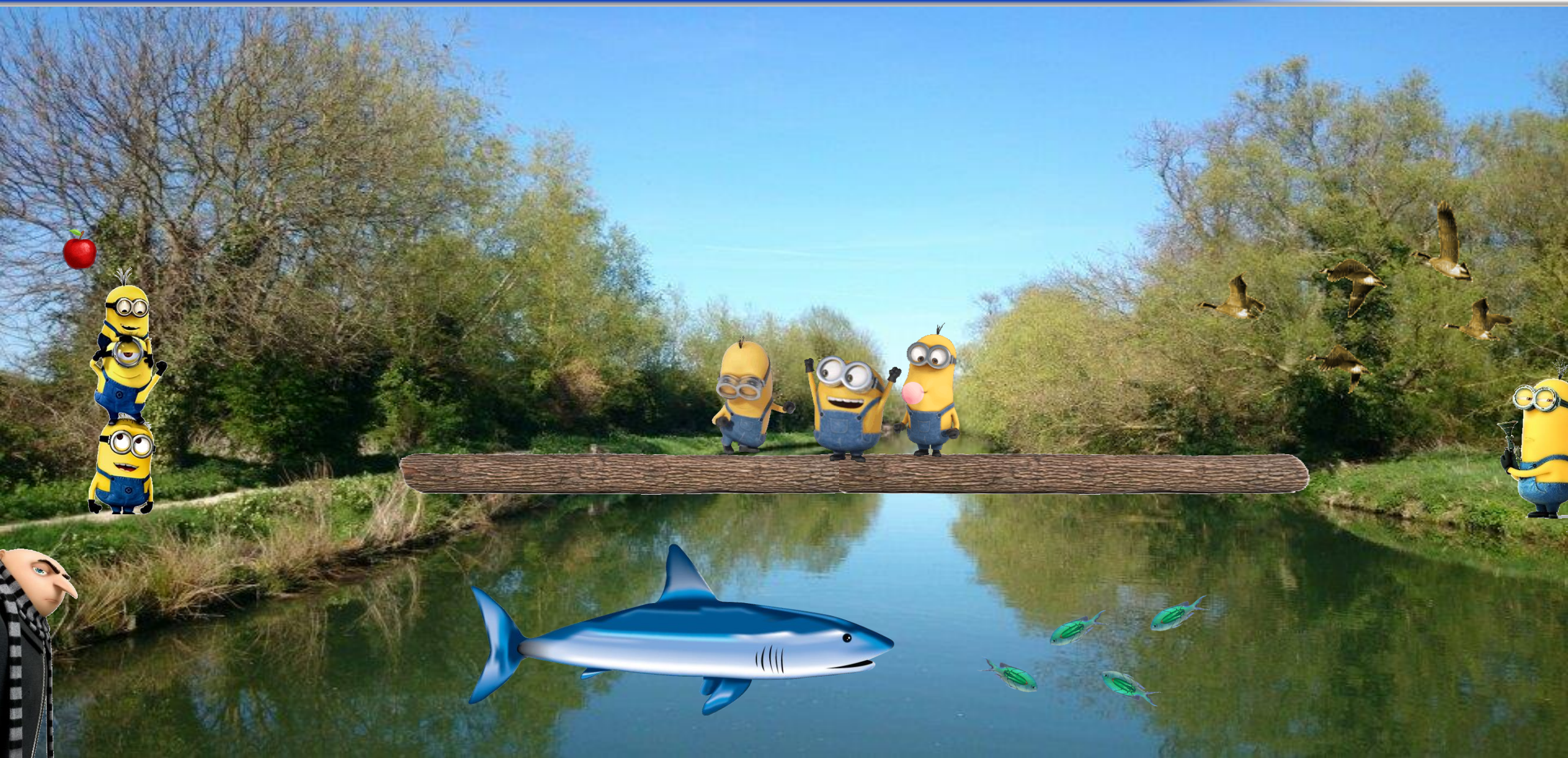
Segundo Prof. Dr. *Avelino Alves Filho*,

“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

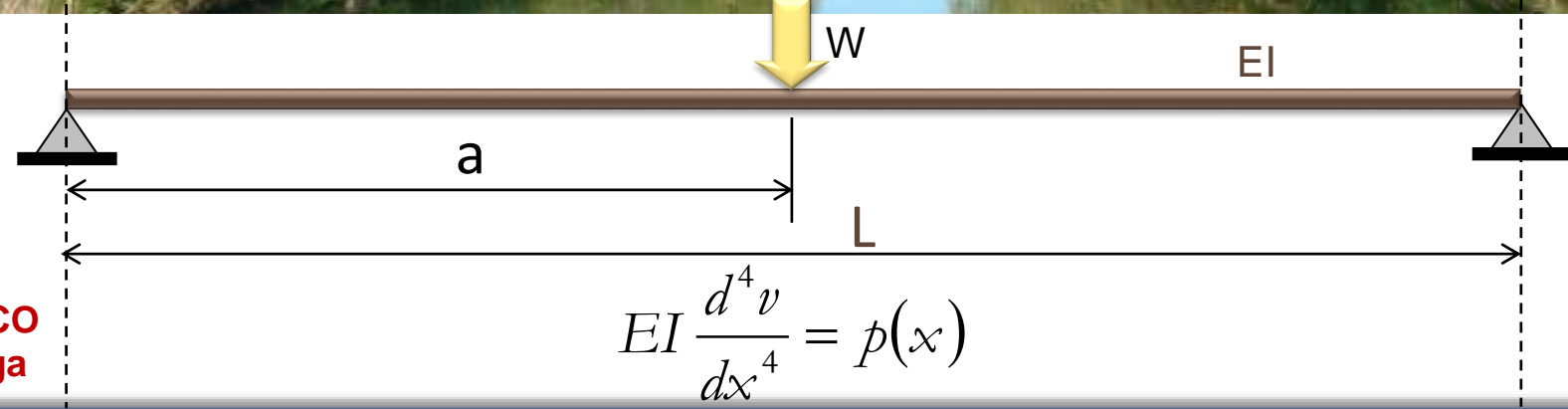
Peso concentrado na posição correspondente ao centro de gravidade do corpo

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



Forças totais de volume:

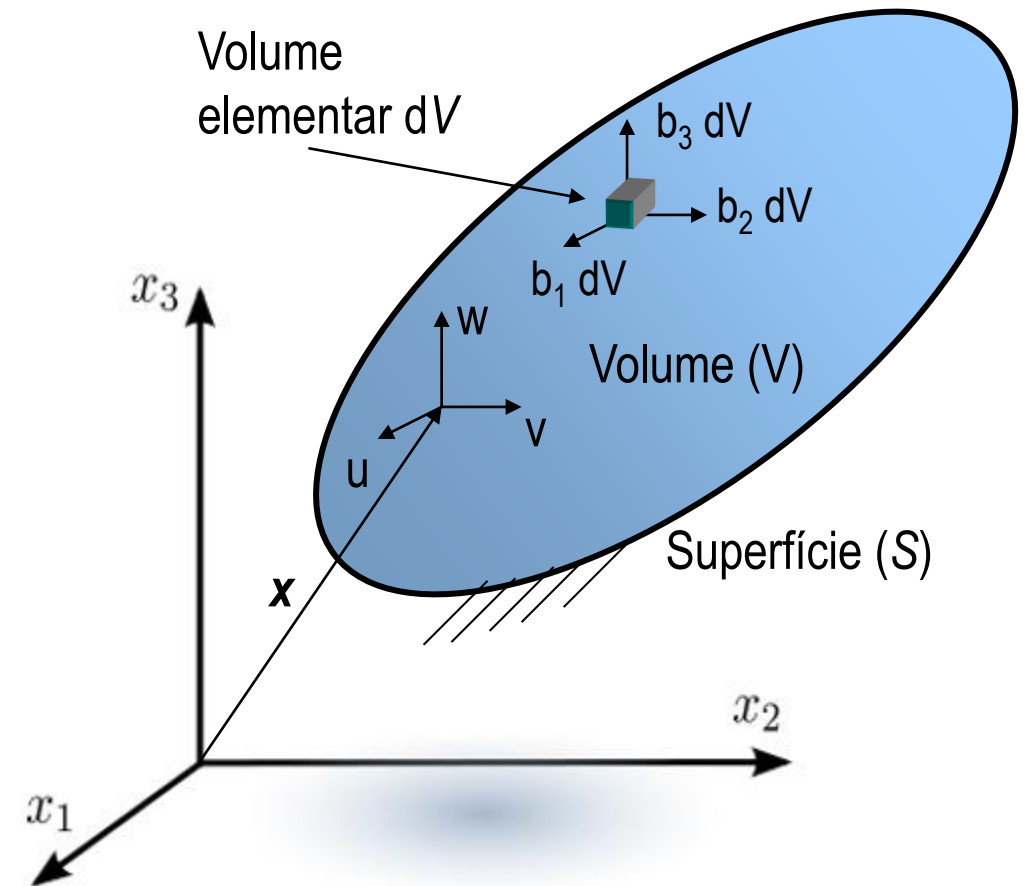
$$\mathbf{X} = \mathbf{b} - \rho \ddot{\mathbf{u}}$$

Forças de volume:

$$\mathbf{b} = \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{Bmatrix}$$

Se o corpo é acelerado,
então as forças de inércia,

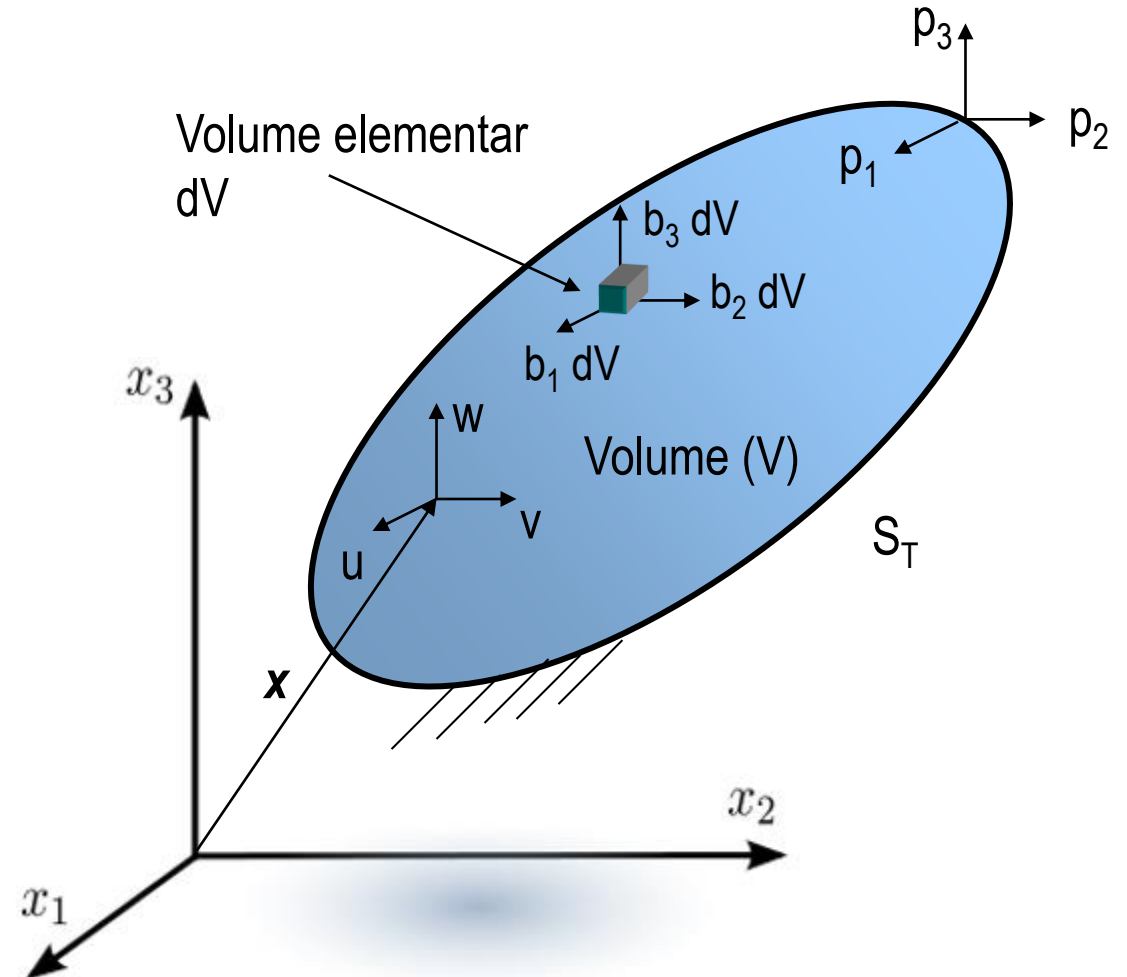
$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = \begin{Bmatrix} \rho \ddot{u} \\ \rho \ddot{v} \\ \rho \ddot{w} \end{Bmatrix}$$

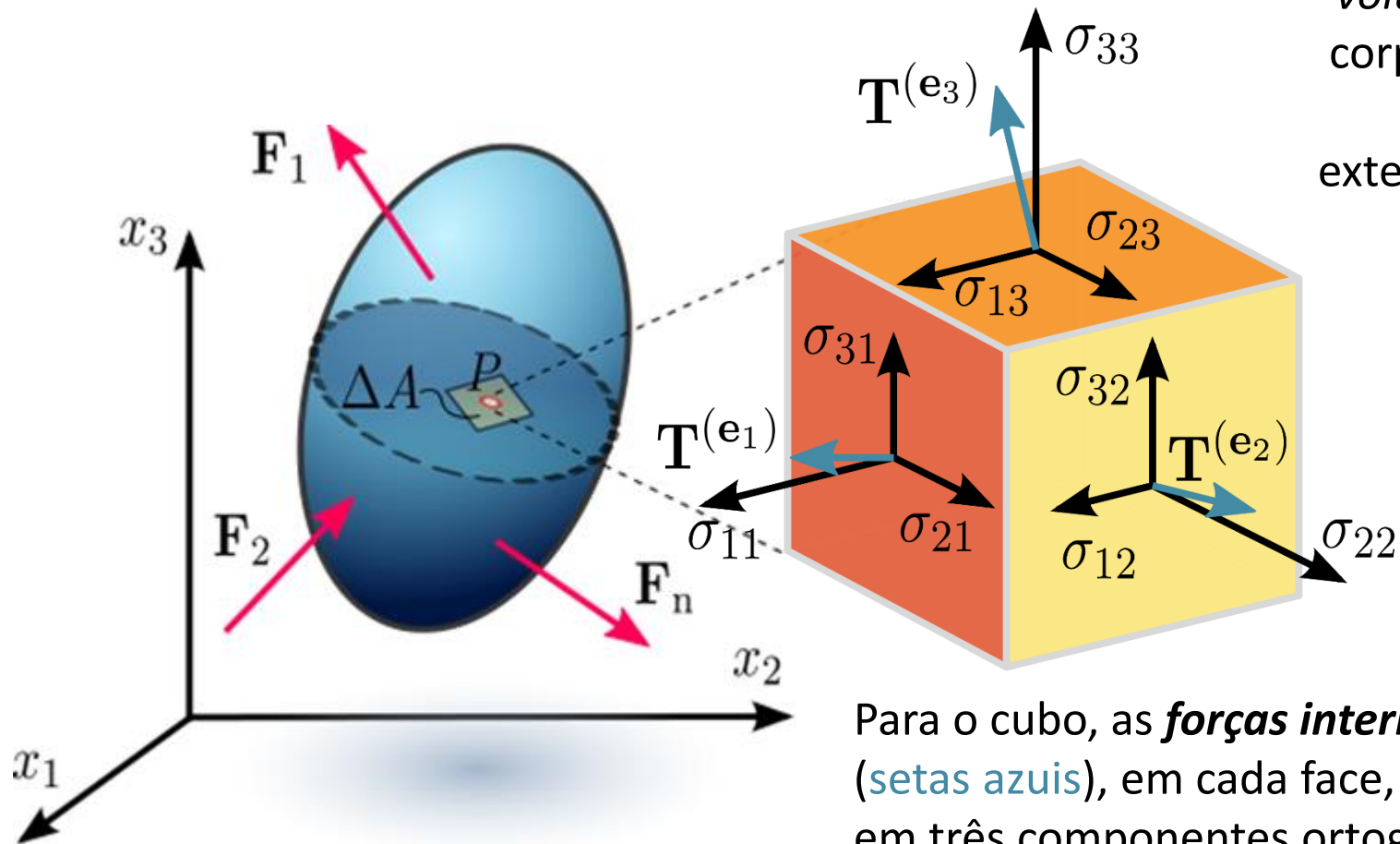




Força distribuída por unidade de superfície

$$\mathbf{T}_S = \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{Bmatrix}$$





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.

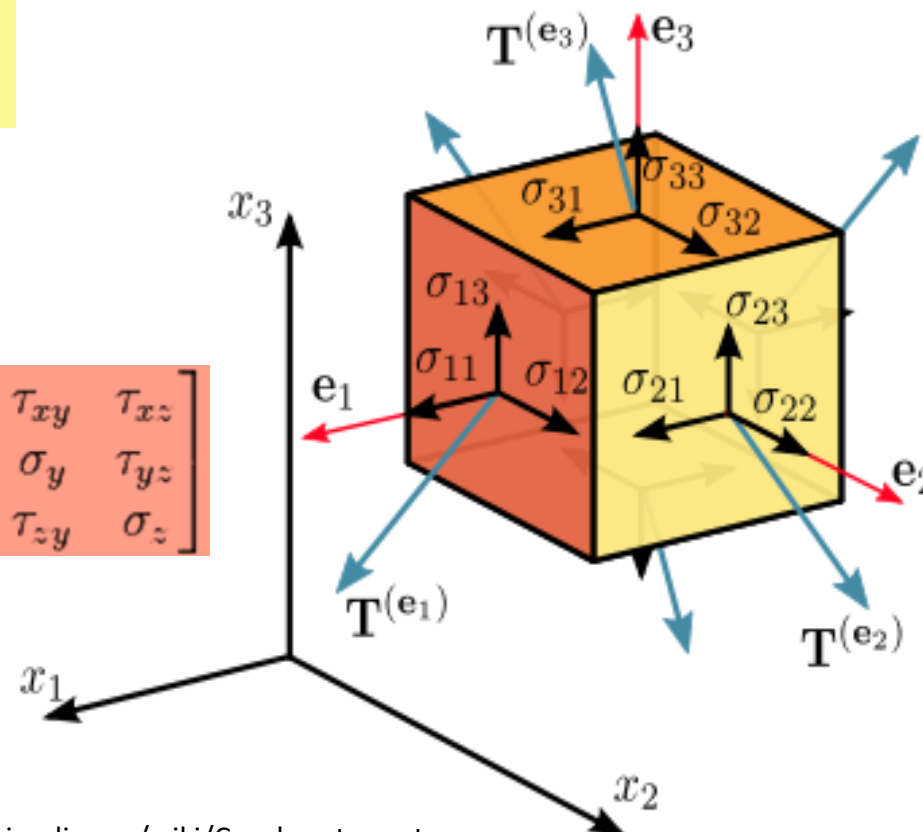
By Sanpaz - Own work, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5736462>

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

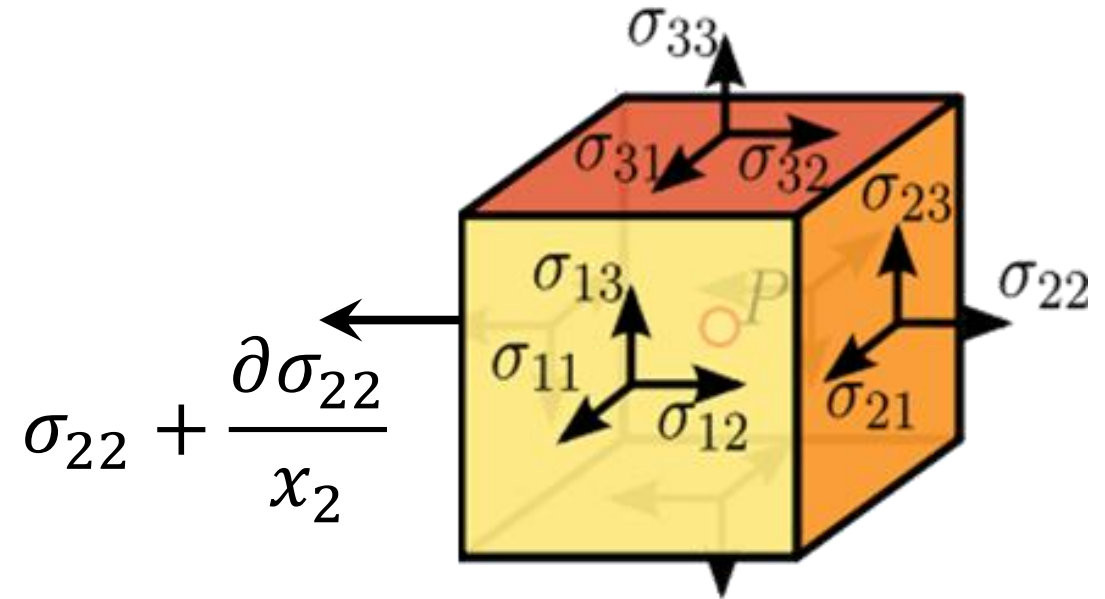


Considere o equilíbrio de um volume diferencial para obter as 3 equações de equilíbrio,

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

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

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





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

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

Condições de contorno

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

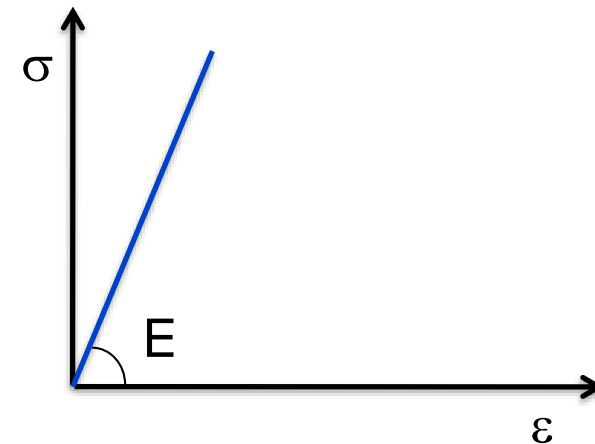
$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^{presc} \quad \text{em} \quad S^u$$

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{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



Tensão plana:

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

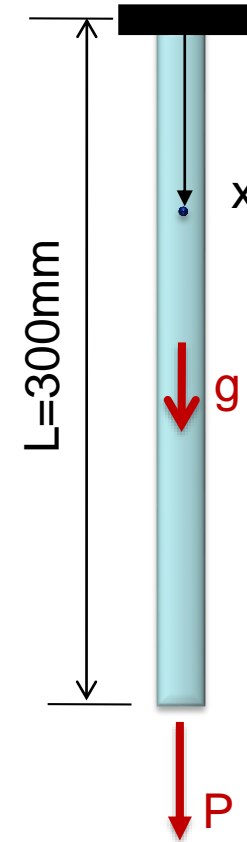
Deformação
plana:

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



A barra de alumínio ($E=72\text{GPa}$) abaixo tem 300mm de comprimento e *seção transversal constante* $A=120\text{ mm}^2$. Calcule os deslocamentos da barra, considerando:

1. Força P;
2. Peso próprio;
3. Peso próprio + força P.

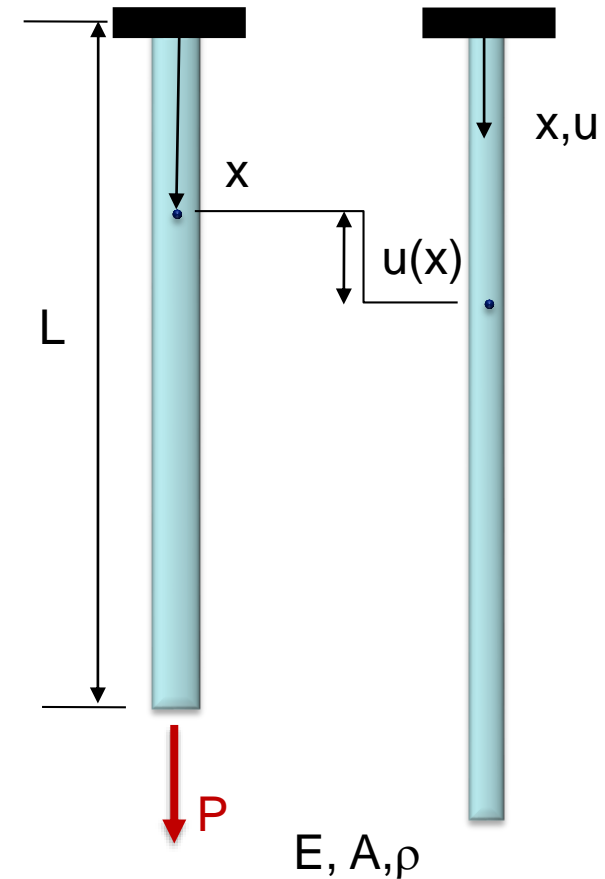




Equilíbrio estático: $\frac{d\sigma}{dx} = 0$

Lei constitutiva:
Elástica linear $\sigma = E\varepsilon$

Cinemática: $\varepsilon = \frac{du}{dx}$





Equação diferencial (ODE):

$$\frac{d}{dx} \left(E \frac{du}{dx} \right) = 0$$

Condições de contorno:

$$u(0) = 0$$

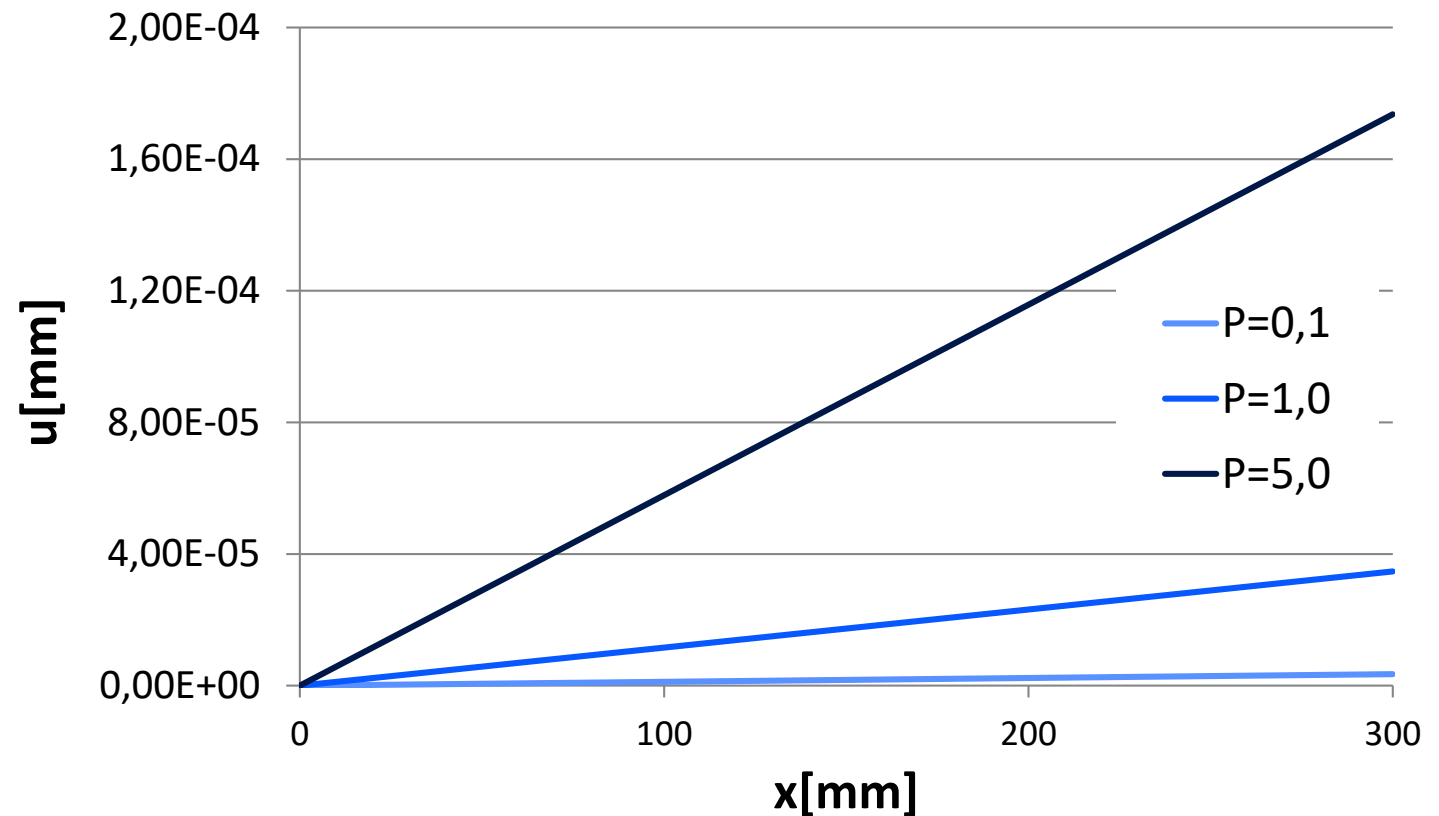
$$F_{x=L} = P = EA \frac{du}{dx} \Big|_{x=L} \Rightarrow \frac{du}{dx} \Big|_{x=L} = \frac{P}{EA}$$

Solução analítica do problema:

$$u(x) = \frac{P}{EA} x$$

$$u(x) = \frac{P}{EA} x$$

$$\begin{aligned} L &= 300 \text{ mm} \\ E &= 72 \text{ GPa} \\ A &= 120 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

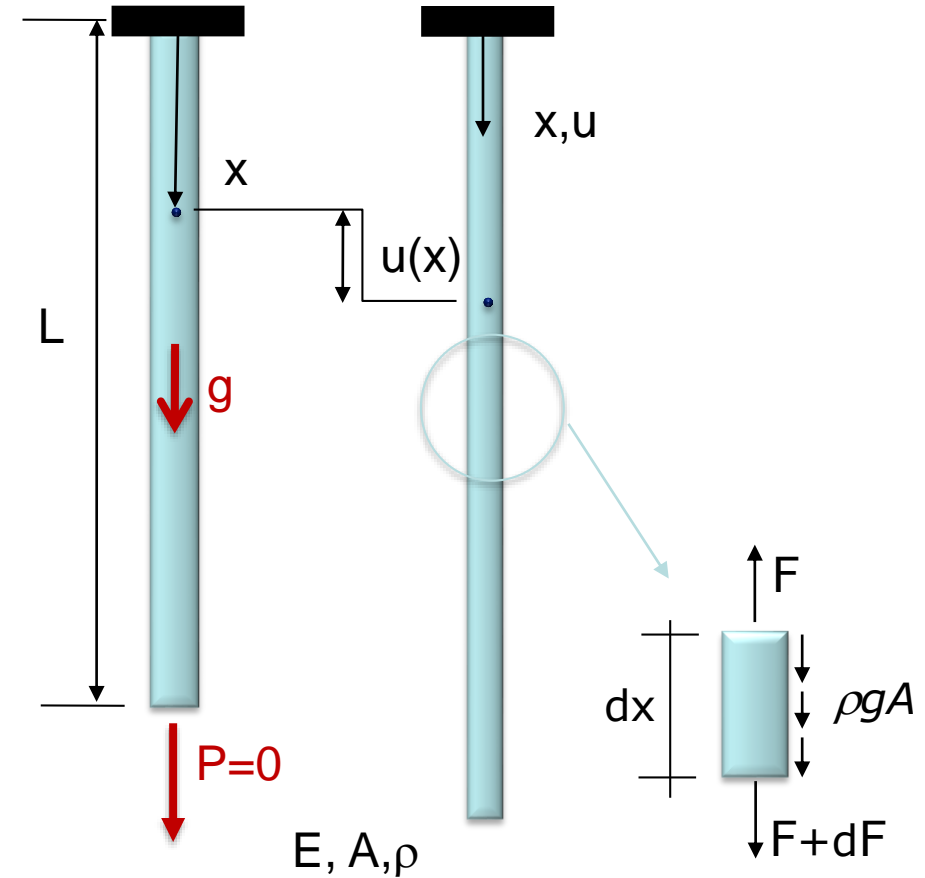




Equilíbrio estático: $\frac{d\sigma}{dx} = -\rho g$

Lei constitutiva:
Elástica linear $\sigma = E\varepsilon$

Cinemática: $\varepsilon = \frac{du}{dx}$





Equação diferencial (ODE):

$$\frac{d}{dx} \left(E \frac{du}{dx} \right) + \rho g = 0$$

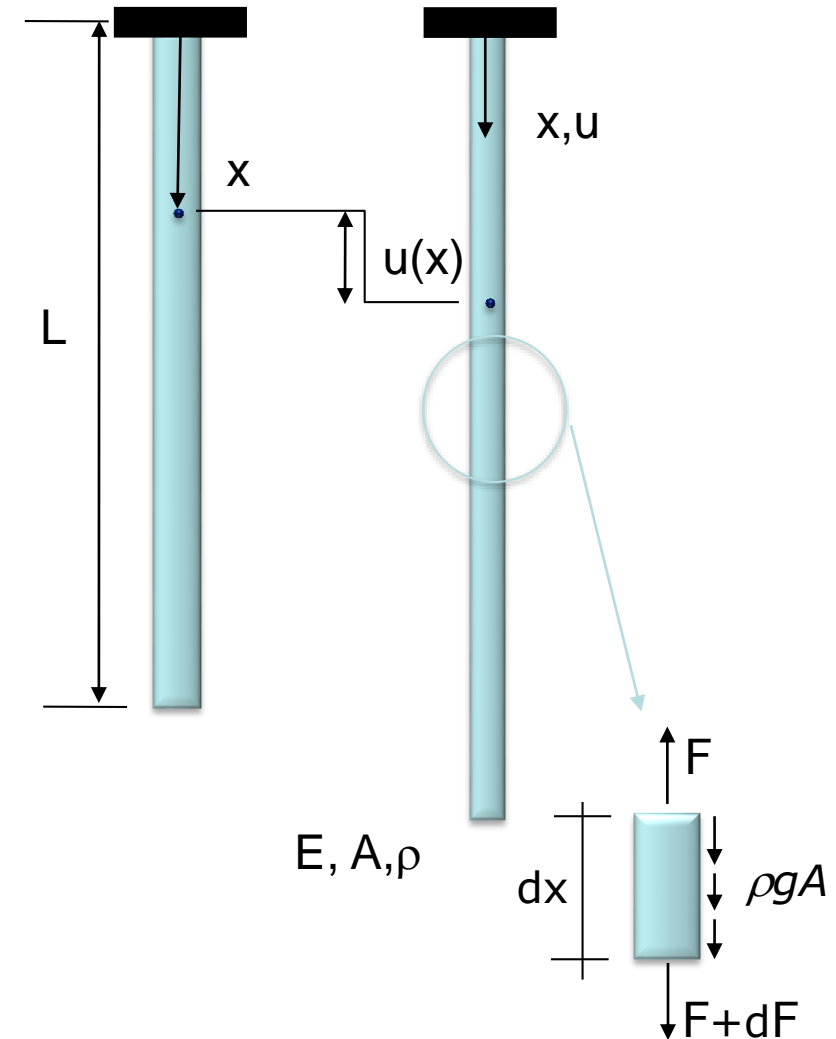
Condições de contorno:

$$u(0) = 0$$

$$P_{x=L} = 0 = EA \frac{du}{dx} \Big|_{x=L} \Rightarrow \frac{du}{dx} \Big|_{x=L} = 0$$

Solução analítica do problema:

$$u(x) = \frac{\rho g}{E} \left(L - \frac{x}{2} \right) x$$





$$u(x) = \frac{\rho g}{E} \left(L - \frac{x}{2} \right) x$$

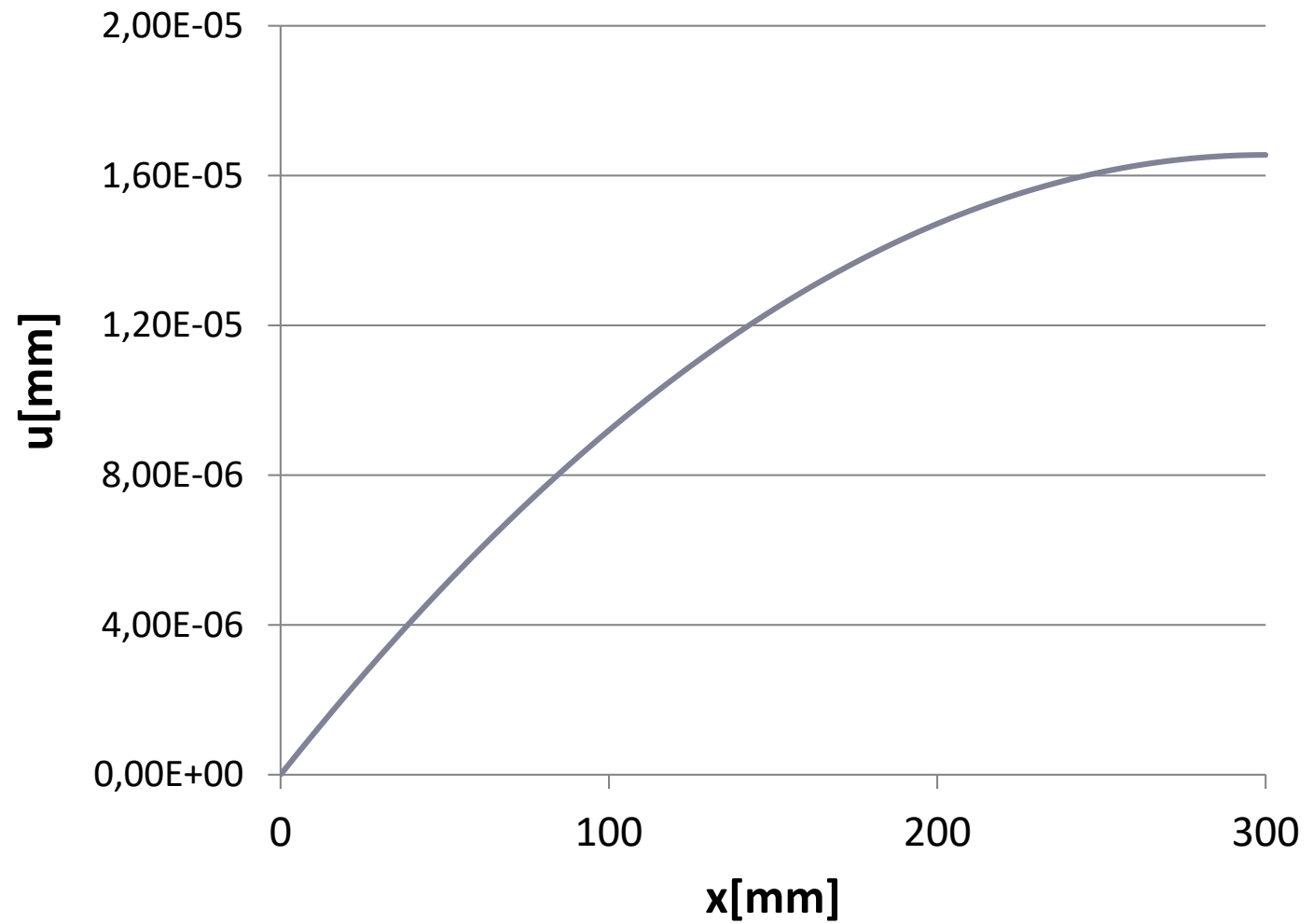
$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$L = 300 \text{ mm}$

$E = 72 \text{ GPa}$

$A = 120 \text{ mm}^2$

$\rho = 2,7000 \text{E-}06 \text{ kg/mm}^3$

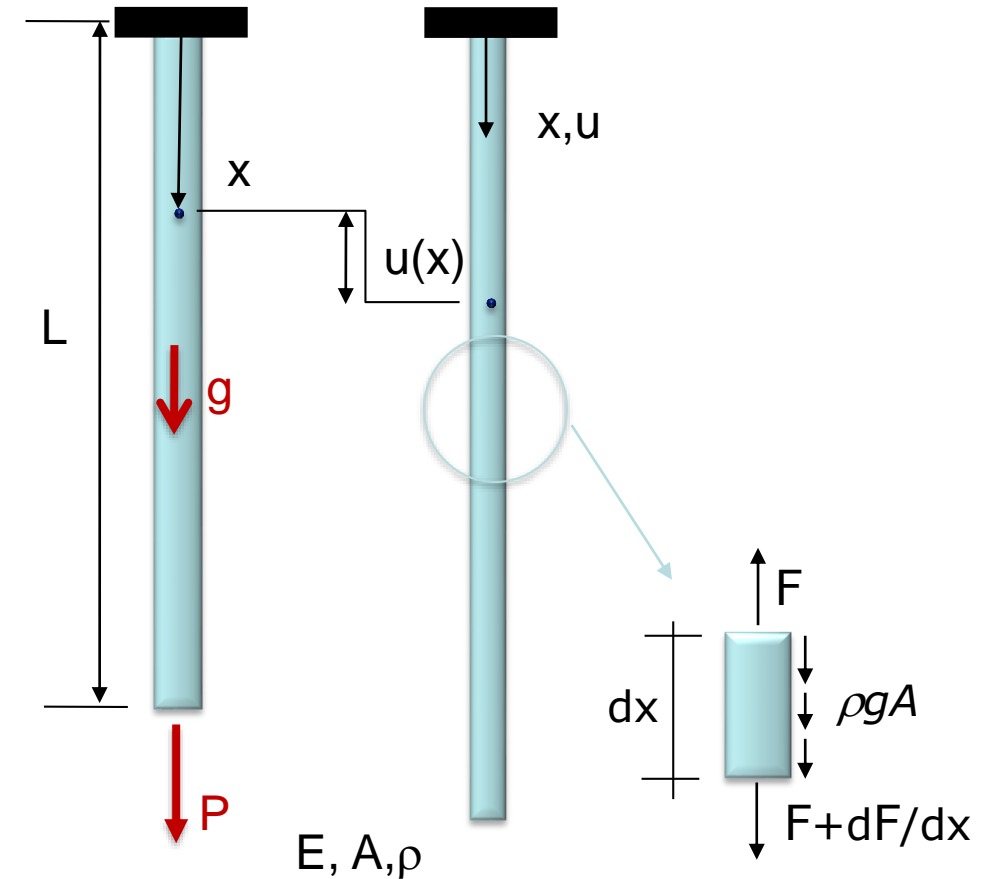




Equilíbrio estático: $\frac{d\sigma}{dx} = -\rho g$

Lei constitutiva:
Elástica linear $\sigma = E\varepsilon$

Cinemática: $\varepsilon = \frac{du}{dx}$





Equação diferencial (ODE):

$$\frac{d}{dx} \left(E \frac{du}{dx} \right) + \rho g = 0$$

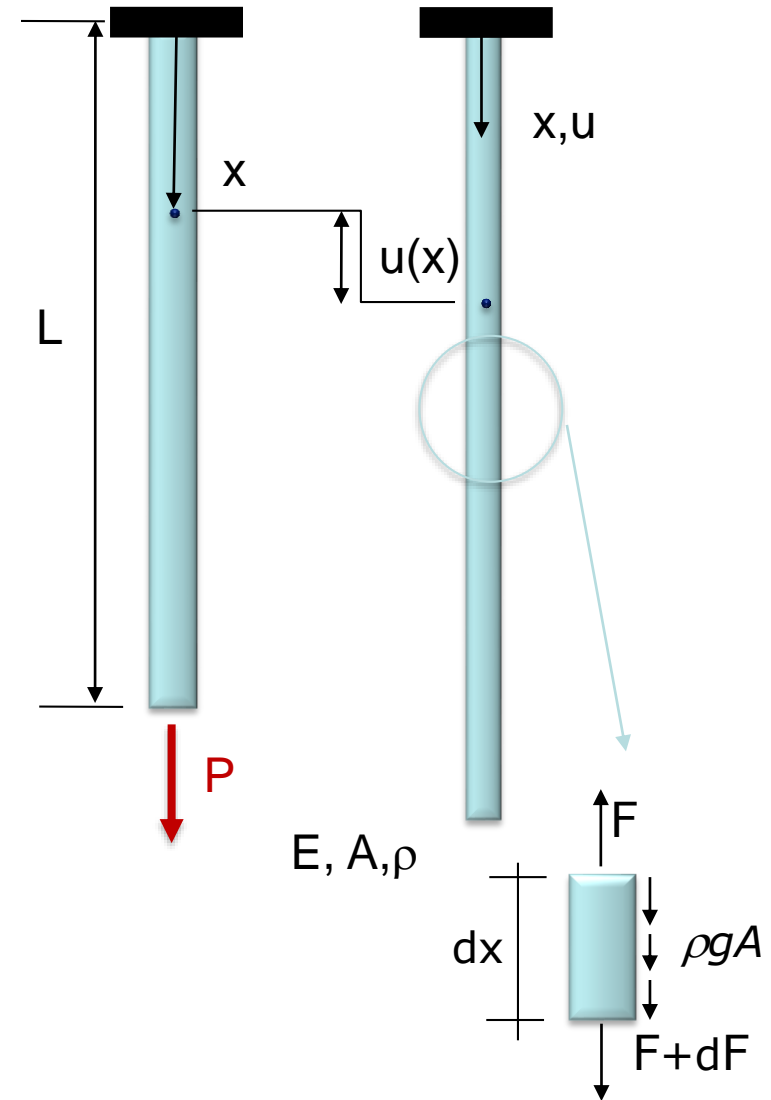
Condições de contorno:

$$u(0) = 0$$

$$F_{x=L} = P = EA \frac{du}{dx} \Big|_{x=L} \Rightarrow \frac{du}{dx} \Big|_{x=L} = \frac{P}{EA}$$

Solução analítica do problema:

$$u(x) = \left[\frac{\rho g}{E} \left(L - \frac{x}{2} \right) + \frac{P}{EA} \right] x$$





$$u(x) = \left[\frac{\rho g}{E} \left(L - \frac{x}{2} \right) + \frac{F}{EA} \right] x$$

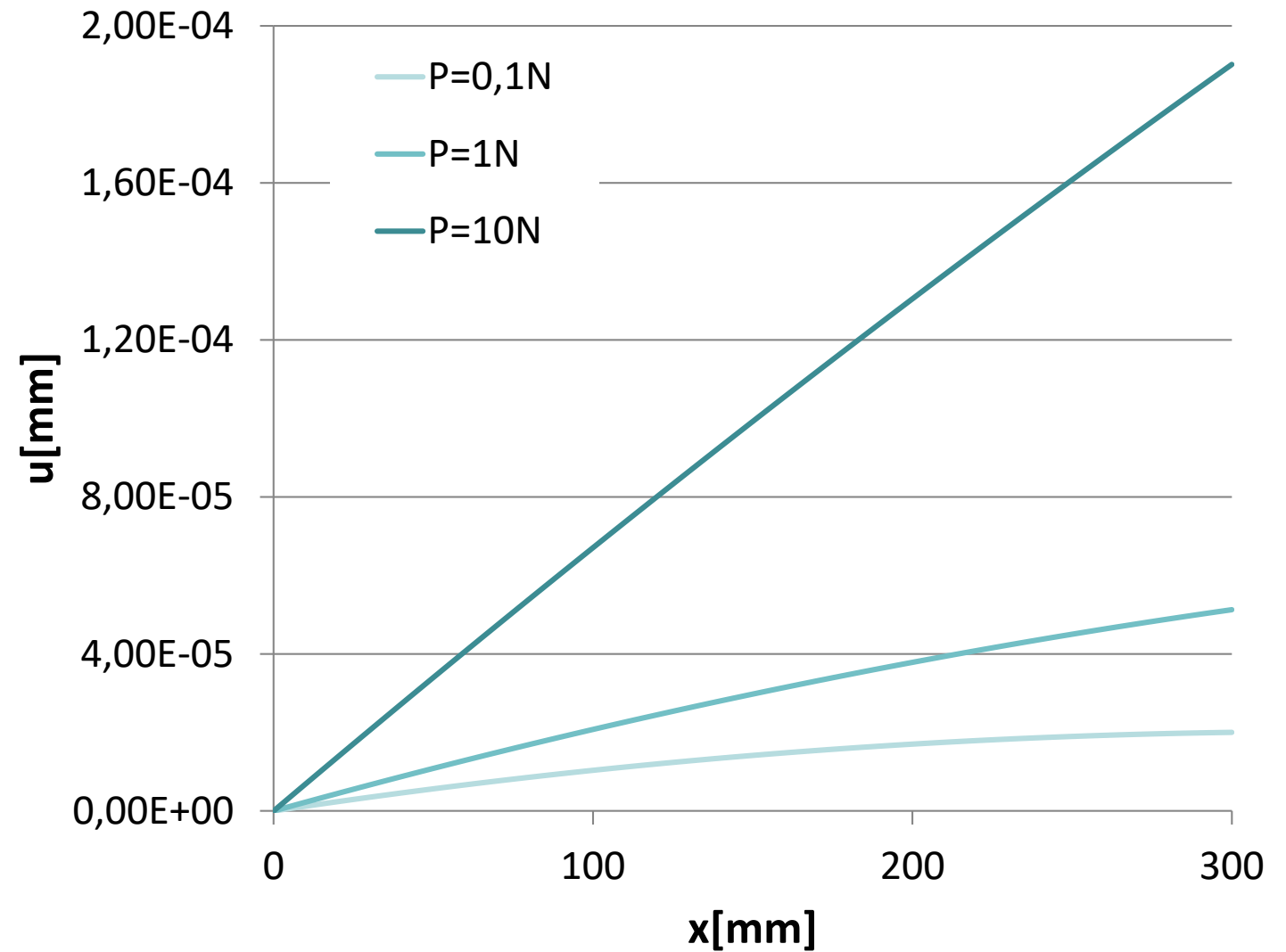
$g=9,81 \text{ m/s}^2$

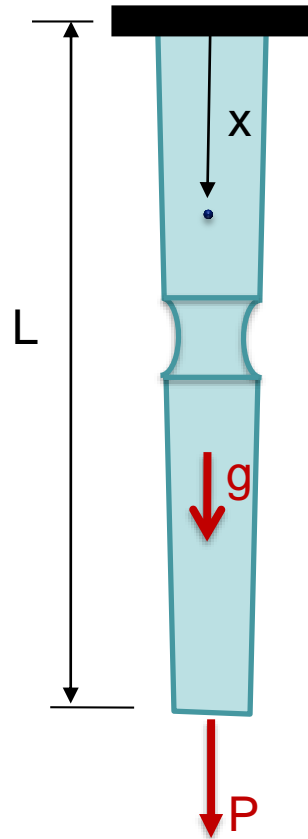
$L=300\text{mm}$

$E=72\text{GPa}$

$A=120 \text{ mm}^2$

$\rho= 2,7000\text{E-}06 \text{ kg/mm}^3$

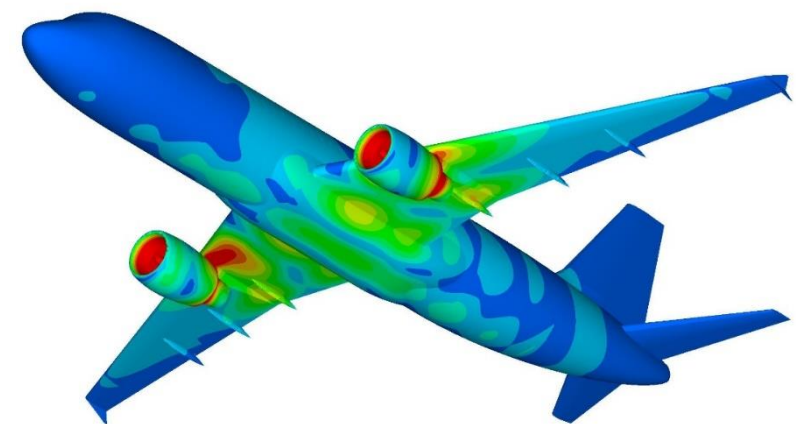




A medida que nos distanciamos dos problemas acadêmicos e nos aproximamos dos problemas reais de engenharia, estes vão se tornando mais complexos!

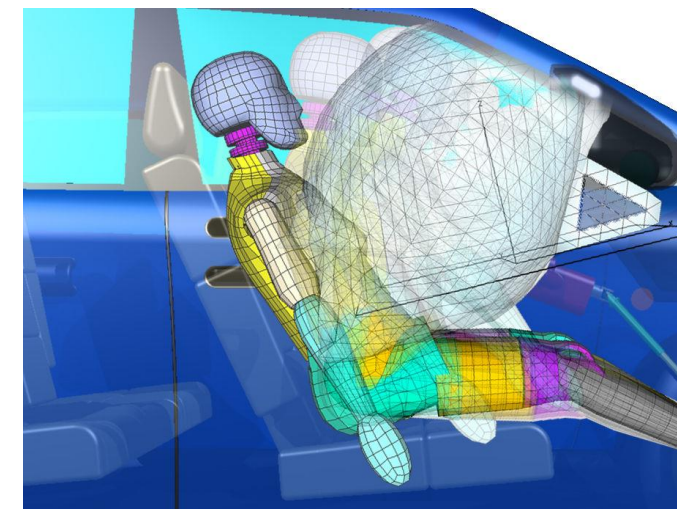
Dessa forma, encontrar a solução da equação diferencial, quando esta existir, é um trabalho árduo...

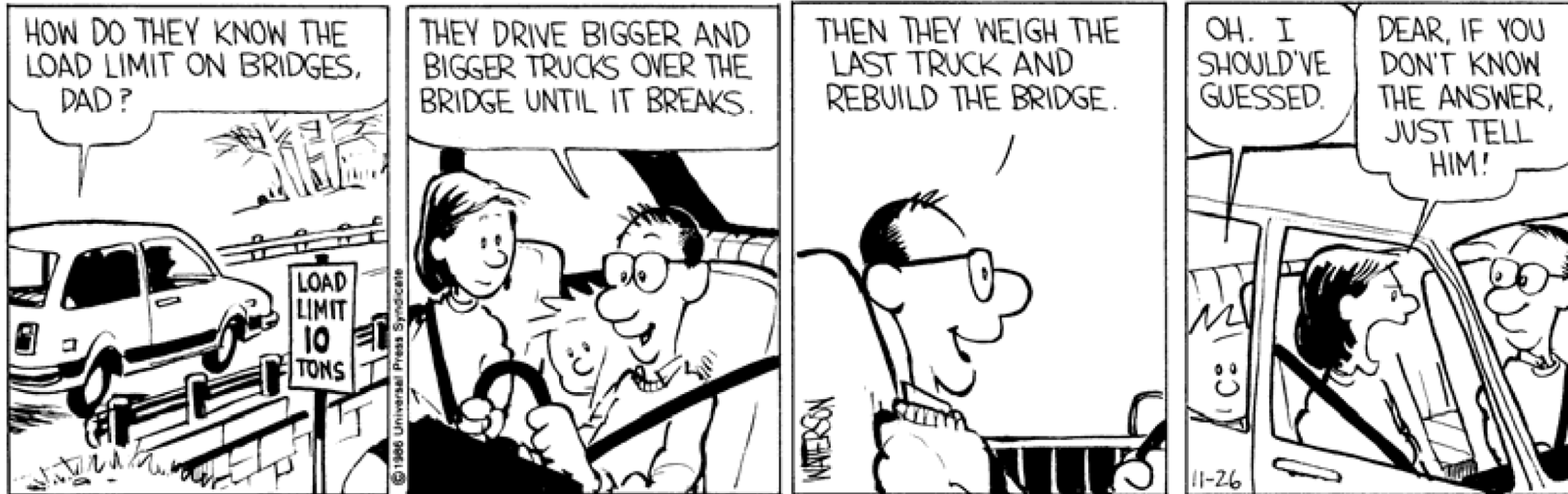
Além disso, os casos foram unidimensionais...



O problema é bem resumido pelo Dr A. R. Sykes, do *British Institution of Engineers*, que, em 1976, disse:

Engineering is the art of modelling materials we do not wholly understand, into shapes we cannot precisely analyse, so as to withstand forces we cannot precisely assess, in such a way that the public has no reason to suspect the extent of our ignorance.





Problemas devem ser simplificados usando certas aproximações...

Métodos numéricos são **aproximações** dos modelos matemáticos.



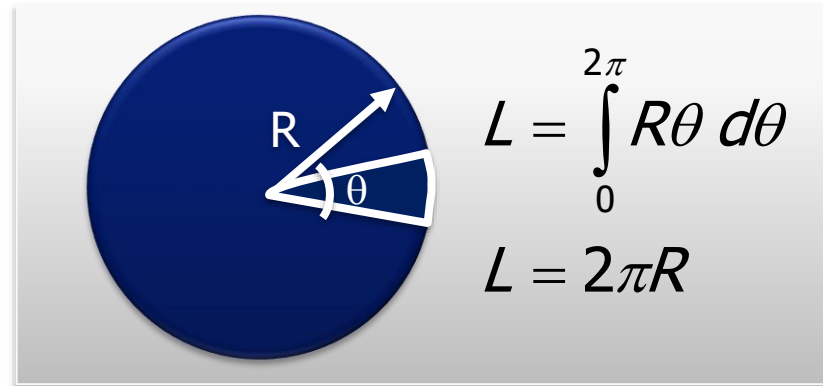
Modelo Numérico



- 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.



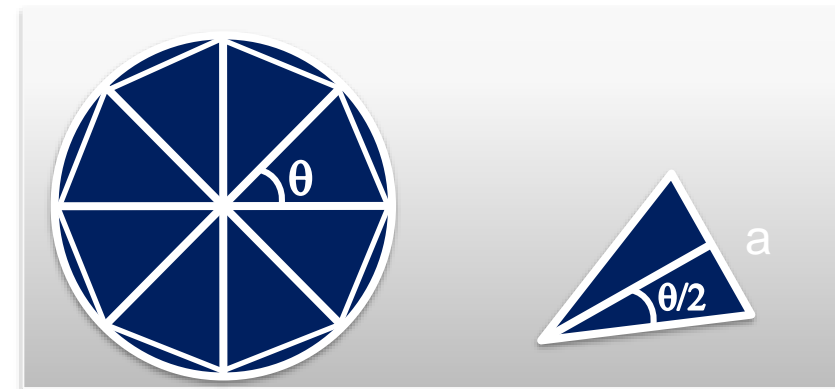
Discretizando o círculo em n partes:

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

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

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

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



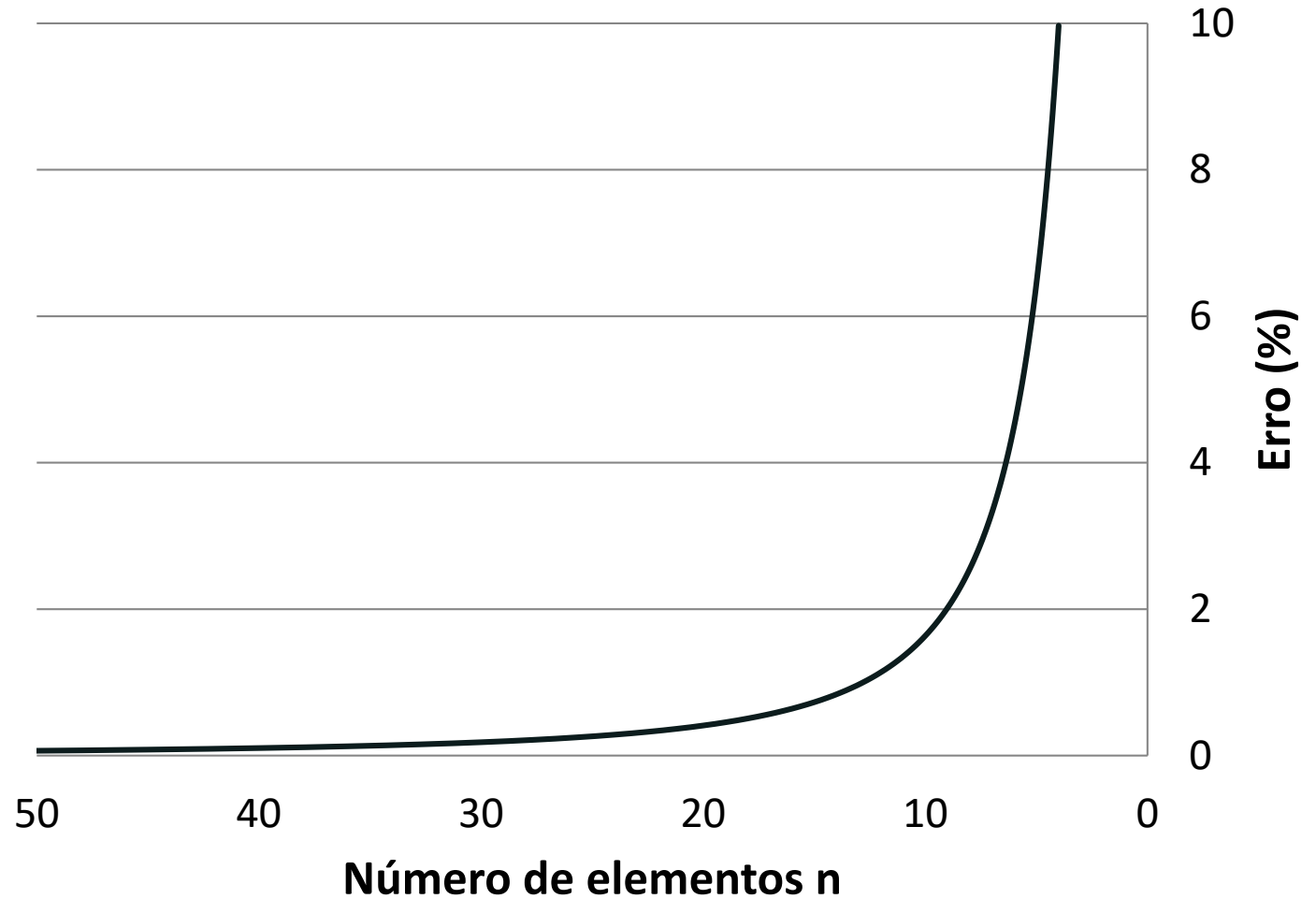
A solução numérica de um problema **não é melhor** do que o modelo matemático utilizado.

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!

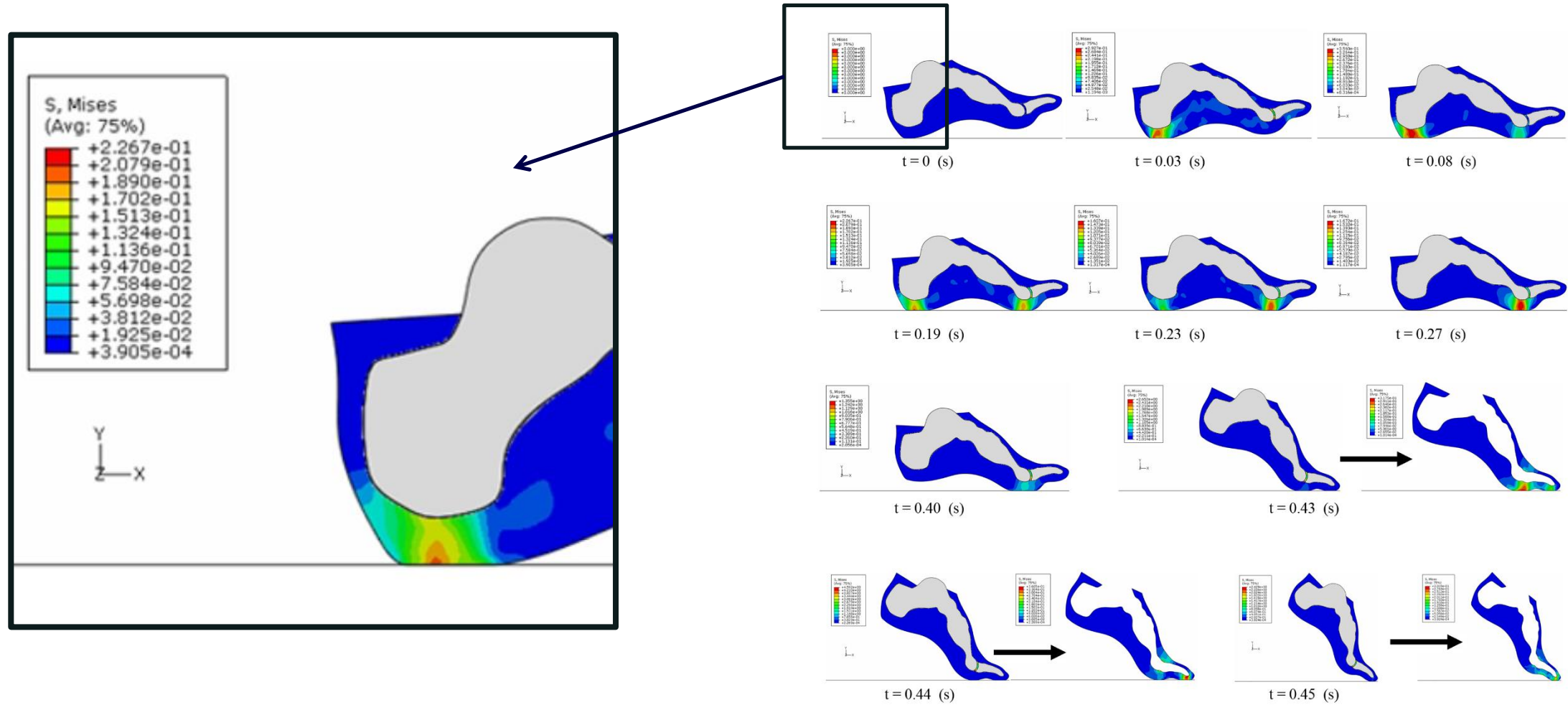




- **Pré-Processamento**
 - Criação da geometria;
 - Atribuição da propriedade de material;
 - Seleção do tipo de elemento;
 - Discretização do modelo.
- **Análise**
 - Aplicação das condições de contorno;
 - Aplicação da carga;
 - Submissão para solução.
- **Pós-Processamento**
 - Seleção do tipo de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



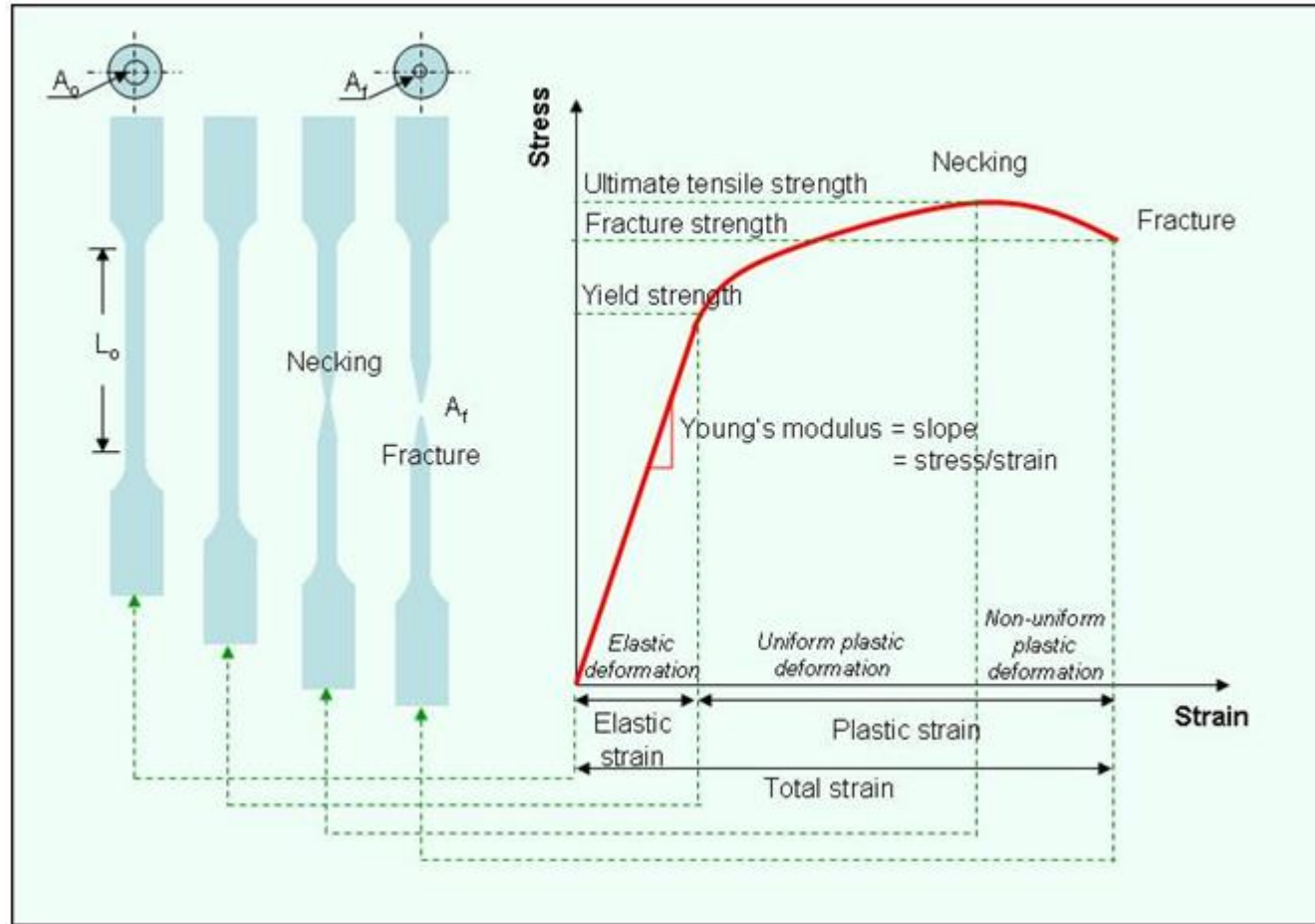
- **Ansys**
 - Ansys Workbench
 - Ansys - LS Dyna
- **Abaqus**
 - CAE
 - Standard
 - Explicit
- **MSc Products**
 - Patran
 - Nastran
 - Dytran
- **LS-Dyna**
- **Hyper mesh, Ideas, Unigraphics, Pro-Mechanica, Adina, Cosmos, ...**

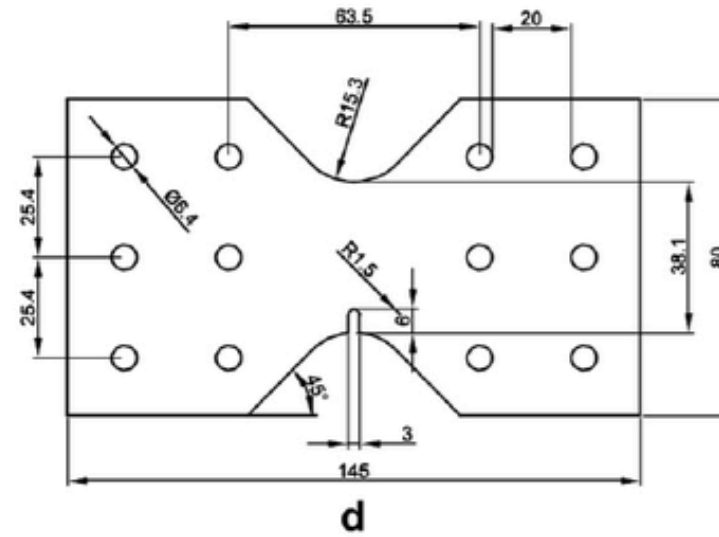
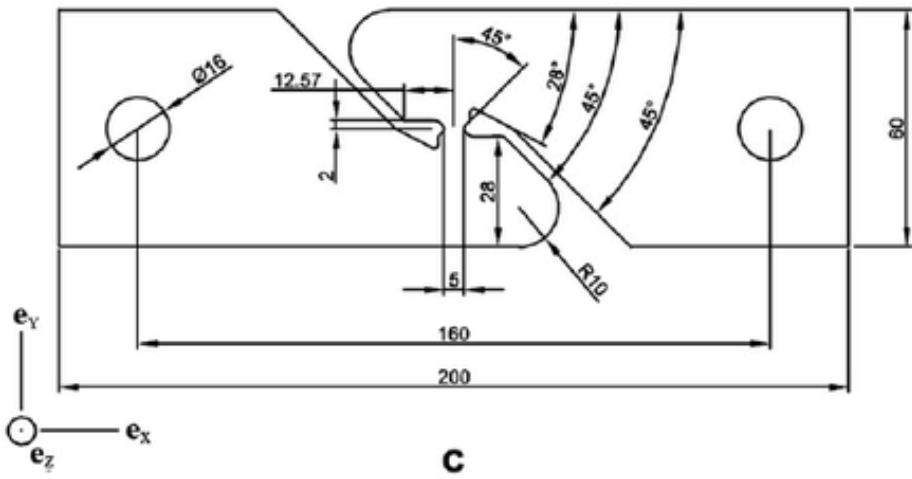
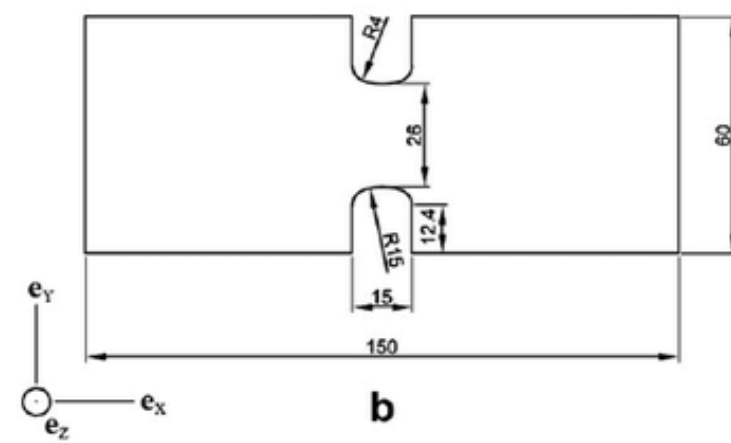
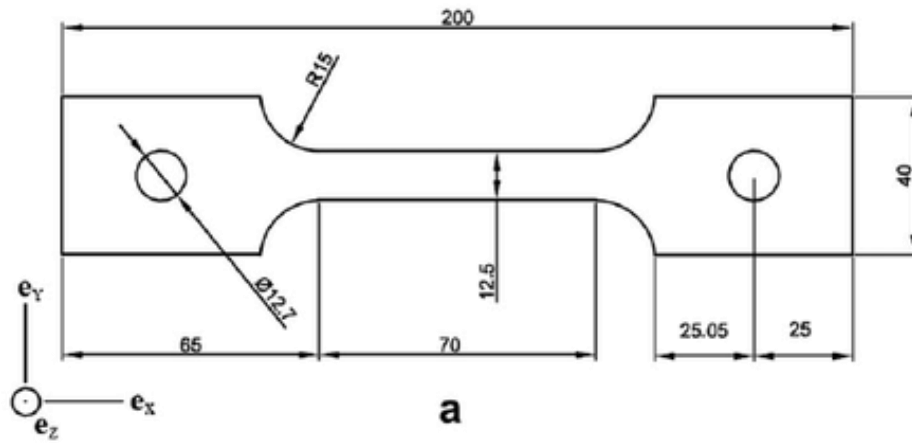


A Dynamic Finite Element Analysis of Human Foot Complex in the Sagittal Plane during Level Walking
Zihui Qian Lei Ren Yun Ding John R. Hutchinson Luquan Ren
November 11, 2013 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0079424>



Como analisar os resultados???



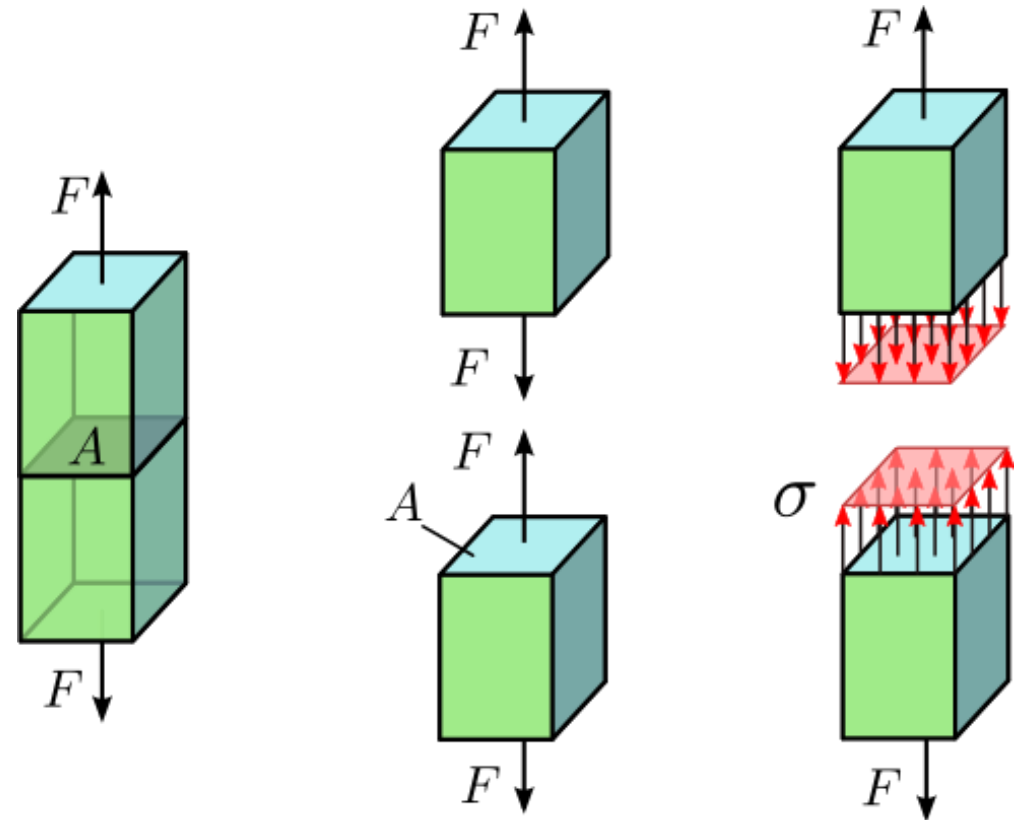


Gruben, G., Fagerholt, E., Hopperstad, O.S., Børvik, T., *European Journal of Mechanics A-solids*, Fracture characteristics of a cold-rolled dual-phase steel, v. 30, p. 204-218, 2011.



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

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

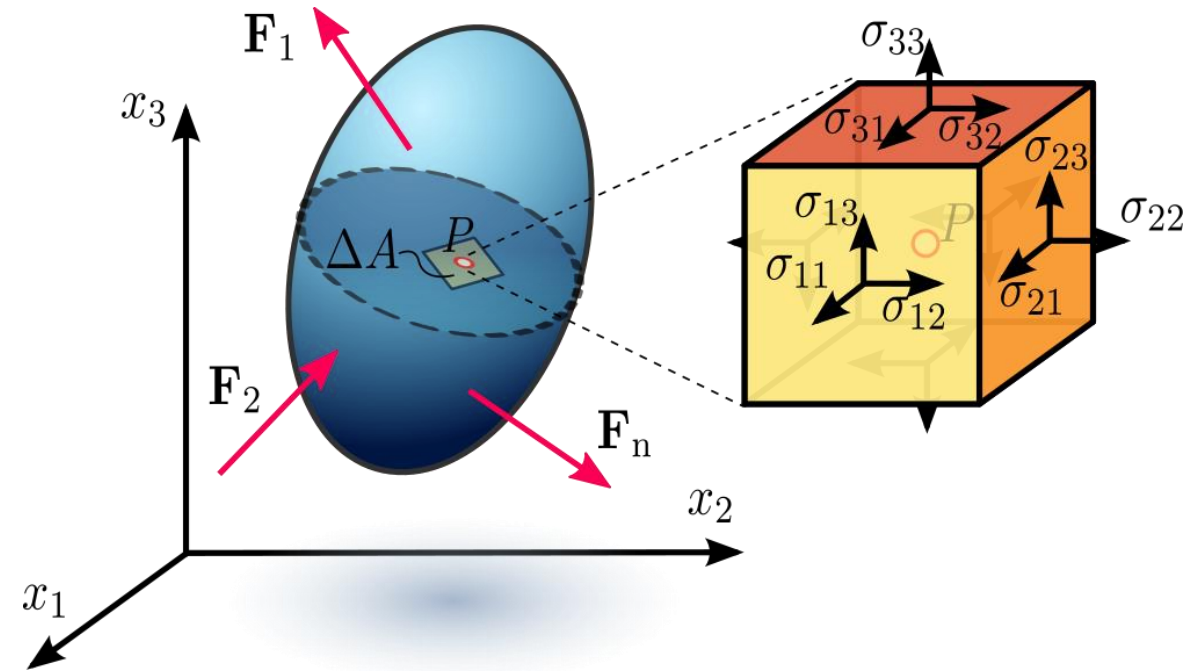


By Jorge Stolfi - Own work, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24499456>



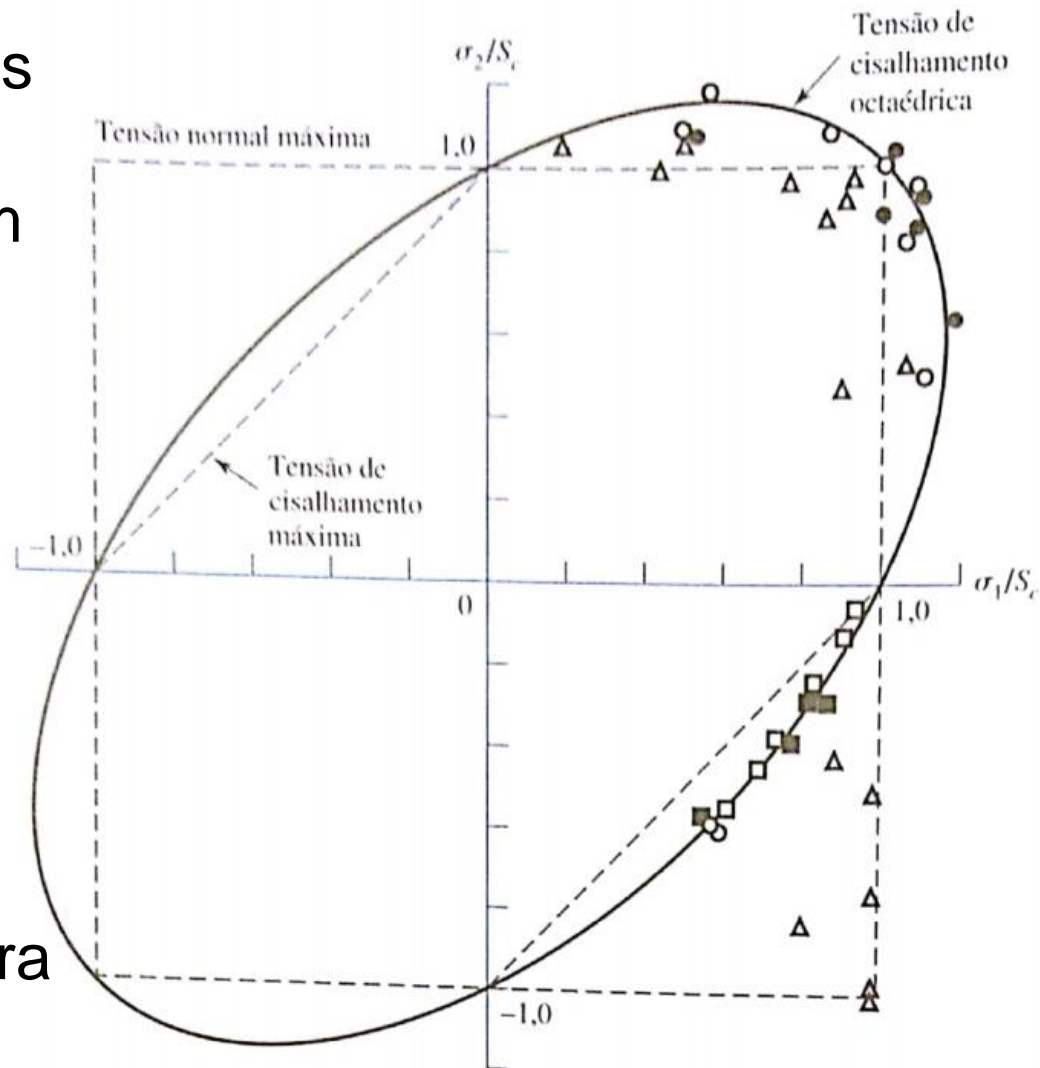
$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \text{ VS } \sigma_y$$

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



Necessidade de uma teoria de falha

- As teorias de falha propõem meios adequados para comparar os estados de tensão multiaxiais com uma única tensão;
- Geralmente, baseiam-se na hipótese de tensão crítica;
- Teorias de falha levam em conta aspectos importantes como *invariância*;
- Algumas teorias de falha se mostraram bastante *poderosas*, pois são *simples e adequadas* para várias situações.



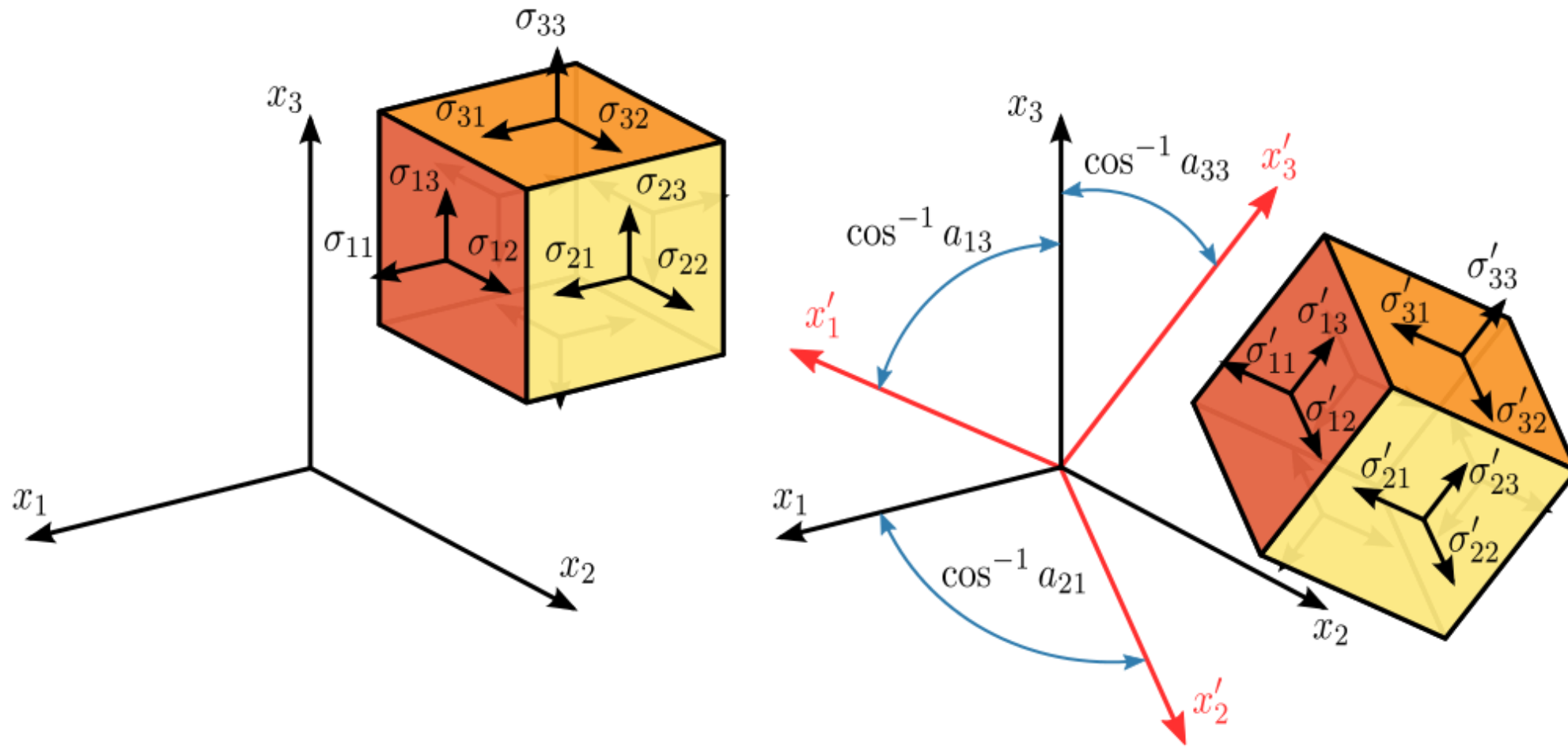
Escoamento ($S_c = S_y$)

- Aço Ni-Cr-Mo
- Aço AISI 1023
- 2024-T4 Al
- 3S-H Al

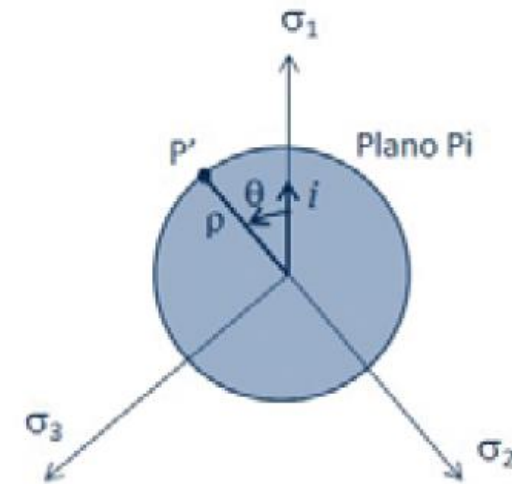
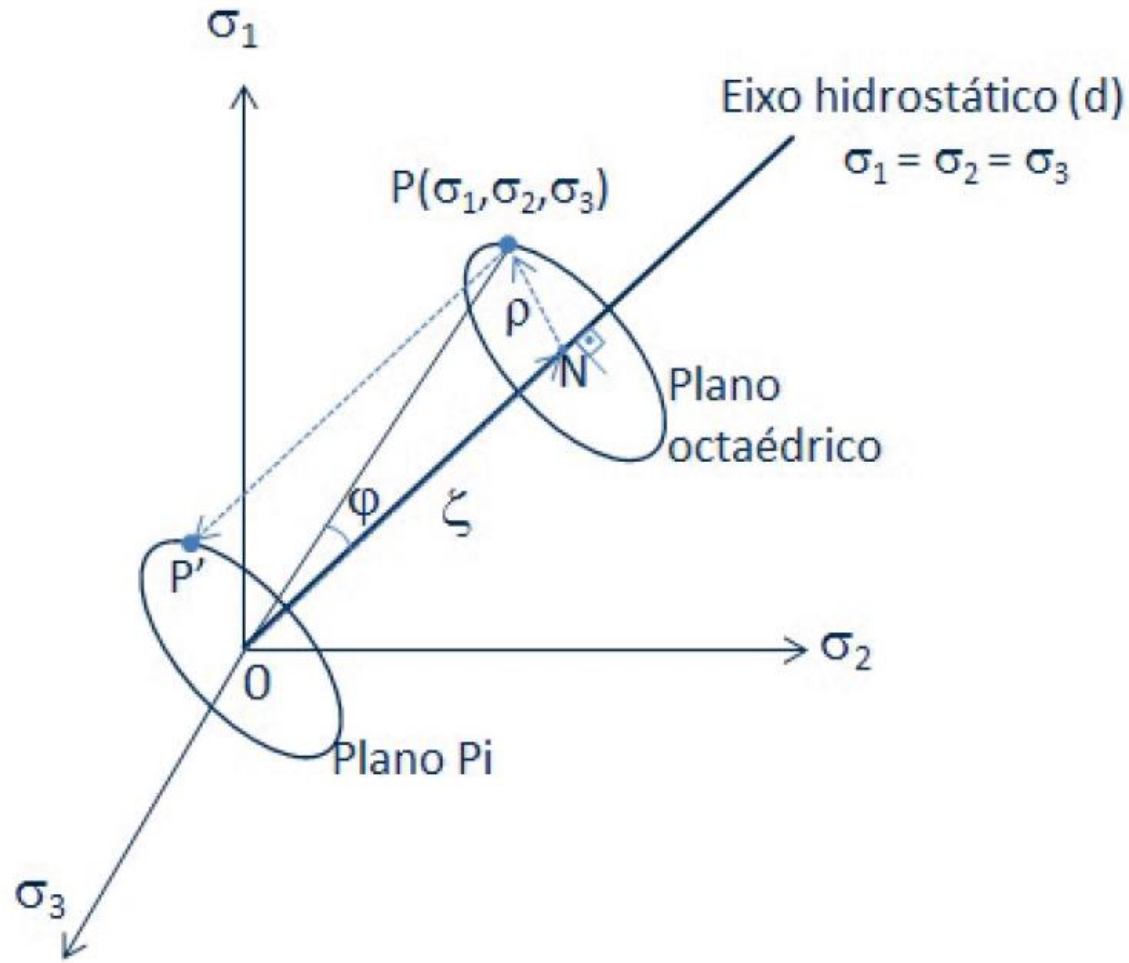
Fratura ($S_c = S_{ut}$)

- △ Ferro fundido cinza

Primeira característica importante: invariância!!!



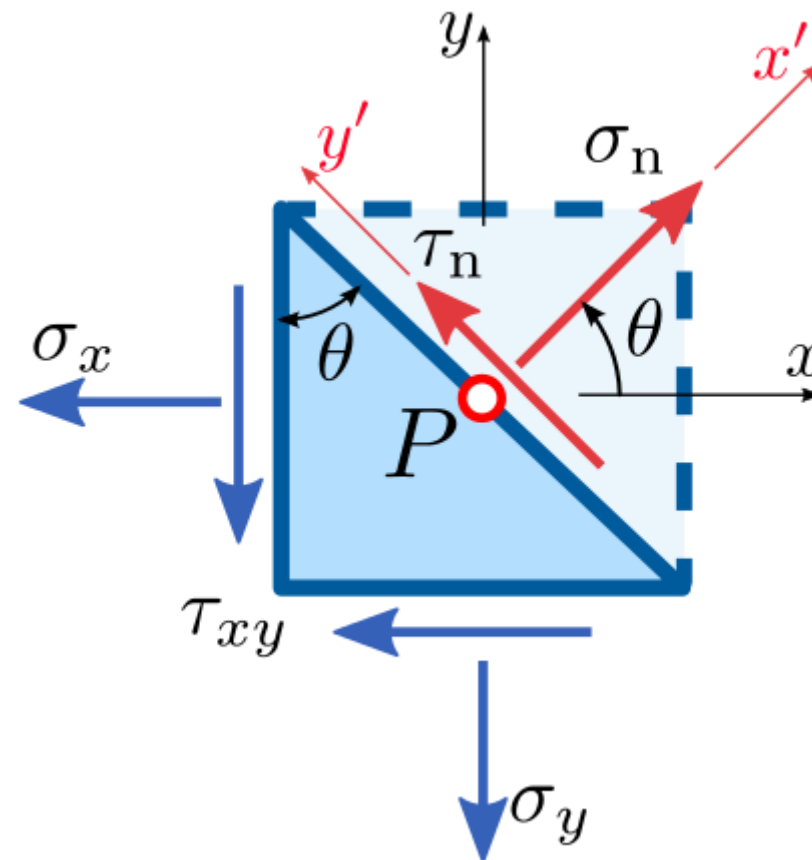
By Sanpaz - Own work, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5668491>





Máxima tensão principal (normal)

- Diz o teorema da máxima tensão principal que a falha começa quando a tensão máxima em volume elementar excede o limite de elasticidade S_y definido em ensaio de tração uniaxial do mesmo material.
- Para qualquer elemento de tensão, use o círculo de Mohr para encontrar as tensões principais.
- Compare a tensão principal com a tensão de escoamento do material.
- Muitas vezes, é a primeira teoria proposta pelos engenheiros.
- É uma boa teoria?





$$\sigma_n A \sec \theta = \tau_{xy} A (\sin \theta + \tan \theta \cos \theta) + A (\sigma_x \cos \theta + \sigma_y \tan \theta \sin \theta)$$

$$\tau_n A \sec \theta + \tau_{xy} A (\tan \theta \sin \theta - \cos \theta) + A (\sigma_x \sin \theta - \sigma_y \tan \theta \cos \theta) = 0$$

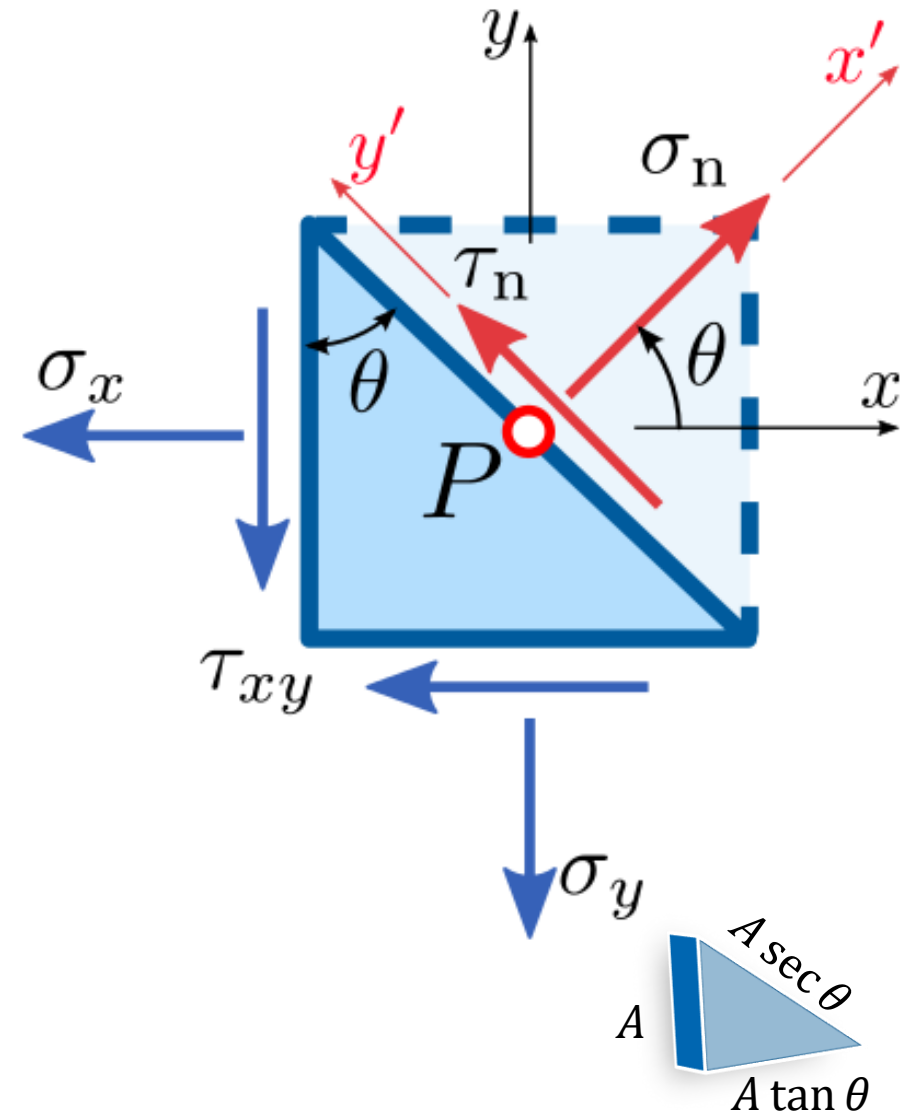
$$\sigma_n = 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta + (\sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta)$$

$$\tau_n = \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) - \sin \theta \cos \theta (\sigma_x - \sigma_y)$$

$$\sin^2 \theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{2} \quad \cos^2 \theta = \frac{1 + \cos 2\theta}{2}$$

$$\tau_n = -\frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta$$

$$\sigma_n = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta$$





- Vamos analisar casos extremos de tensão no material. Isto é, derivar as equações que encontramos com respeito a θ e encontrar as equações de tensão principal e cisalhamento máximo.

$$R = \sqrt{\left[\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\right]^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{avg} = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2)$$

$$\tan 2\theta_p = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

$$\tan 2\theta_p = \frac{\tau_{xy}}{(\sigma_x - \sigma_y)/2}$$

$$\sin 2\theta_p = \frac{\tau_{xy}}{R} \quad \cos 2\theta_p = \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2R}$$

- $\sigma_1 = \sigma_{avg} + R$
- $\sigma_2 = \sigma_{avg} - R$

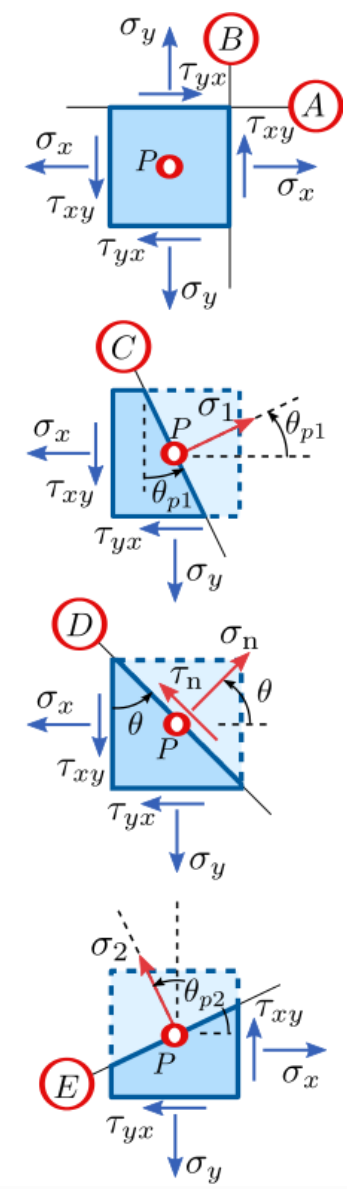
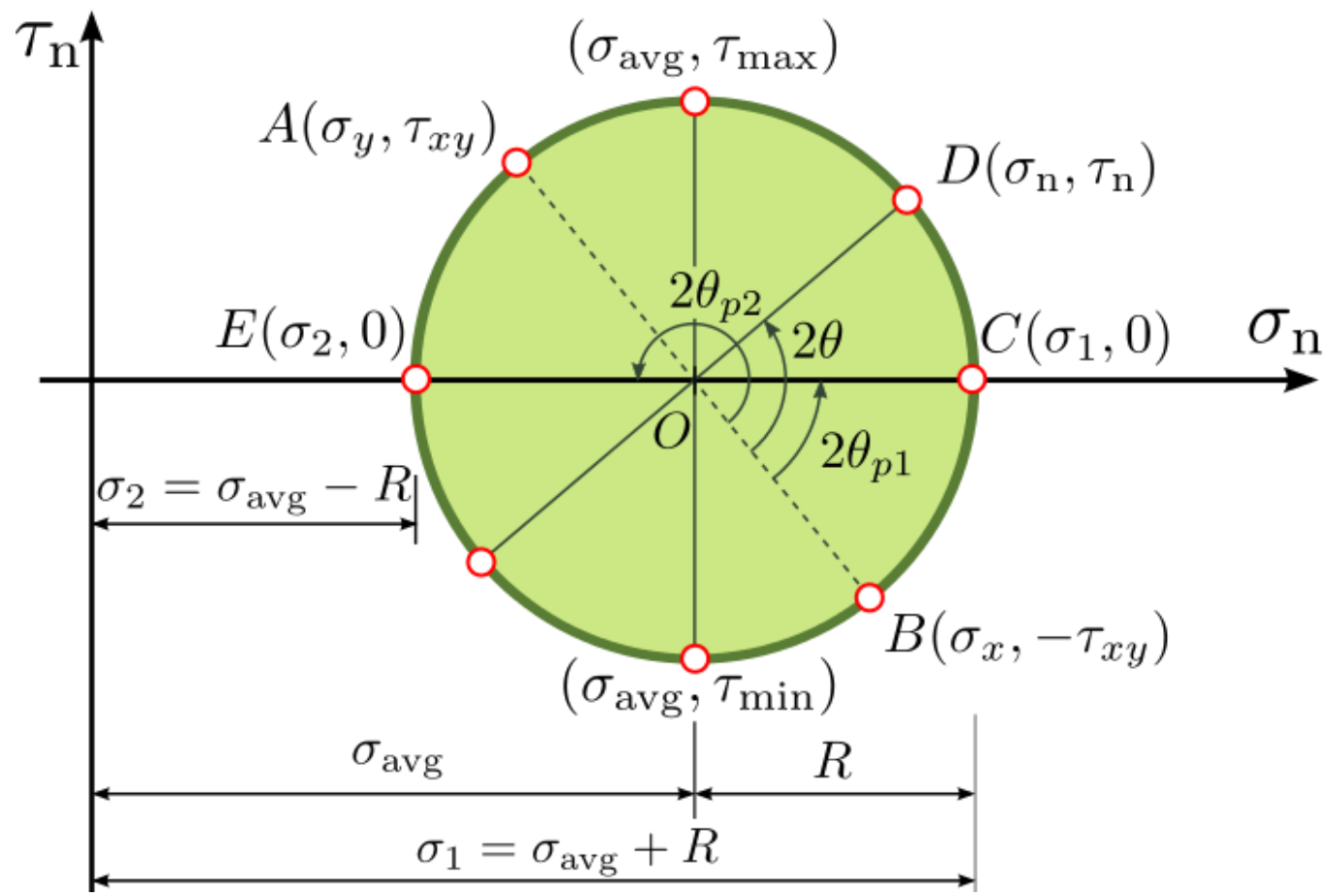
$$\tan 2\theta_s = \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2\tau_{xy}} = -\frac{1}{\tan 2\theta_p} = -\cot 2\theta_p$$

$$2\theta_p = 2\theta_s \pm \frac{\pi}{2}$$

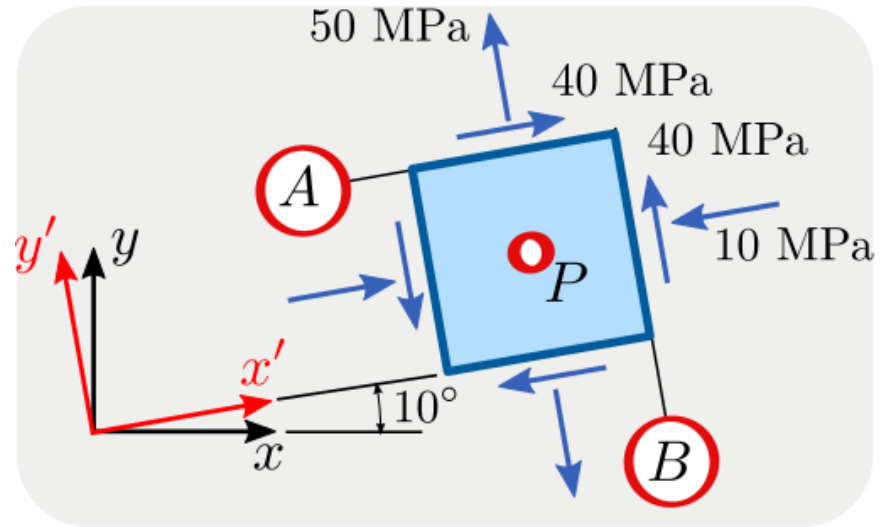
- $\theta_p = \theta_s \pm \frac{\pi}{4} \quad \tau_{max} = \frac{R}{2}$



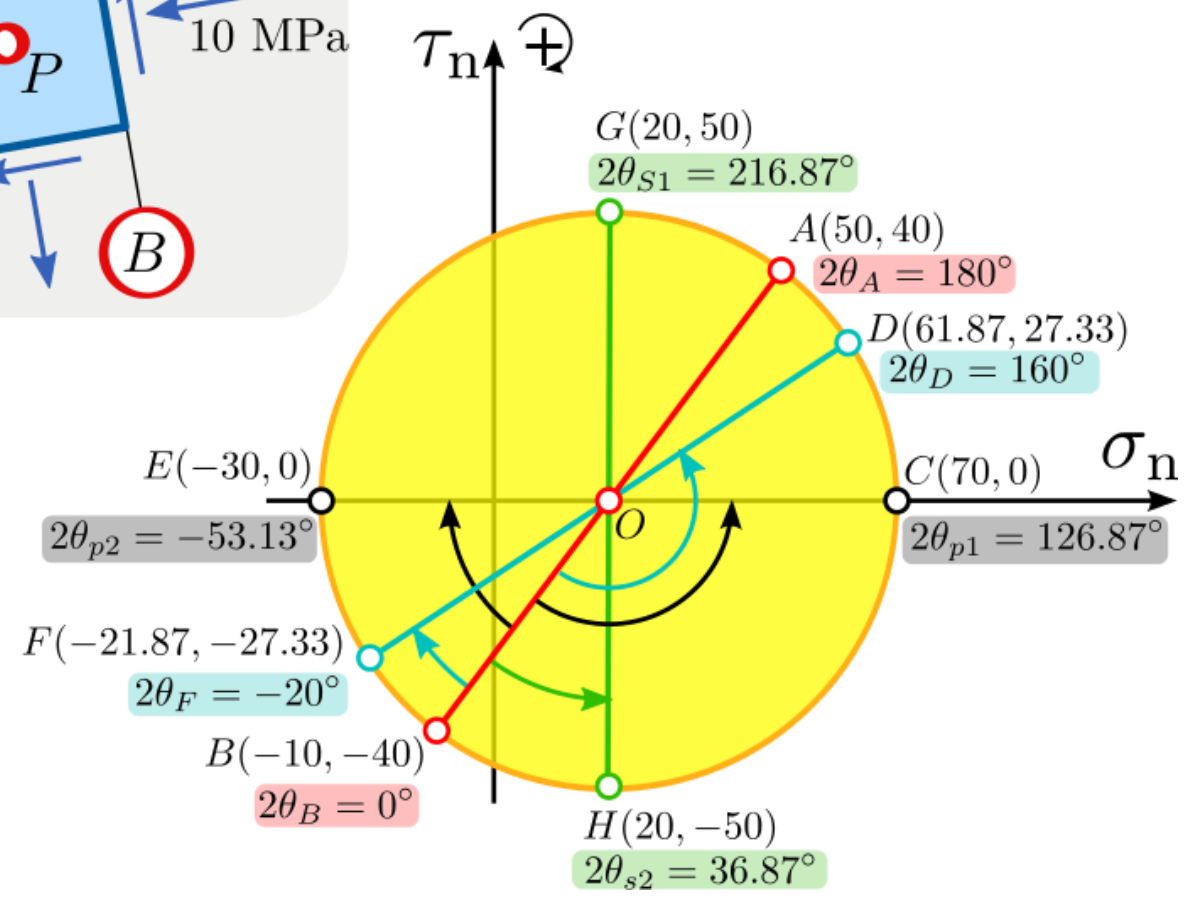
Círculo de Mohr



By Sanpaz - Own work, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5736462>



$\sigma_{x'} = -10 \text{ MPa}$
 $\sigma_{y'} = 50 \text{ MPa}$
 $\tau_{x'y'} = 40 \text{ MPa}$





Dados experimentais mostram que a teoria é não conservativa no 4º quadrante.

Esta teoria não é segura para usar em materiais dúcteis.

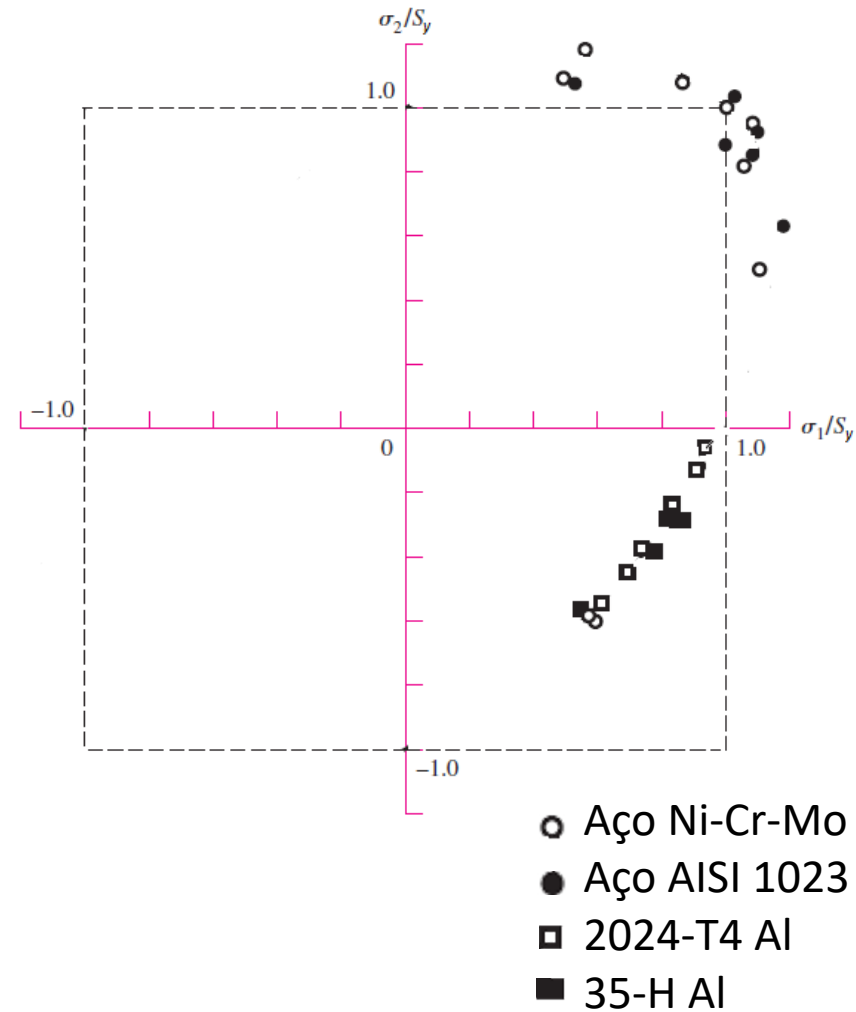


Figura extraída do Shigley



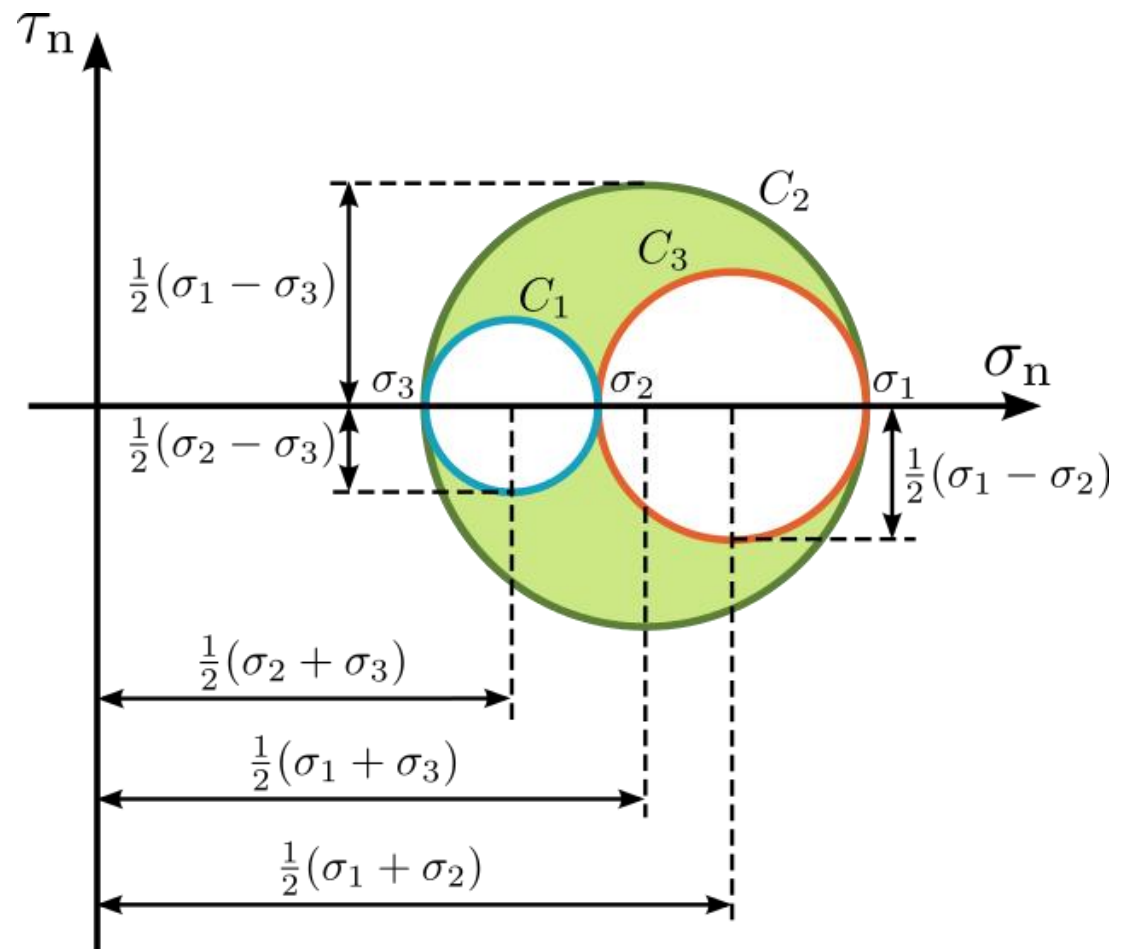
- O escoamento começa quando a tensão máxima de cisalhamento em um volume elementar excede a tensão máxima de cisalhamento no escoamento em um teste de tração uniaxial do mesmo material.
- Aprendemos, com o Círculo de Mohr que a tensão cisalhante máxima no ensaio de tração uniaxial vale $\sigma_1/2$.
- No instante em que se inicia o escoamento, $\sigma_1 = S_y$, e, portanto, a máxima tensão cisalhante é $S_y/2$.
- Ou seja:
 - O escoamento começa quando a tensão máxima de cisalhamento em um volume elementar excede $S_y/2$.

- Para qualquer elemento de tensão, use o círculo de Mohr para encontrar a tensão máxima de cisalhamento. Compare-a com $\frac{S_y}{2}$.
- Para $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$,

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq \frac{S_y}{2}$$

Isto é,

$$\sigma_1 - \sigma_3 \geq S_y$$



By Sanpaz (Own work) [Public domain], via Wikimedia Commons



- Considere σ_A e σ_B as duas tensões principais não nulas, que devem ser ordenadas de modo que $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.
- Assuminndo $\sigma_A \geq \sigma_B$, há 3 casos para considerar,

$$\sigma_A \geq \sigma_B \geq 0$$

$$\sigma_1 = \sigma_A \text{ e } \sigma_3 = 0$$
$$\sigma_A \geq S_y$$

$$\sigma_A \geq 0 \geq \sigma_B$$

$$\sigma_1 = \sigma_A \text{ e } \sigma_3 = \sigma_B$$
$$\sigma_A - \sigma_B \geq S_y$$

$$0 \geq \sigma_A \geq \sigma_B$$

$$\sigma_1 = 0 \text{ e } \sigma_3 = \sigma_B$$
$$\sigma_B \leq -S_y$$



- Conservador em todos os quadrantes
- Comumente usado para situações de projeto

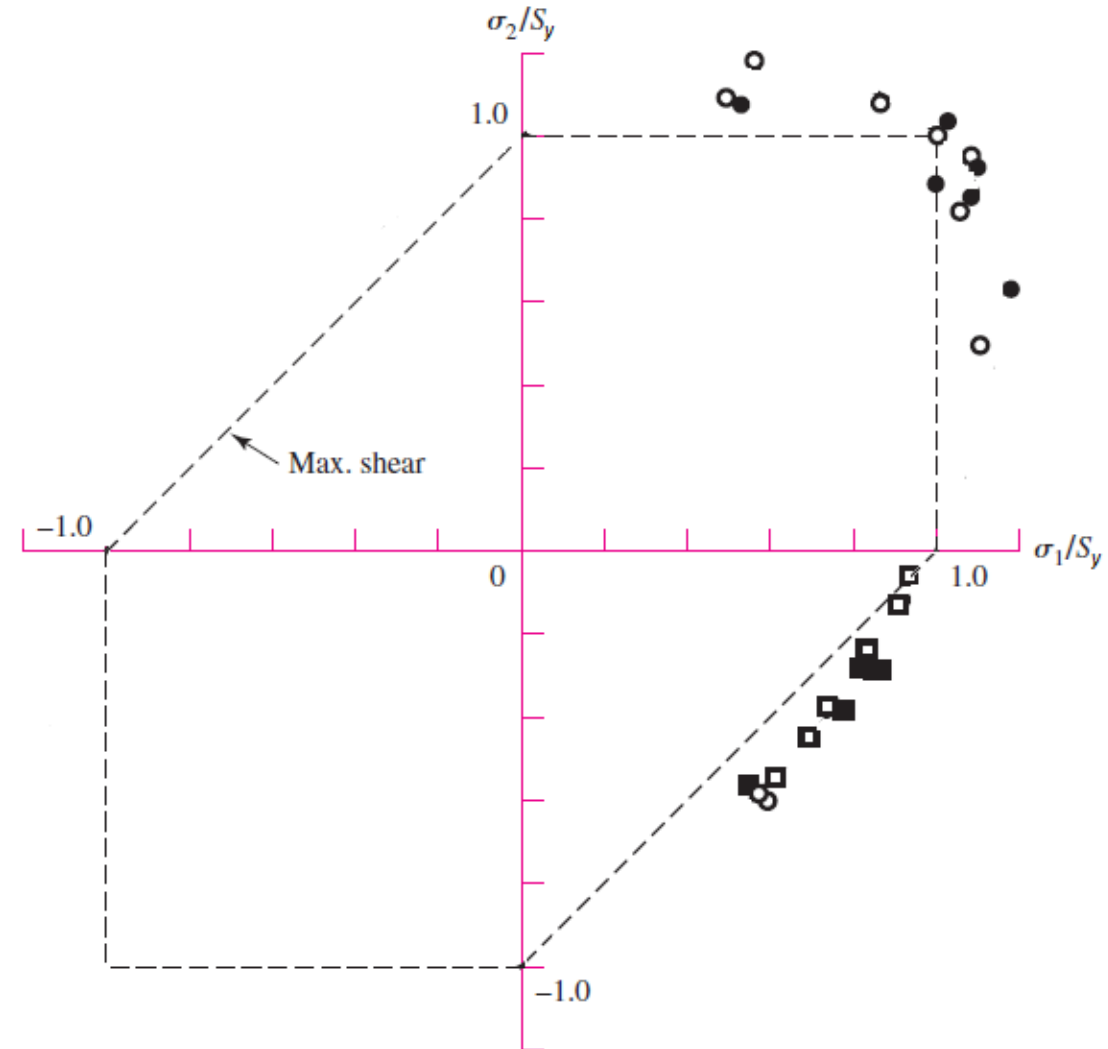
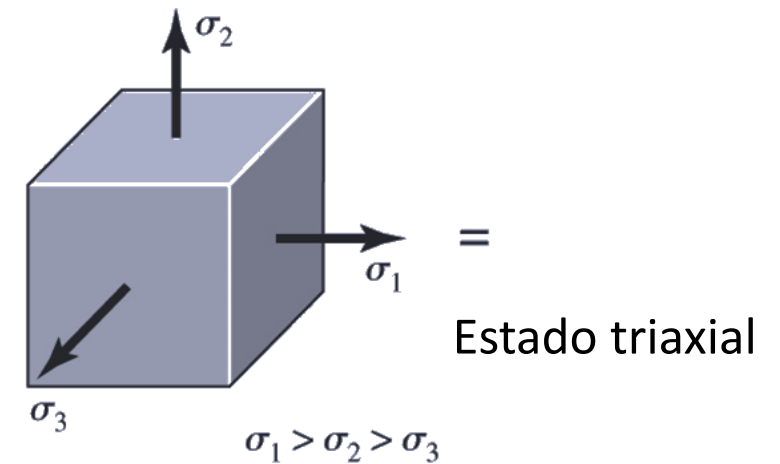


Figura extraída do Shigley



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.

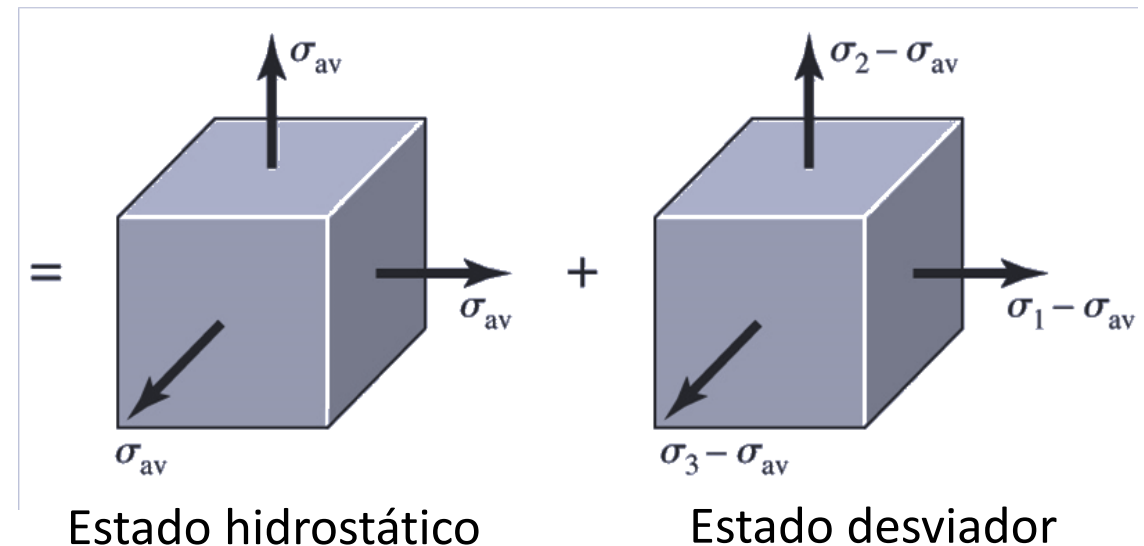
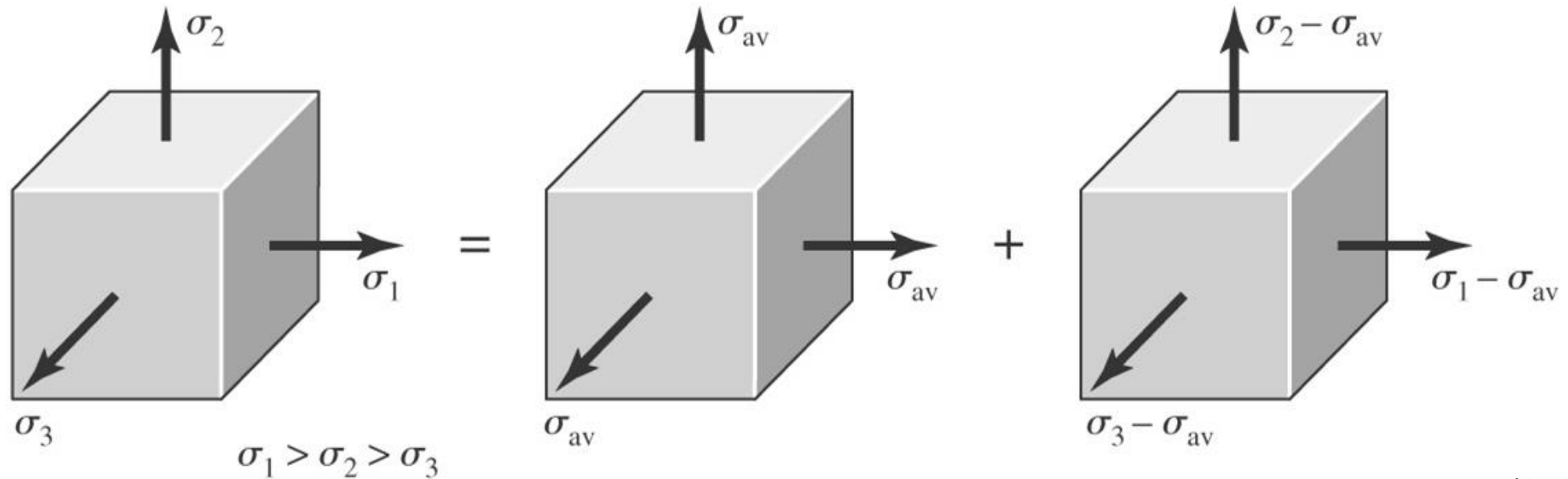


Figura extraída do Shigley

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

$$u = \frac{1}{2} [\sigma_1 \epsilon_1 + \sigma_2 \epsilon_2 + \sigma_3 \epsilon_3]$$

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 ,

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

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



- Confiabilidade de aproximadamente 50% em todos os quadrantes
- Comumente usado para situações de projeto

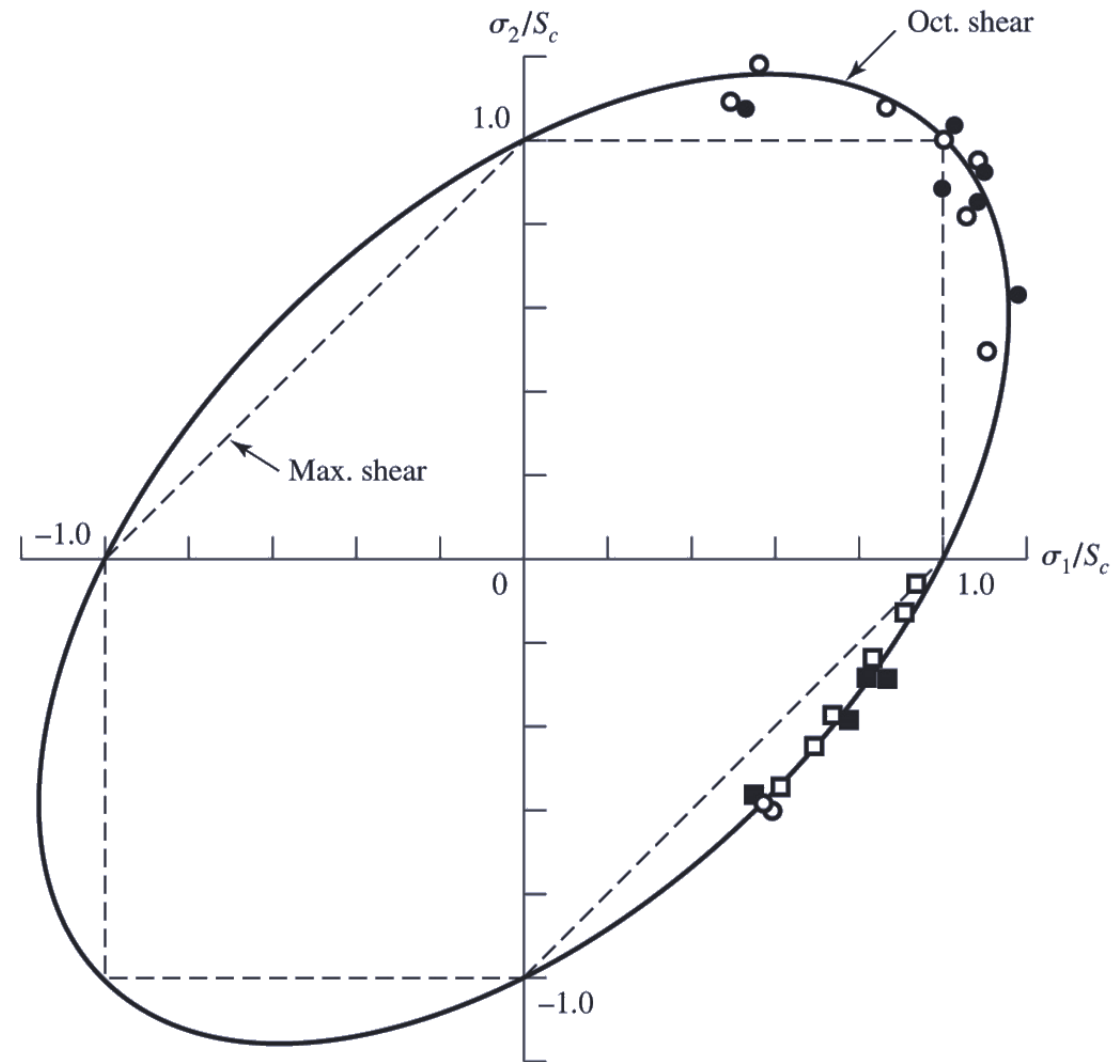


Figura extraída do Shigley



- $\sigma_A = -\sigma_B = \tau$
- A intersecção da linha de cisalhamento puro com curva de falha indica que a resistência ao cisalhamento foi atingida
- Cada teoria da falha prevê que a resistência ao cisalhamento é uma fração da tensão normal

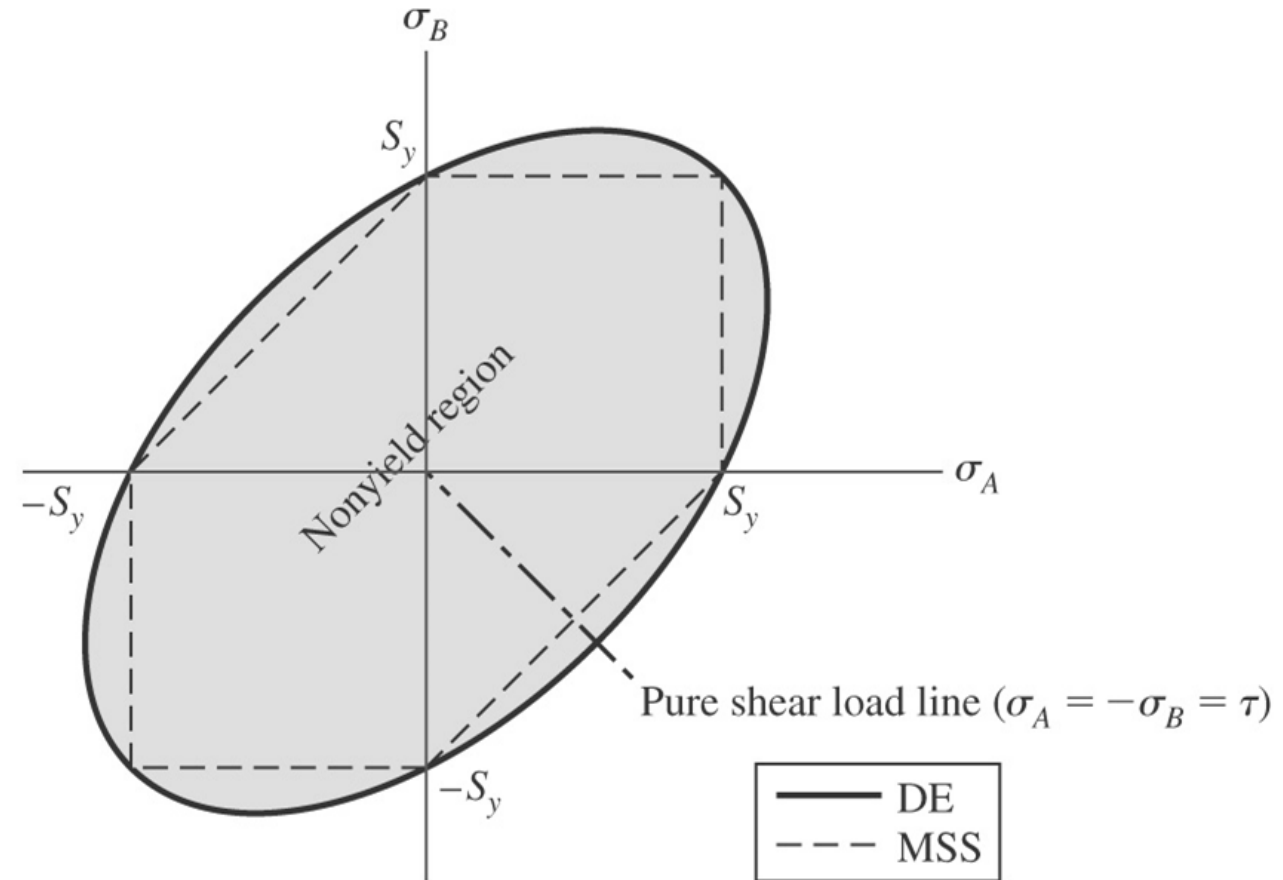


Figura extraída do Shigley



Teoria da máxima tensão cisalhante

$$\sigma_1 - \sigma_3 \geq S_y$$

Portanto,

$$2\tau \geq S_y$$

No escoamento,

$$2\tau = S_y$$

Isto é,

$$\tau = S_{sy} = 0.5S_y$$

Teoria da energia de distorção

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

Portanto,

$$\sigma' = (3\tau^2)^{1/2} \geq S_y$$

No escoamento,

$$\sigma' = S_y$$

Isto é,

$$\tau = S_{sy} = \frac{S_y}{\sqrt{3}} = 0.577S_y$$



- Um aço laminado a quente tem tensão de escoamento $S_y = 690 \text{ MPa}$.
Estime o fator de segurança para os seguintes estados de tensão em um volume elementar,
 - $\sigma_x = 500 \text{ MPa}, \sigma_y = 500 \text{ MPa}, \tau_{xy} = 0 \text{ MPa}$
 - $\sigma_x = 400 \text{ MPa}, \sigma_y = 270 \text{ MPa}, \tau_{xy} = -100 \text{ MPa}$
 - $\sigma_x = 0 \text{ MPa}, \sigma_y = 270 \text{ MPa}, \tau_{xy} = 310 \text{ MPa}$
 - $\sigma_x = -270 \text{ MPa}, \sigma_y = -400 \text{ MPa}, \tau_{xy} = 100 \text{ MPa}$
 - $\sigma_1 = 200 \text{ MPa}, \sigma_2 = 200 \text{ MPa}, \sigma_3 = 200 \text{ MPa}$



Estado de tensões			Raio Mohr R	Tensão media σ_{avg}	Tensões Principais Estado Plano		Tensões principais $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$		
σ_x	σ_y	τ_{xy}			σ_A	σ_B	σ_1	σ_2	σ_3
500	500	0	0,0	500,0	500,0	500,0	500,0	500,0	0,0
400	270	-100	119,3	335,0	454,3	215,7	454,3	215,7	0,0
0	270	310	338,1	135,0	473,1	-203,1	473,1	0,0	-203,1
-270	-400	100	119,3	-335,0	-215,7	-454,3	0,0	-215,7	-454,3
							30	30	30



Tensões principais $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$			Critério da máxima tensão cisalhante (MSS): $\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$	Critério da máxima energia de distorção: $\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} \right]^{1/2}$	$n = \frac{S_y/2}{\tau_{max}}$	$n = \frac{S_y}{\sigma'}$
σ_1	σ_2	σ_3				
500,0	500,0	0,0	250,0	500,0	1,4	1,4
454,3	215,7	0,0	227,1	393,6	1,5	1,8
473,1	0,0	-203,1	338,1	601,0	1,0	1,1
0,0	-215,7	-454,3	227,1	393,6	1,5	1,8
30	30	30	0	0	∞	∞



- Obviamente, usando o critério de falha da energia de deformação, o coeficiente de segurança será maior ou igual àquele obtido pelo critério da máxima tensão cisalhante
- Em estados triaxiais hidrostáticos, nenhum dos dois critérios prevê a existência de falha.

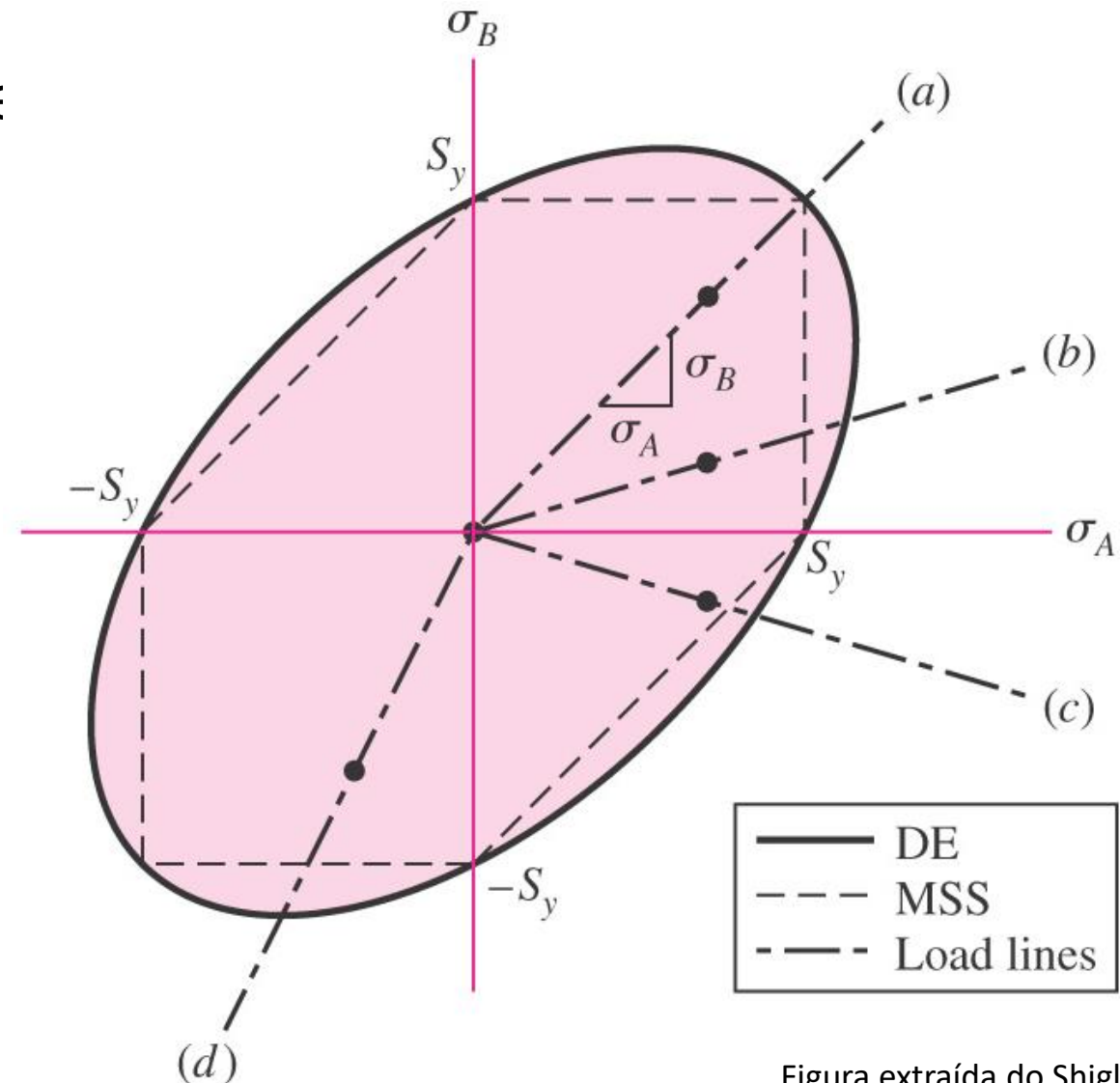


Figura extraída do Shigley



- O caso e não está plotado na figura anterior porque, obviamente, não é um estado plano de tensões.

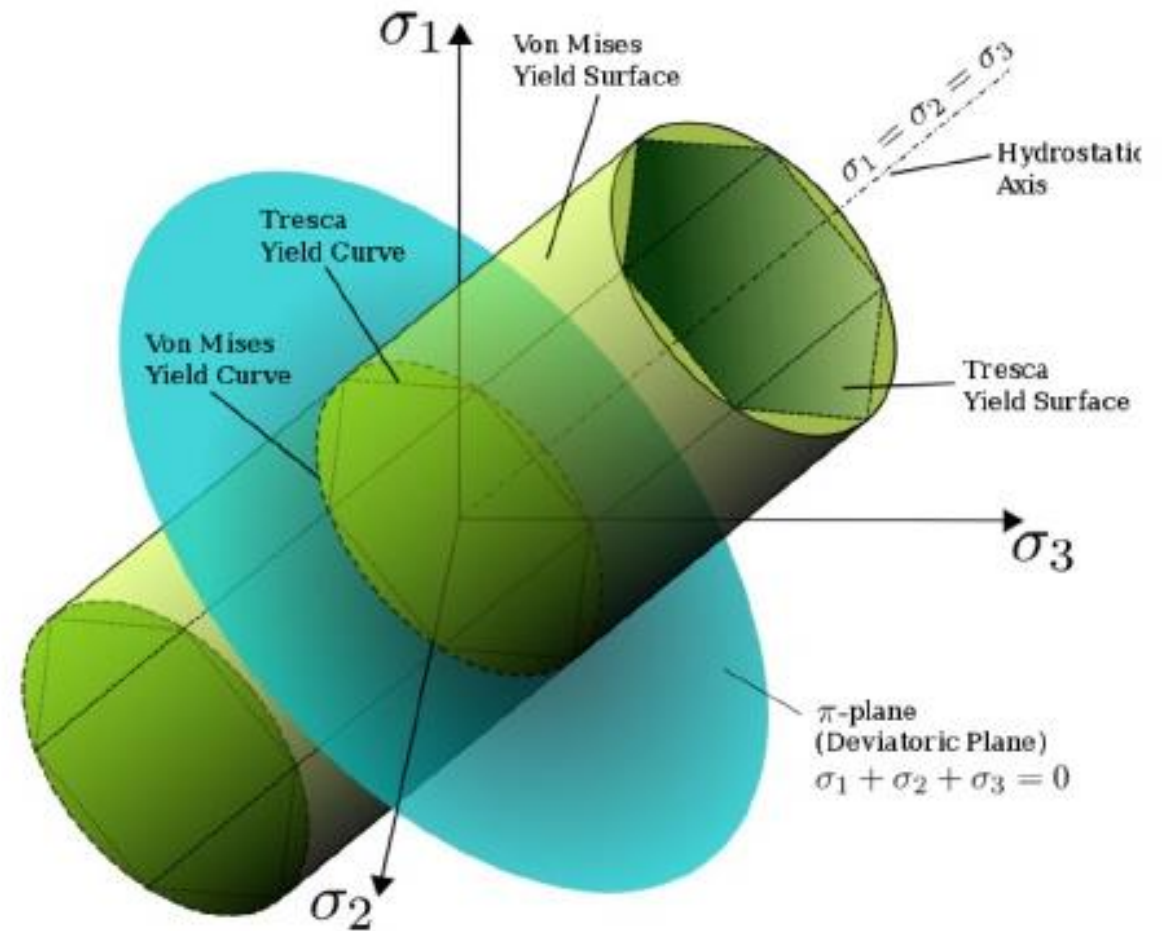
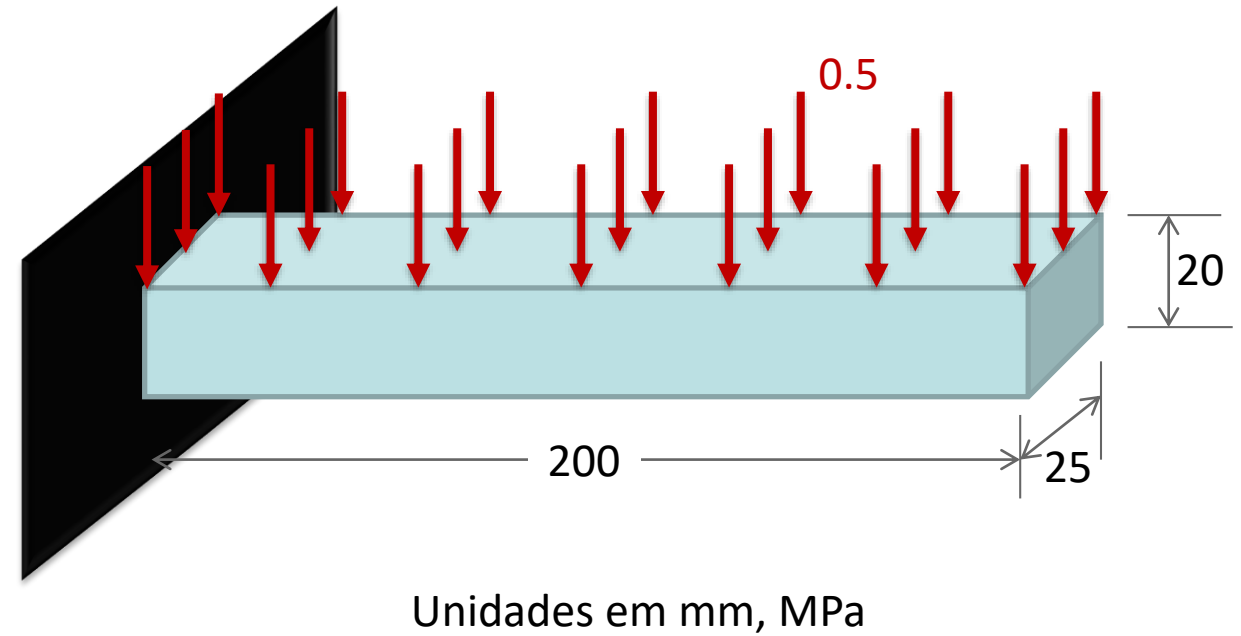


Figura extraída de: Brotons, V.; Ivorra, S.; Irlles, R. (2012). *Using mathematica applets made for the education on failure criteria for metallic and geological geotechnical materials.*

Vamos analisar as tensões e deformações de uma viga engastada de aço, cuja geometria e carregamento estão mostrados na figura ao lado. Para isso, usaremos o software comercial de elementos finitos Abaqus®.

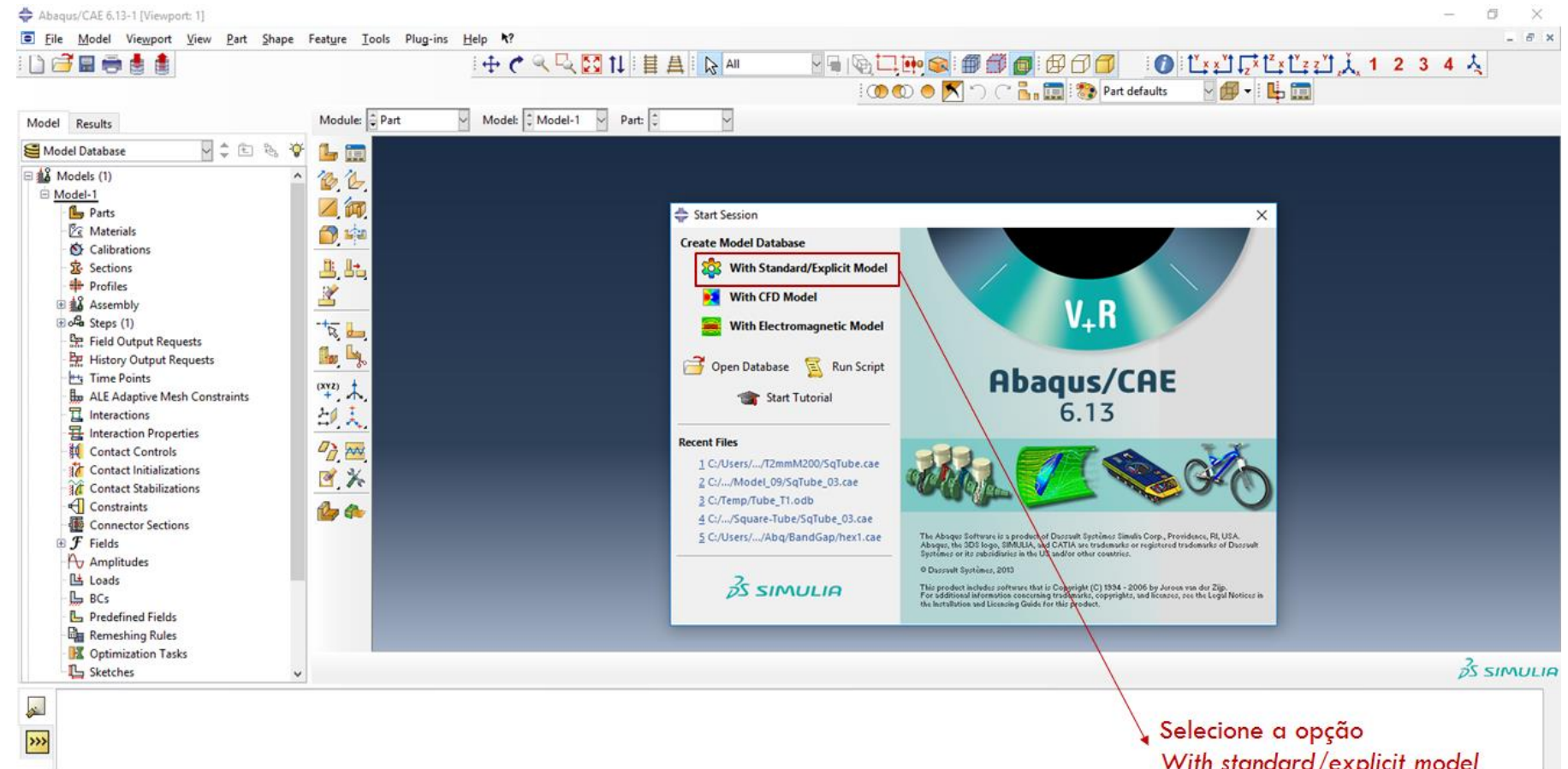




Procure em sua área de trabalho o ícone do Abaqus.



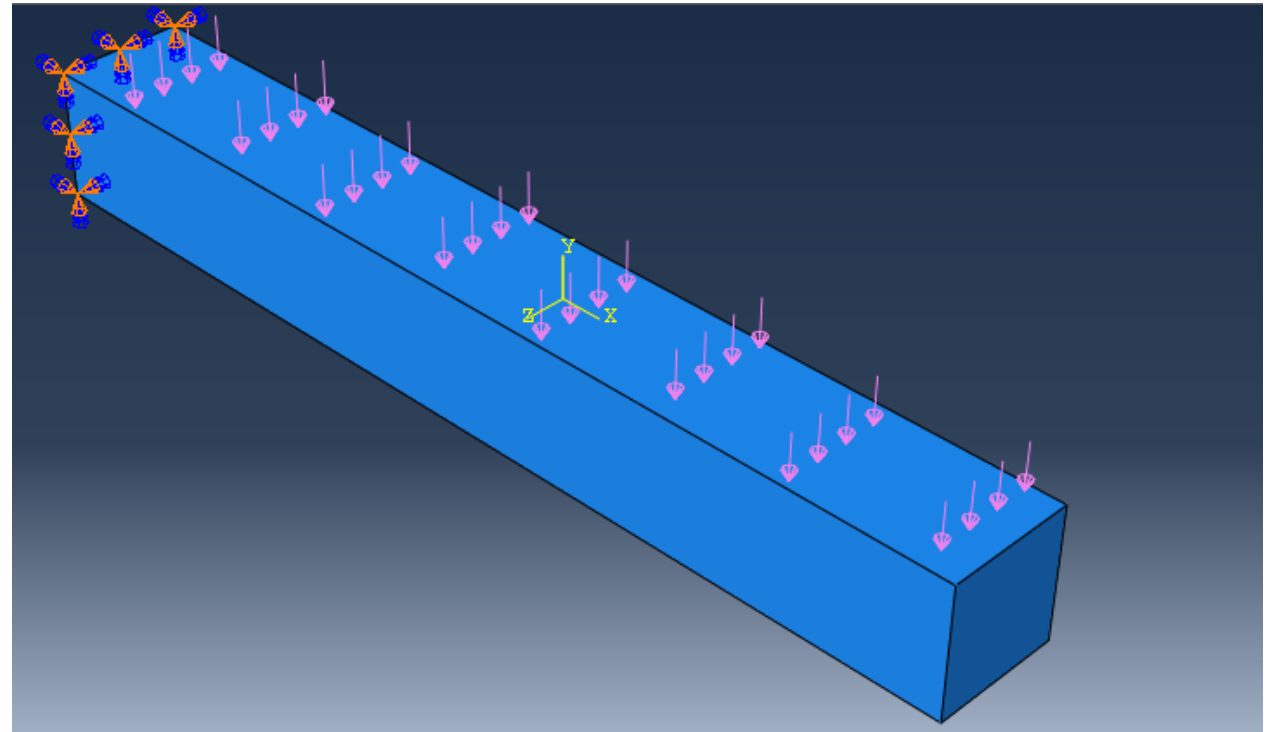
Haverá verificação de licença e depois a seguinte janela se abre:





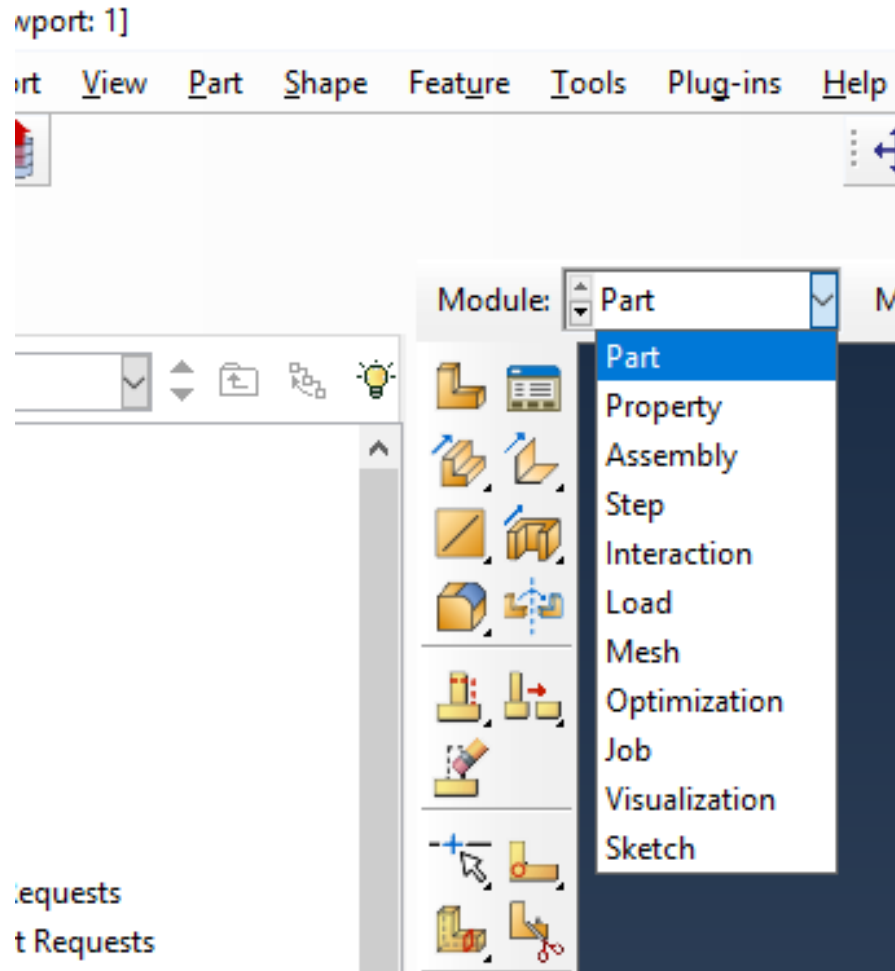
- Você irá fazer o tutorial para análise modal de uma viga de aço $200 \times 25 \text{ mm}^2$, espessura de 20 mm , engastada em uma extremidade e livre na outra.

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.





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

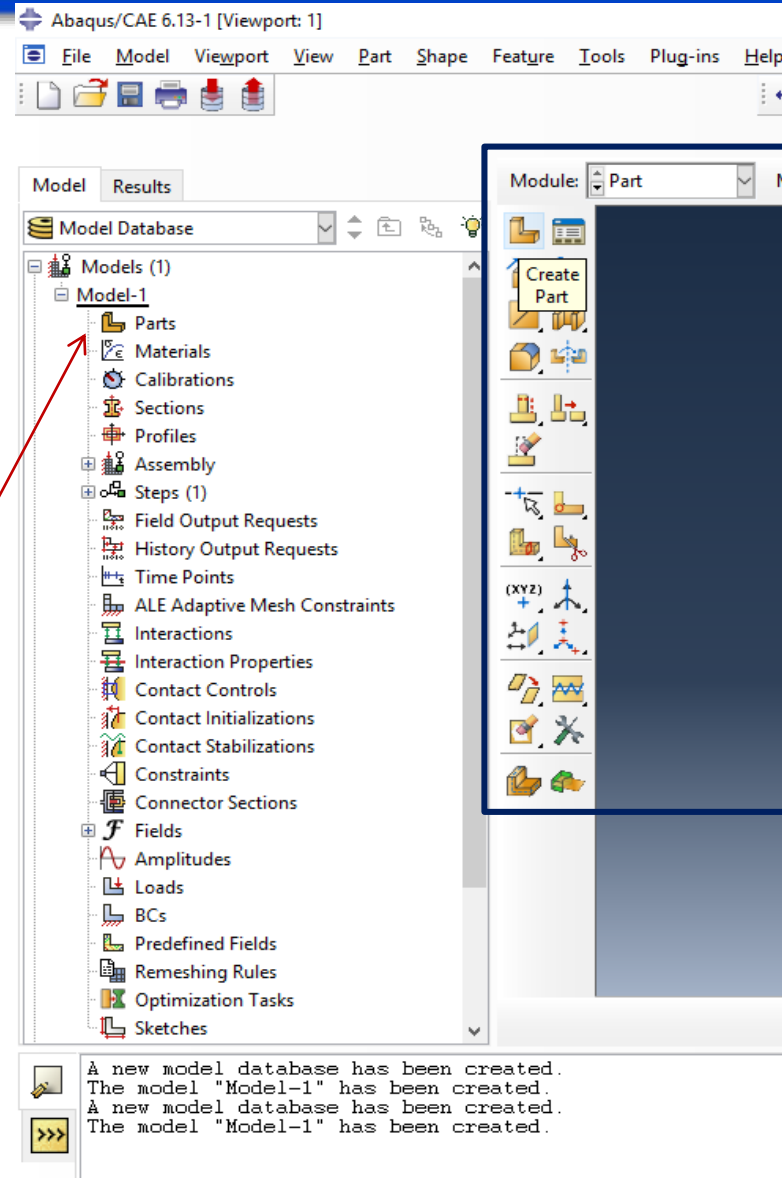
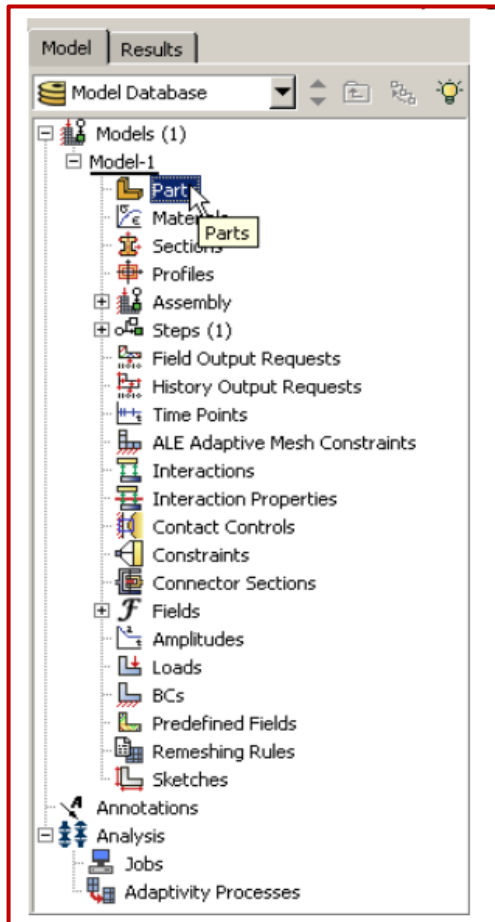
Mesh: malha de elementos finitos

Job: rodar o programa

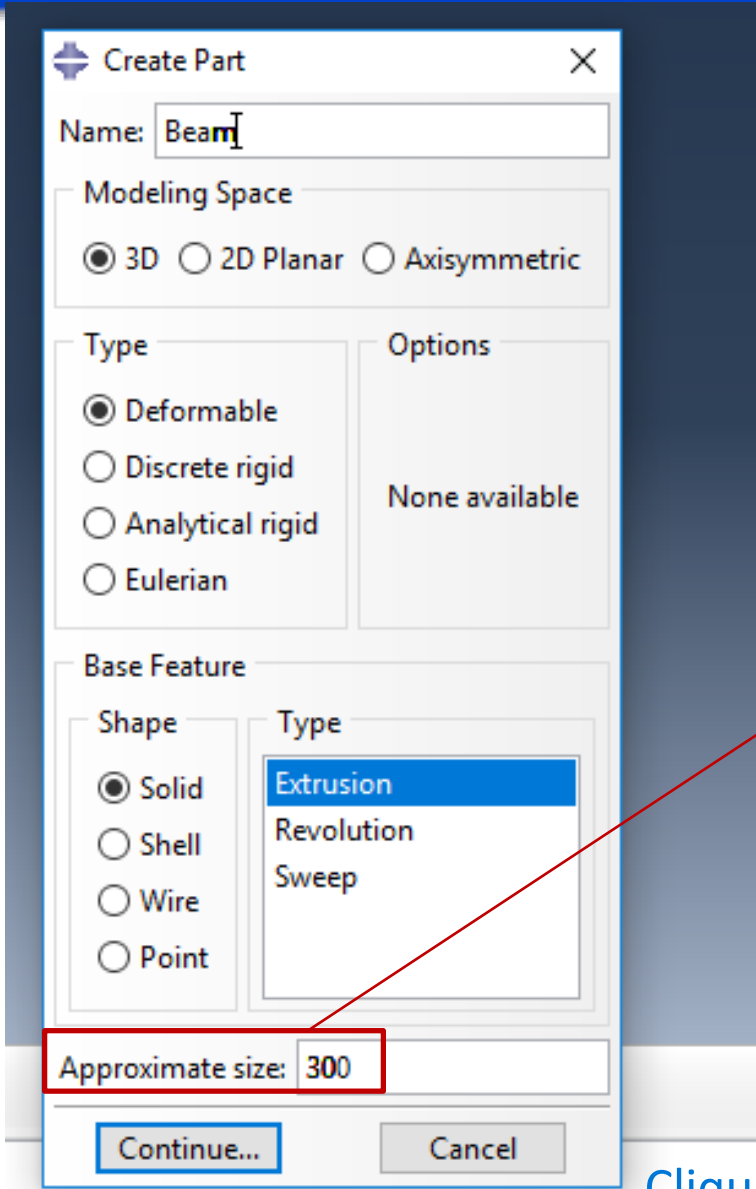
Visualization: ver resultados



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).

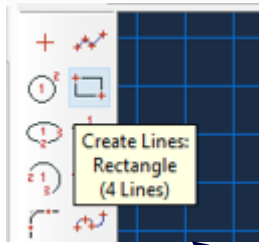


Nomeie a parte **Beam**.

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

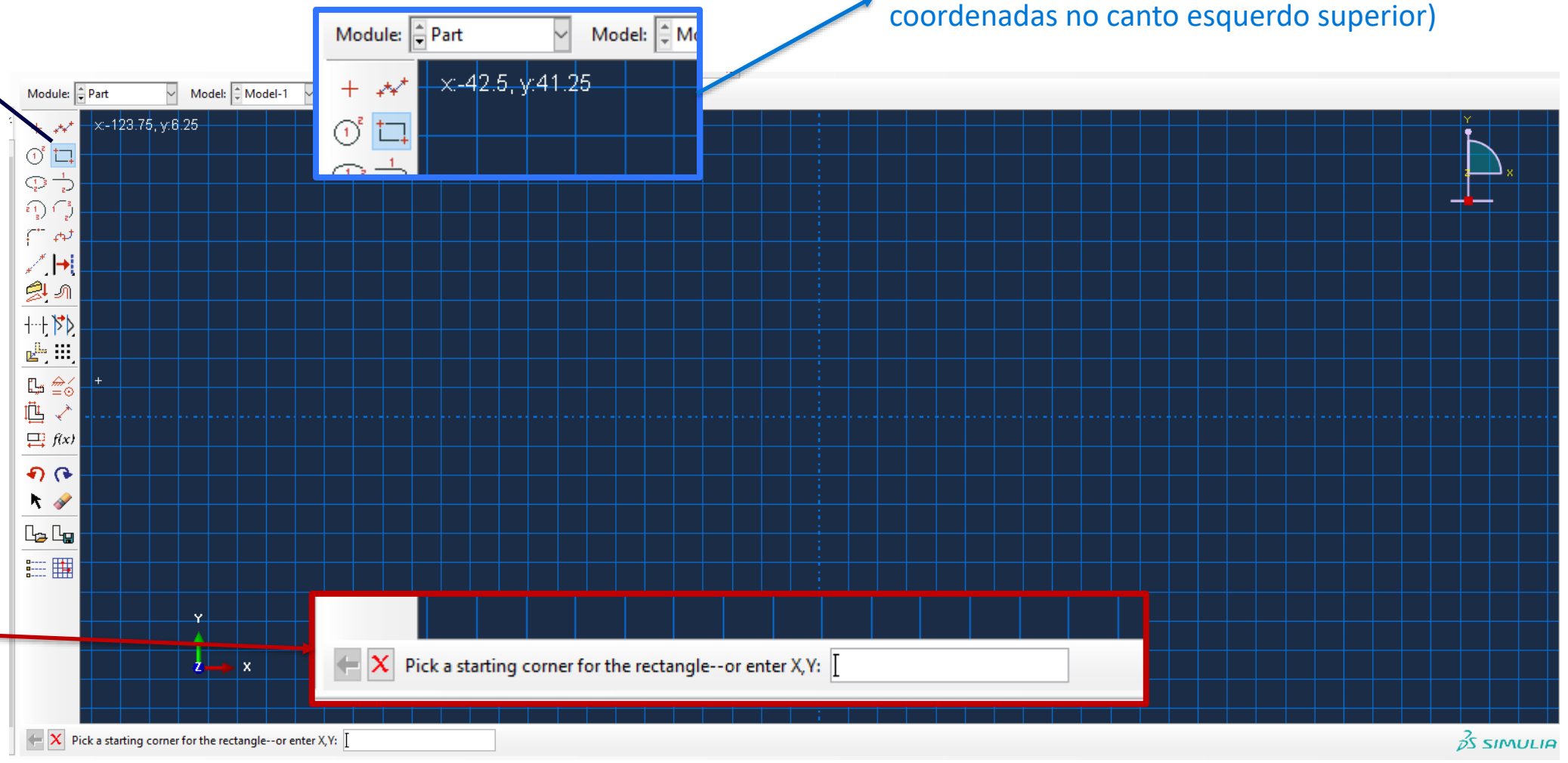
Approximate size: coloque 300 (Não é importante, determina o tamanho da grade a ser exibida).
Clique "Continue..." e se abrirá a janela de "sketch"

Clique Continue e aparecerá a janela de Sketch



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

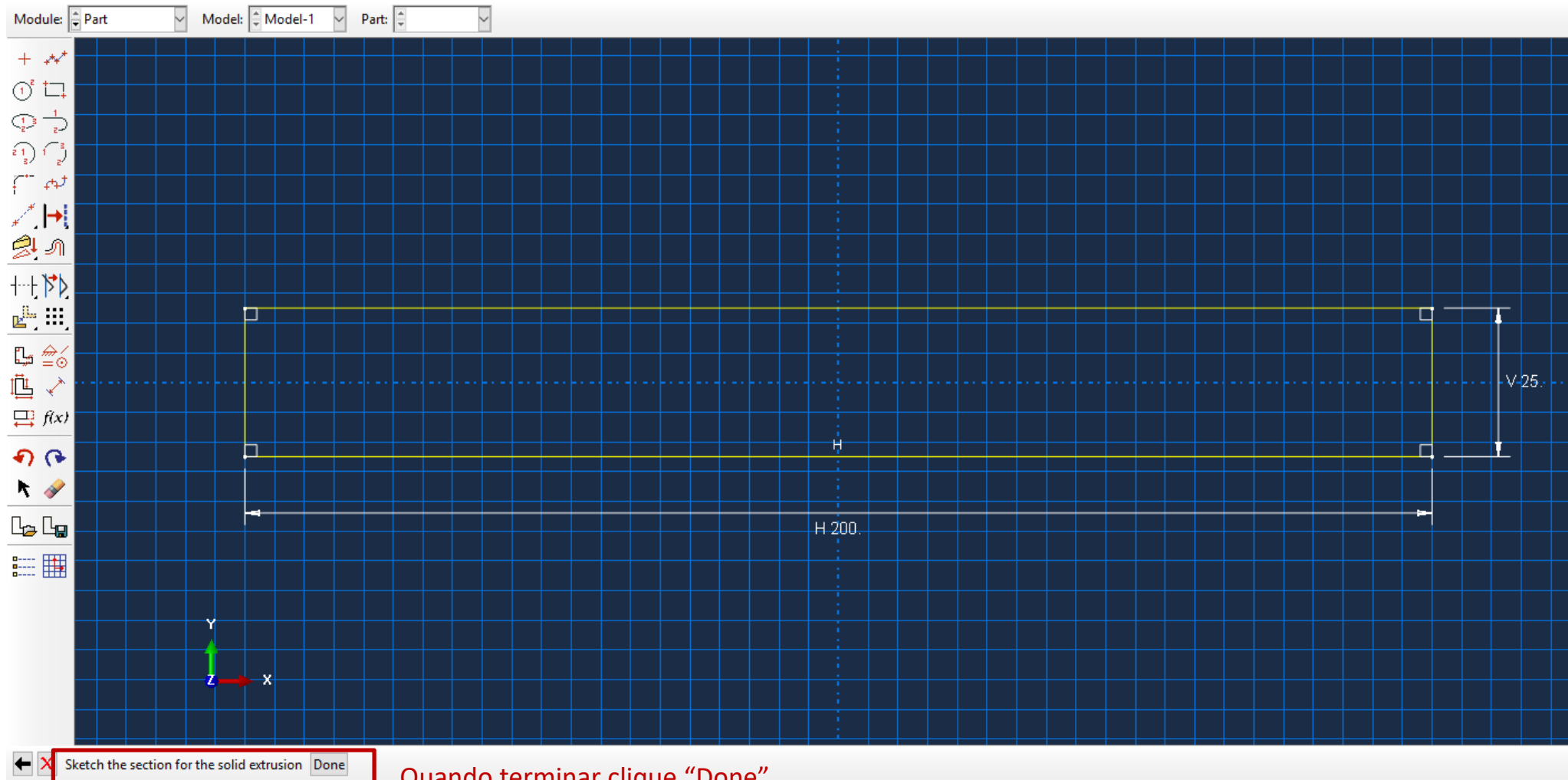
Você pode usar o grid e o mouse (veja coordenadas no canto esquerdo superior)



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

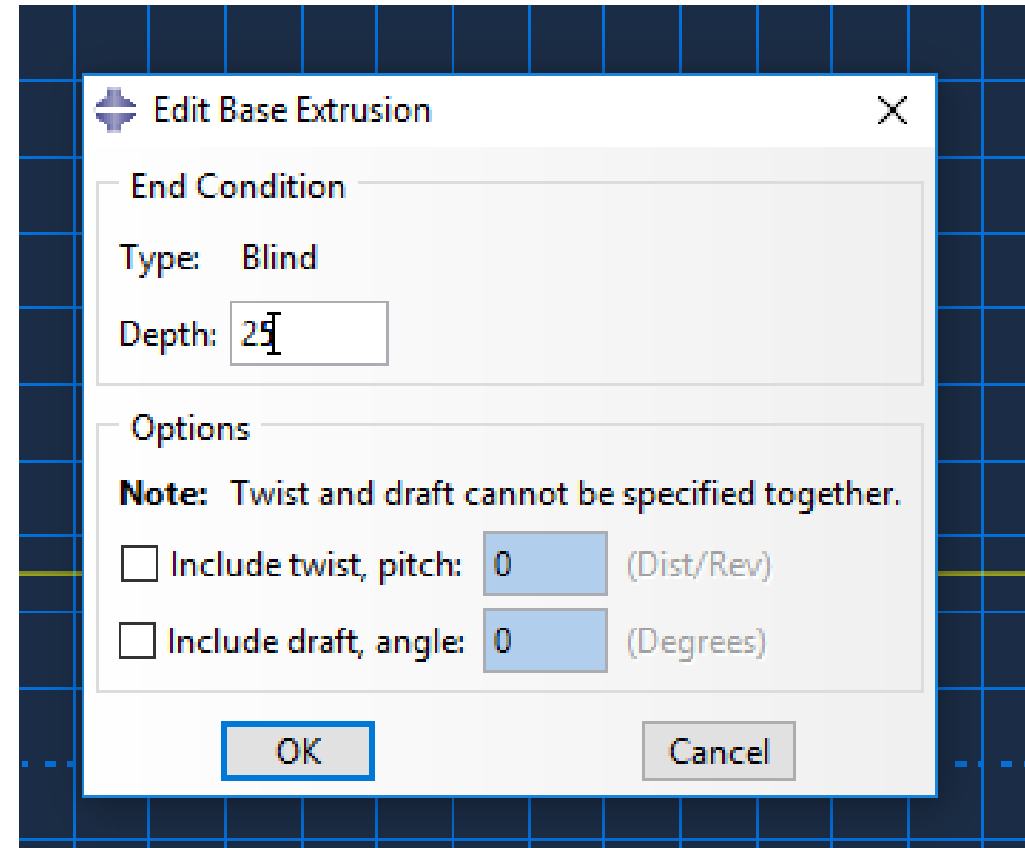


Desenhe a geometria mostrada na figura, 200x25. O grid facilita seu desenho. Não há necessidade de colocar as cotas (estão aqui por motivos didáticos), basta desenhar o quadrado.

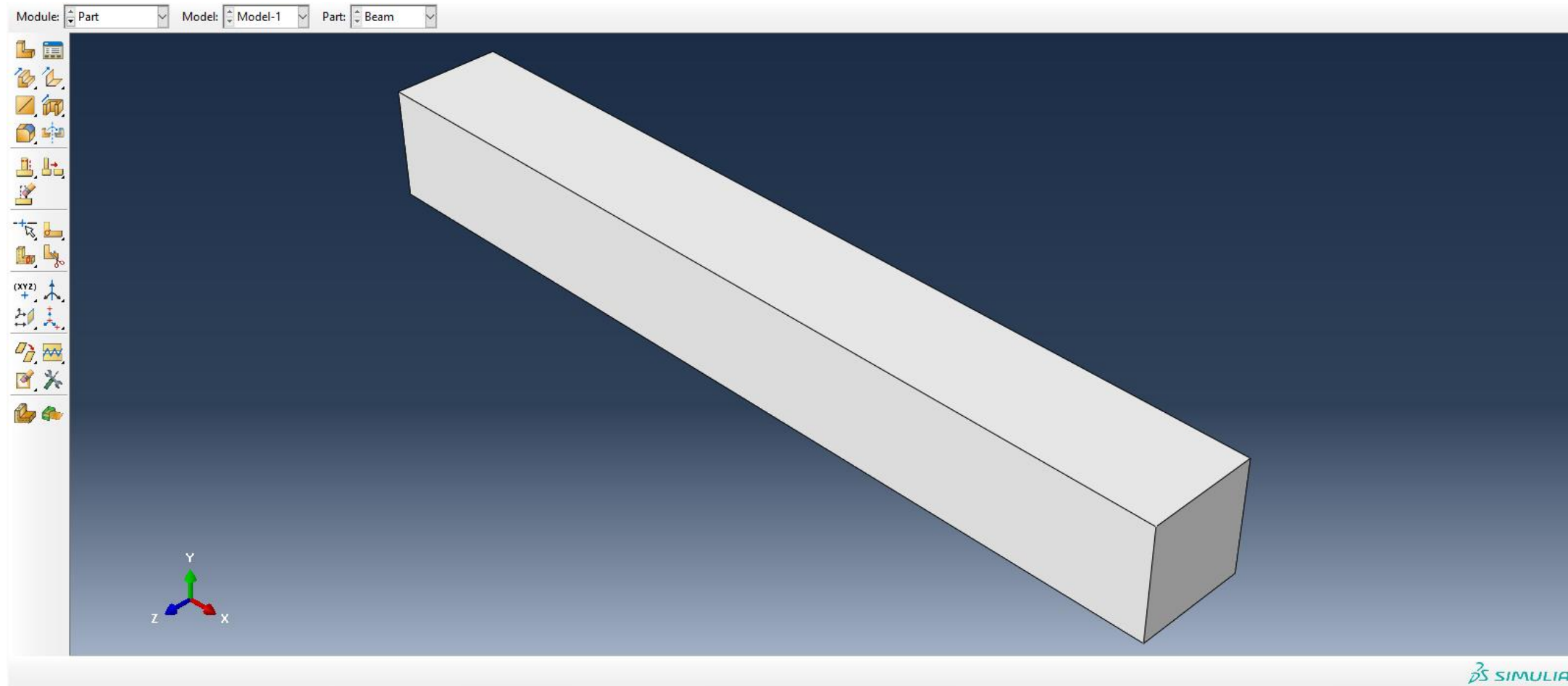




Como você está criando uma parte extrudada, ABAQUS/CAE exibe um campo de texto na área de prompt solicitando que você defina a distância a que o esboço deve ser extrudado. No campo de texto, apague o valor padrão de 30 e digite um valor de 25. Você pode pressionar [Enter] ou clicar no botão 2 do mouse na viewport para aceitar esse valor.

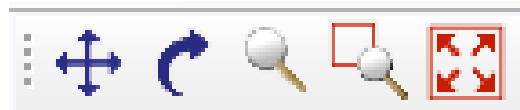




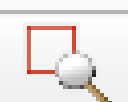


Este é seu modelo até o momento. Essa geometria não tem material nem seção. Esses são nossos próximos passos.



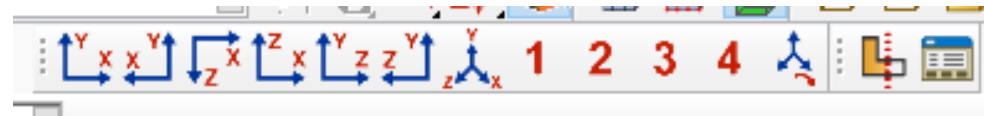


Várias ferramentas estão disponíveis na barra de ferramentas para ajudá-lo a examinar seu modelo.

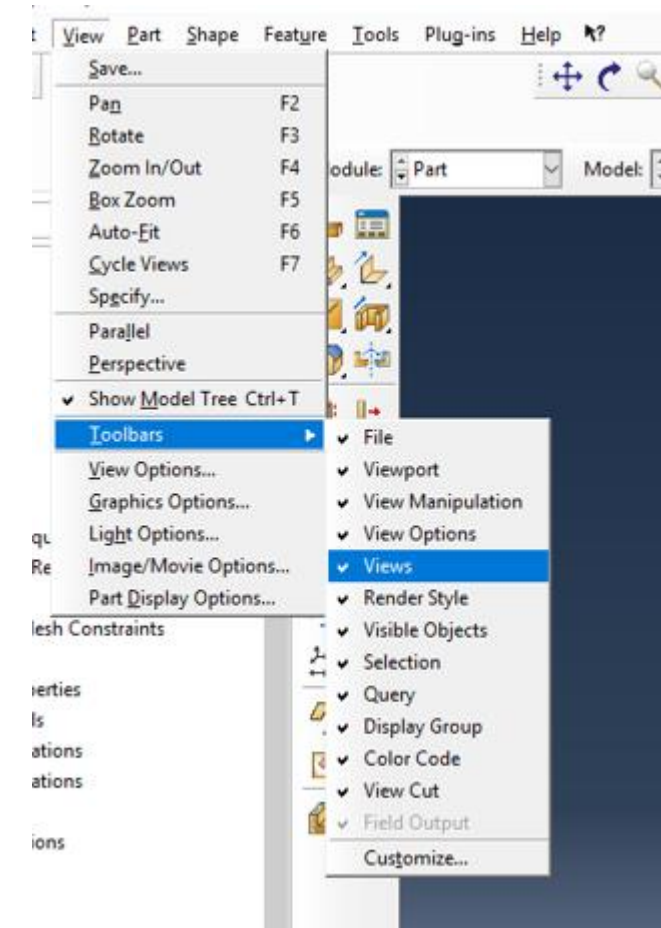


-  Pan view
-  Rotate view
-  Magnify view
-  Toolbox view
-  Autofit view

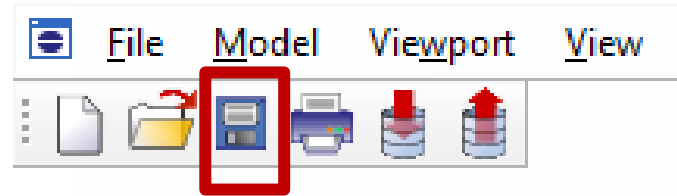
Você pode deixar mais fáceis alguns outros ícones importantes:



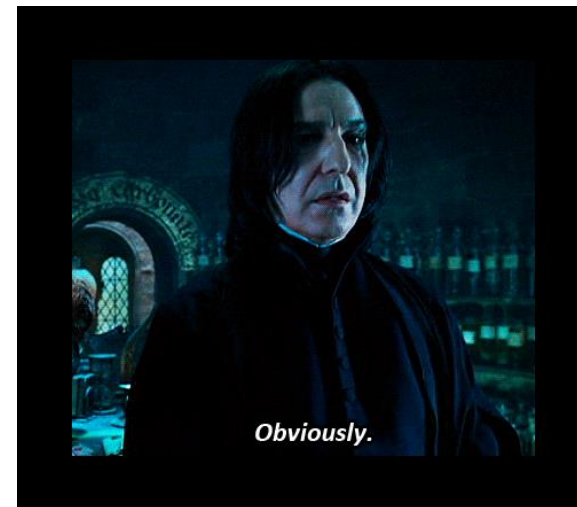
Basta ir em View/Toolbars e clicar na opção Views:



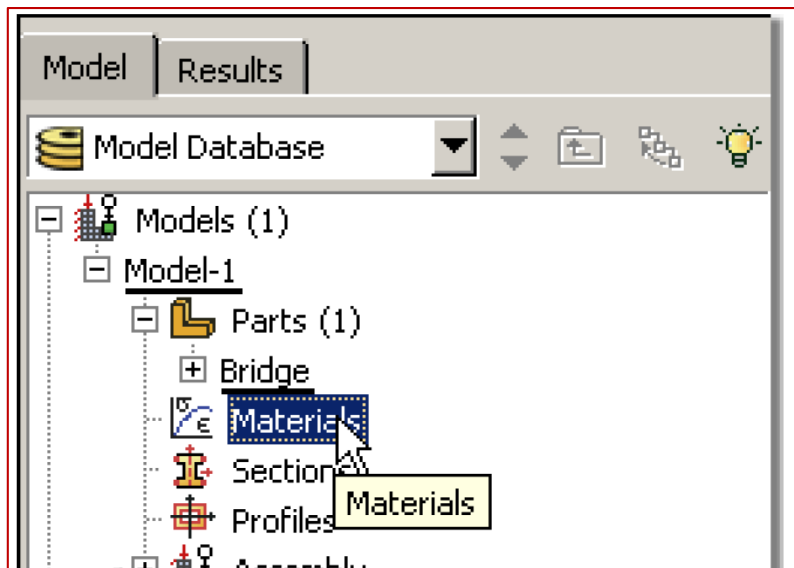
Experimente com cada uma dessas ferramentas até ficar confortável com elas.



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



Definição do material



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



Edit Material

Name: Steel

Description: Material da viga

Material Behaviors

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Density
Depvar
Regularization
User Material
User Defined Field
User Output Variables

OK Cancel

Edit Material

Name: Steel

Description: Material da viga

Material Behaviors

Density

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Density

Distribution: Uniform

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data

	Mass Density
1	7.8e-9

Nomeie o novo material e dê uma descrição (Steel);
Clique na guia “General” → “Density”
Density (7.8e-9)
Clique “OK”

Porque esse valor





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 ▼ Suboptions

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term ▼

No compression

No tension

Data

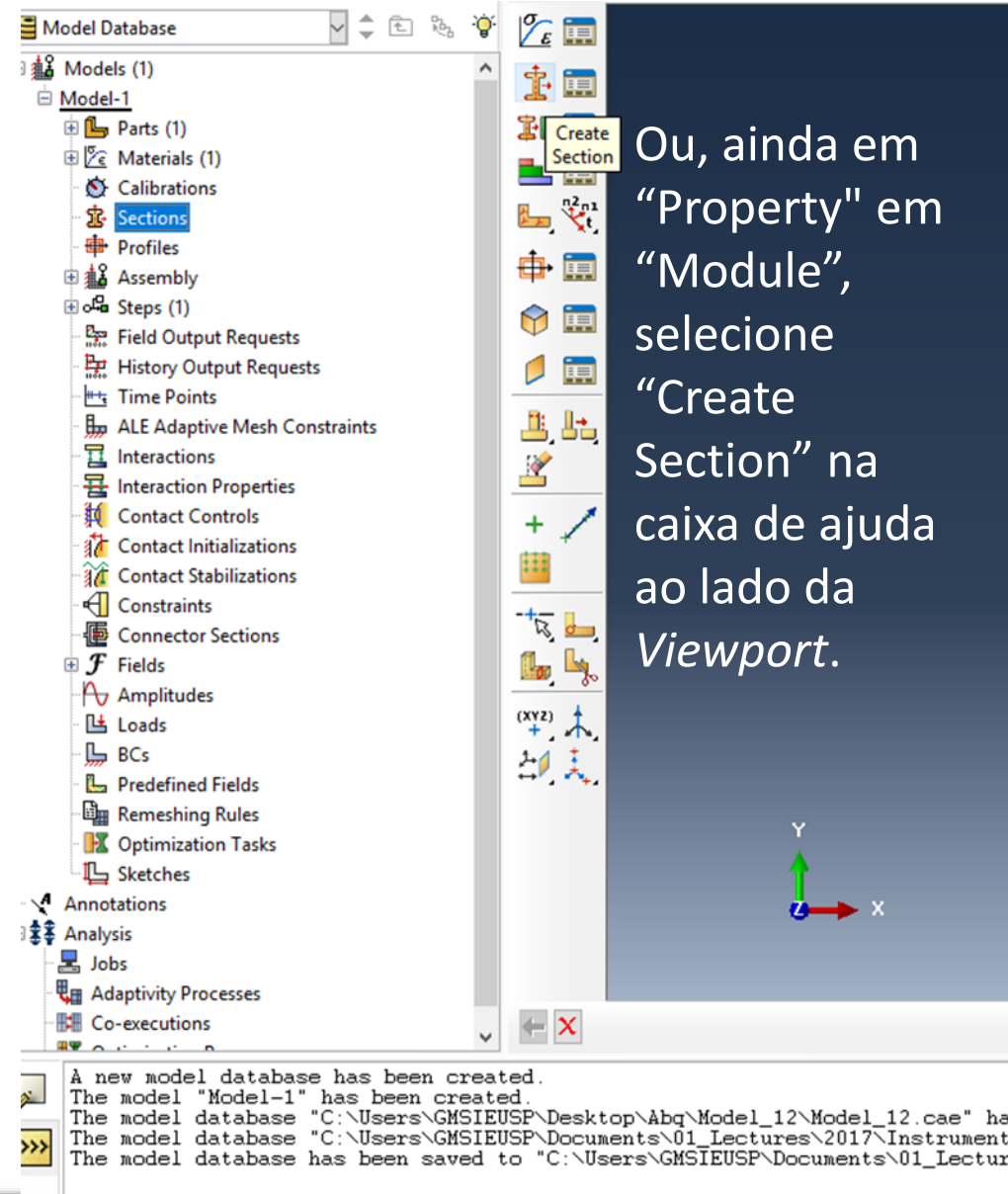
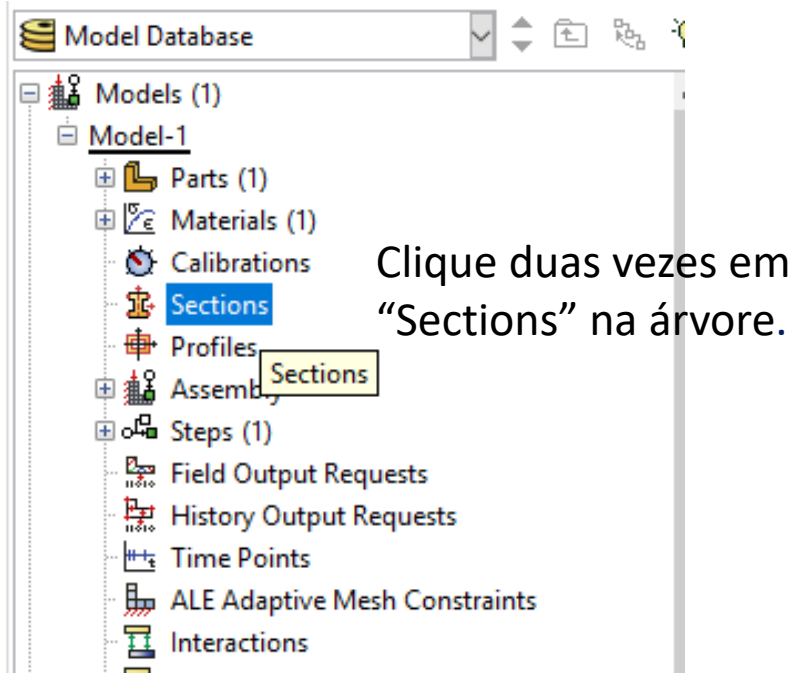
	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	210000	0.27

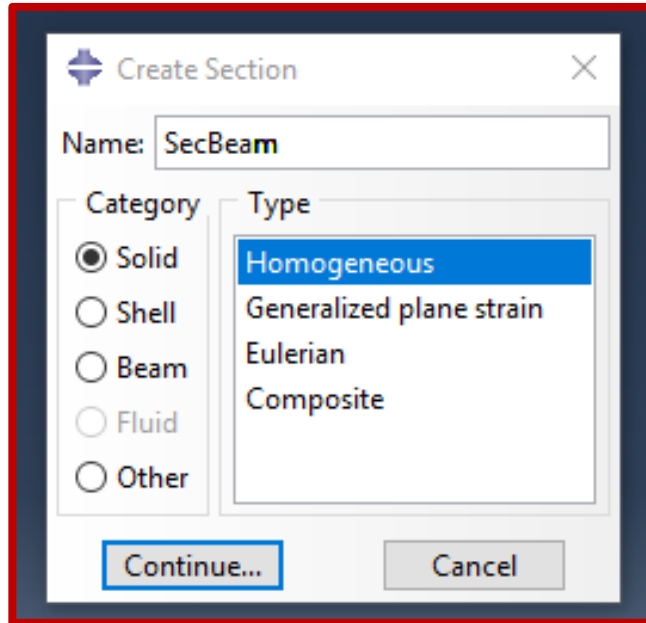
OK Cancel

Clique na guia "Mechanical" → "Elasticity" → "Elastic"
Definir o Módulo de Young (210000) e Coeficiente de Poisson (0.27)

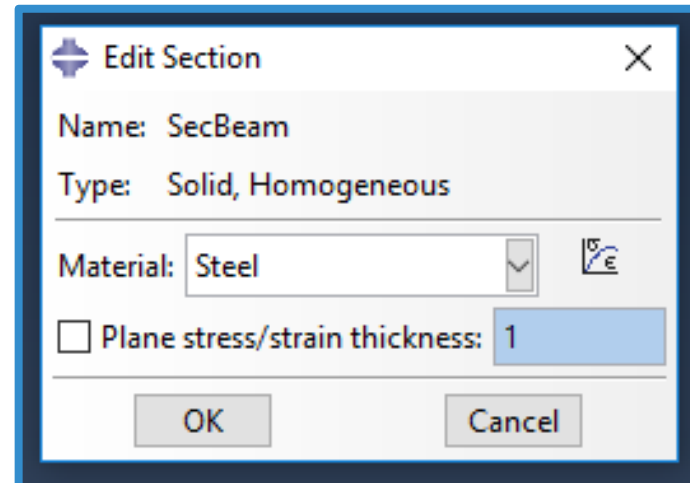


Definição da seção

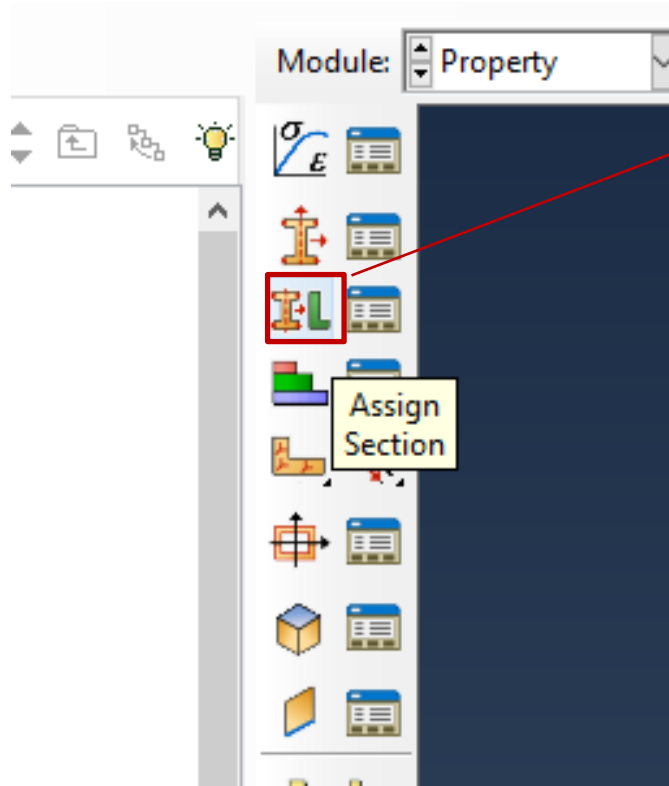




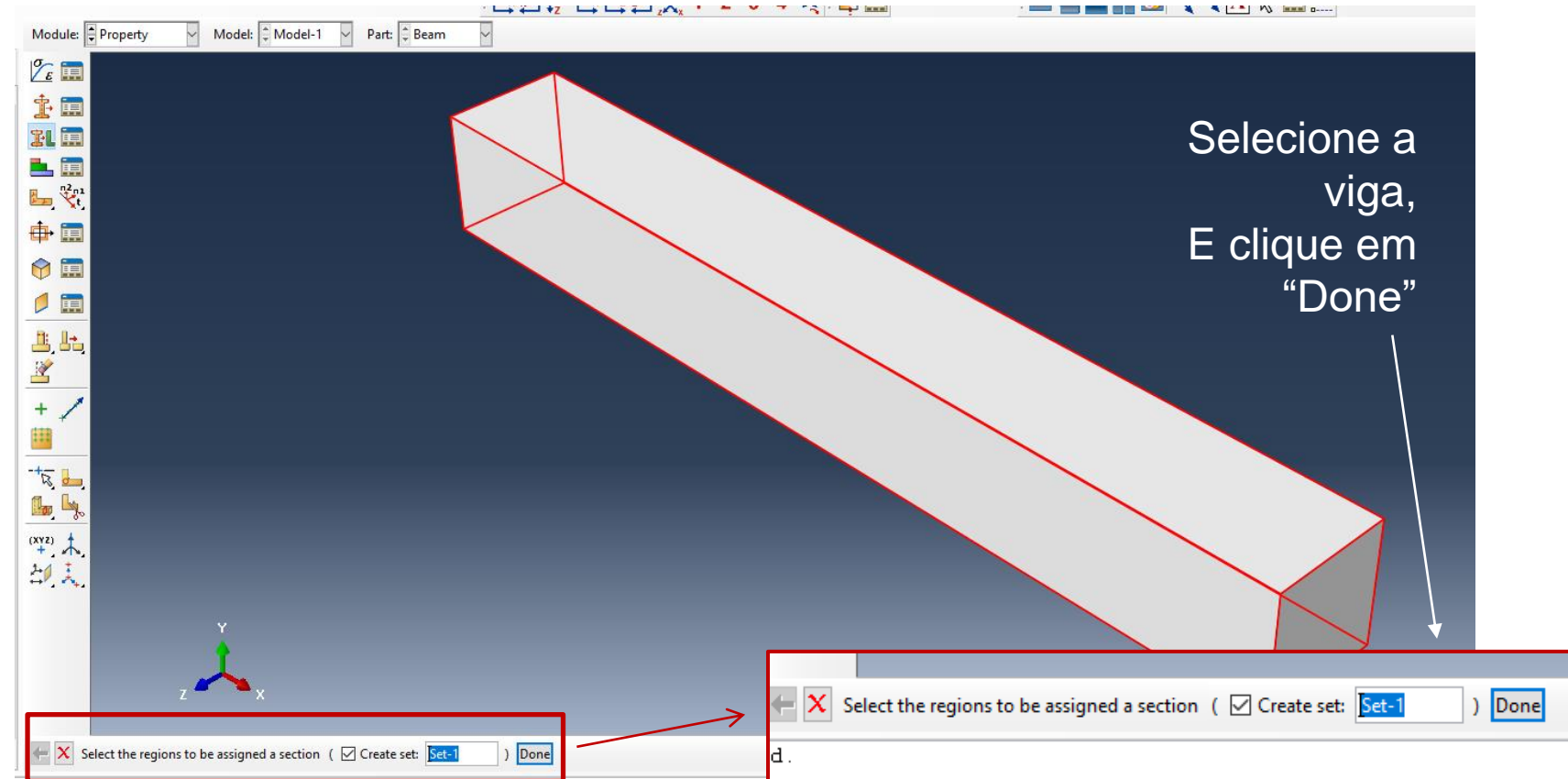
Dê um nome à seção, selecione “Solid” e “Homogeneous”. “Continue...” abrirá a janela abaixo.

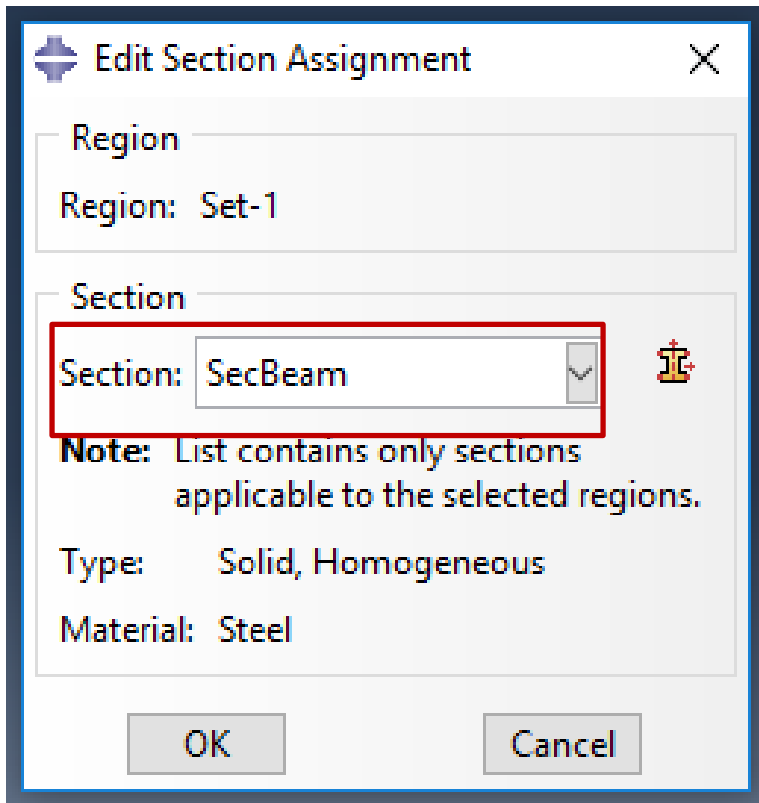


Material “Steel” (provavelmente já estará selecionado, pois é o único que criamos), demais parâmetros default. Clique “OK”.



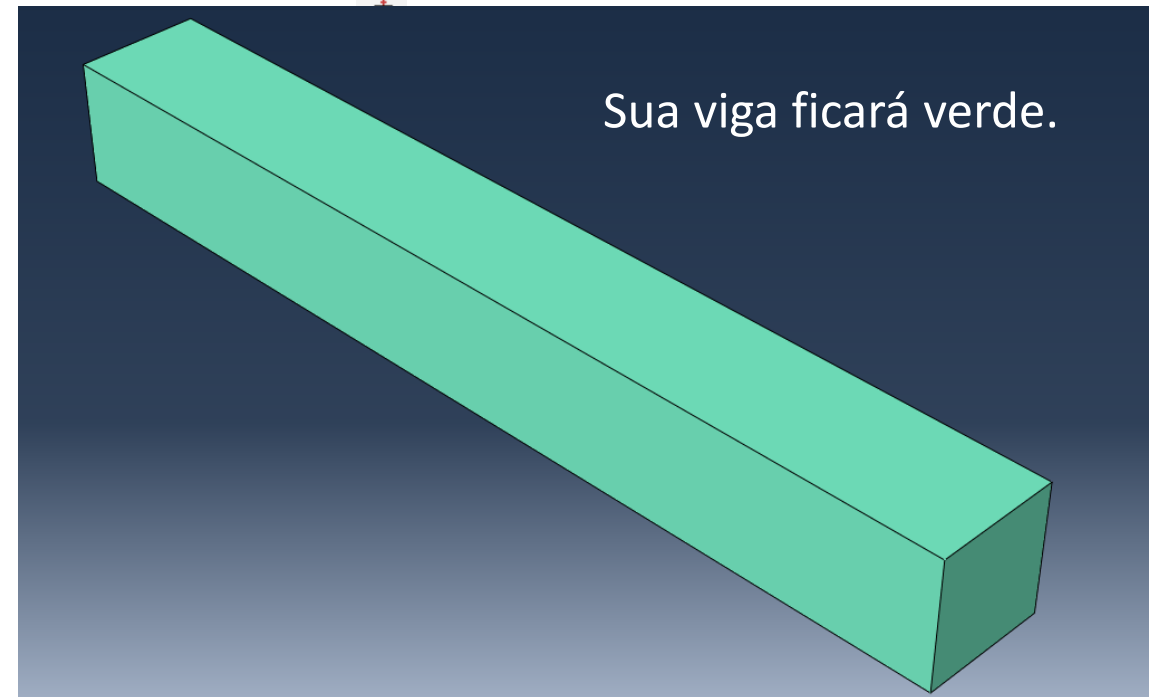
Agora você deve atribuir propriedade à viga que você desenhou!

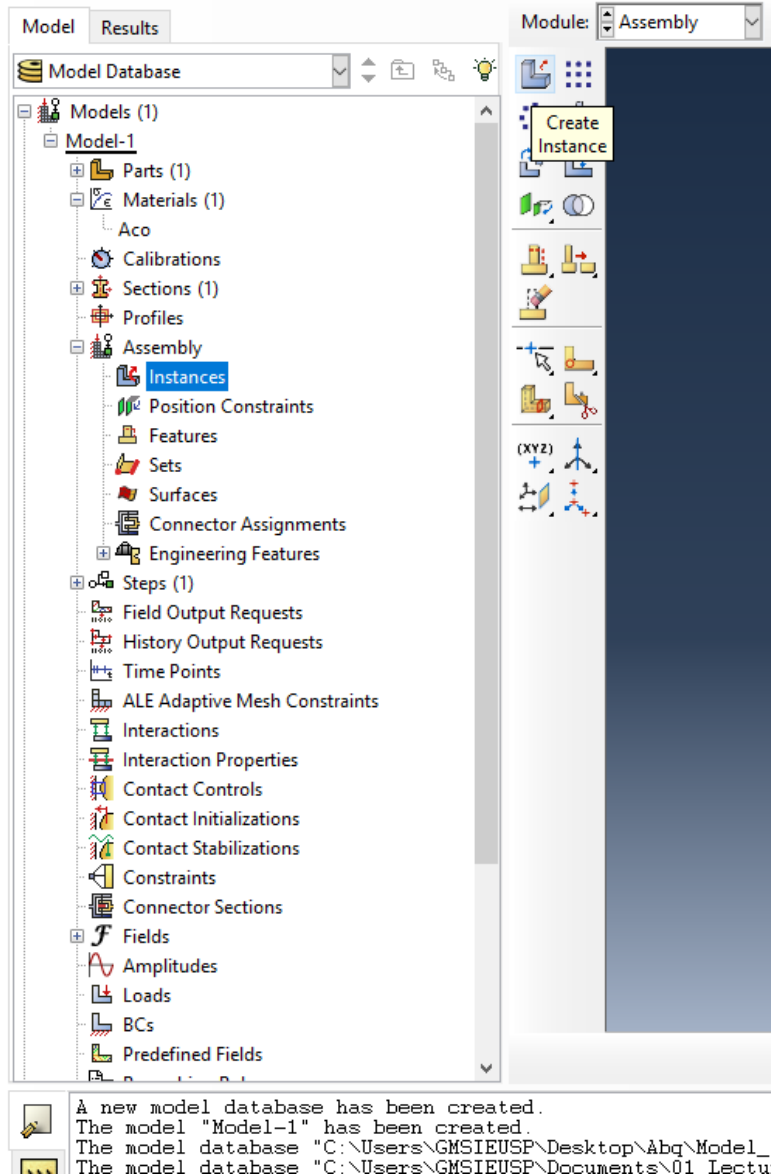




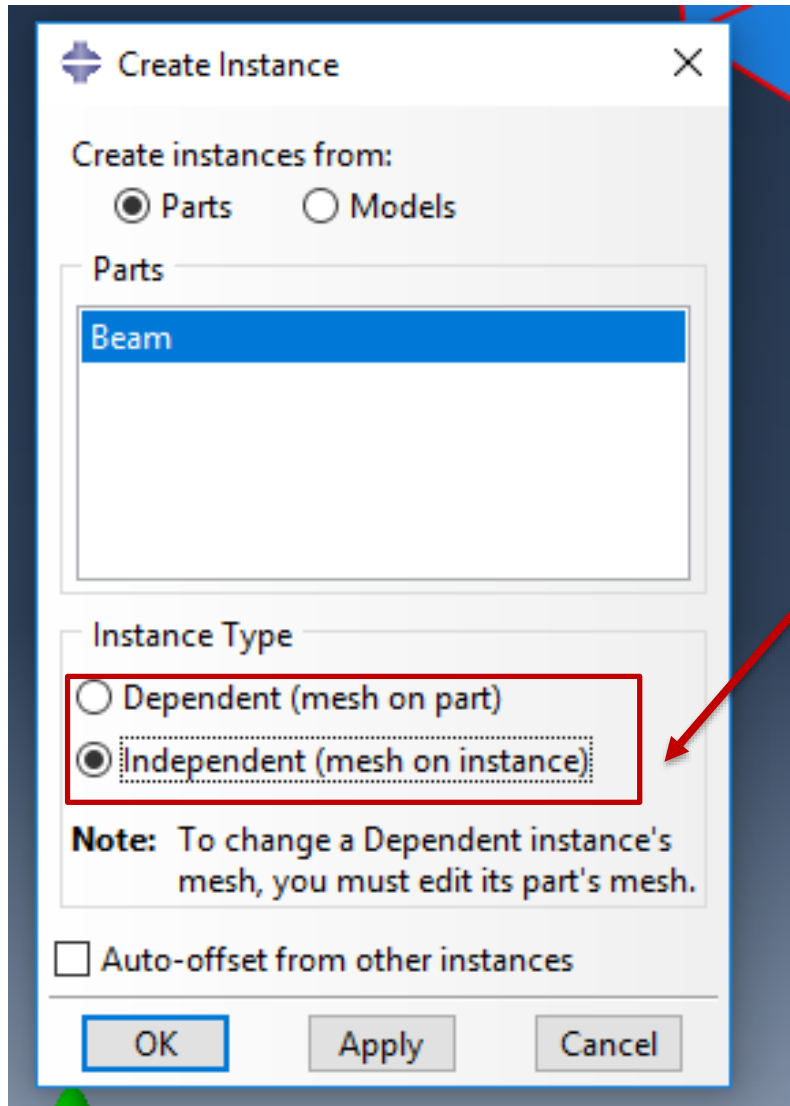
Clique "OK".

Provavelmente a seção "SecBeam" já estará selecionada (inclui a geometria de 1mm com material aço). Se não estiver, clique no ícone e selecione.

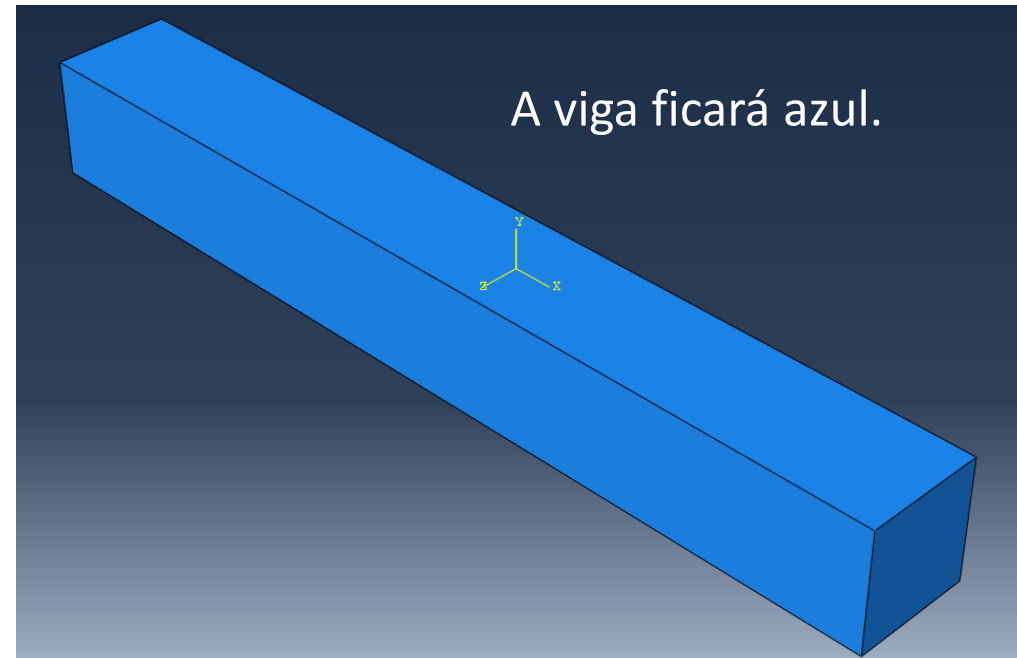




Observação importante: Esta etapa é mais útil quando o modelo é formado por várias *partes* (“Part”), e você deve uni-las para criar uma estrutura única. Porém, é uma etapa que não pode ser pulada quando você tem somente uma parte, como nosso caso.

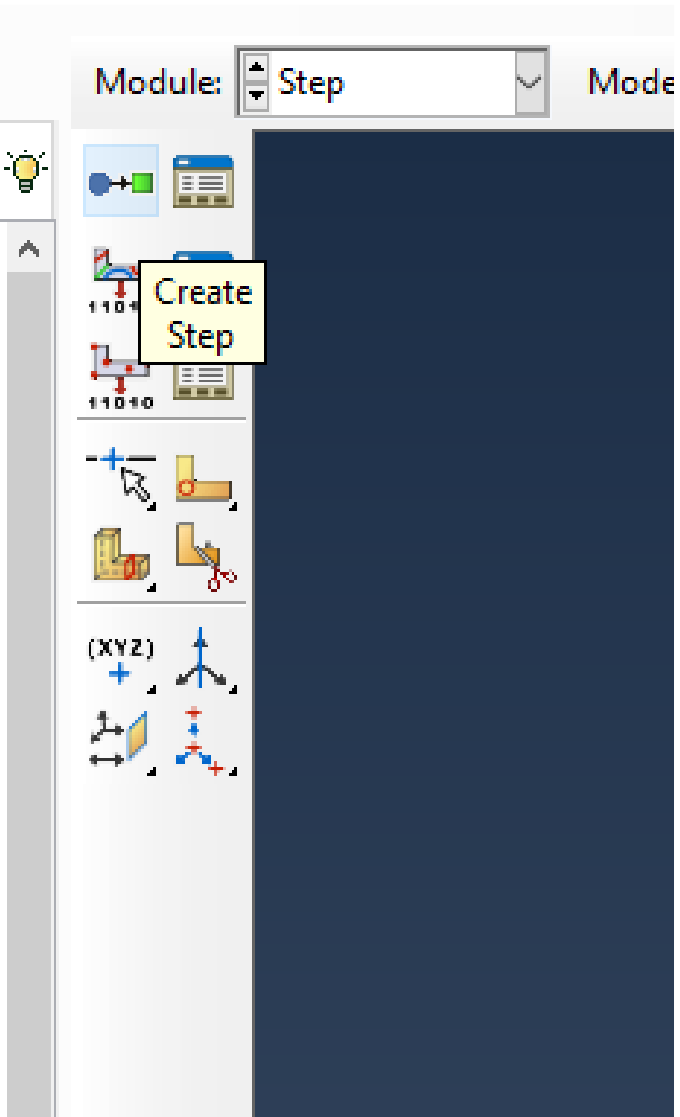


Basta dar duplo clique em “Instances”, dentro de “Assembly” na árvore ou “Create Instance” no painel de ajuda no ViewPort.
Selecione “Independent” em “Instance Type”
Clique em “Apply” e “Cancel”.



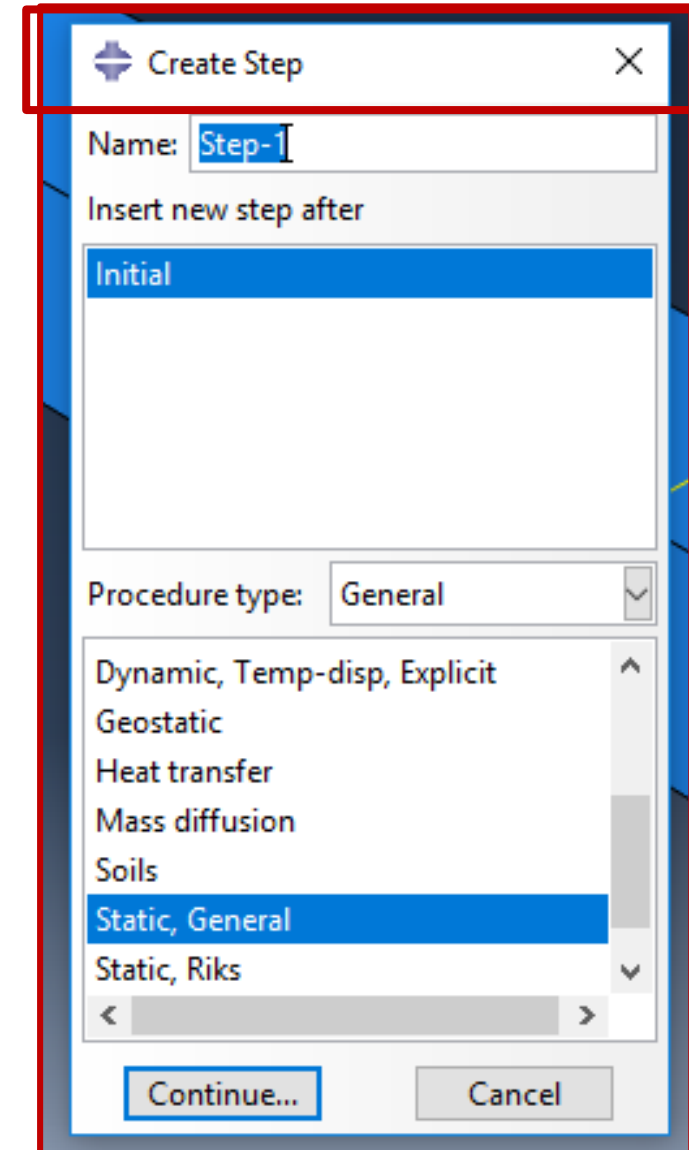


- Agora que você criou sua parte, você pode mover para o módulo **STEP** para definir suas etapas de análise. Para o tutorial da viga em balanço, a análise consistirá em duas etapas:
 1. Um passo inicial, no qual você aplicará uma condição de contorno que restrinja uma extremidade da viga;
 2. Um passo de análise estática geral, no qual você aplicará uma carga de pressão na parte superior da viga.
- 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). 😊😊

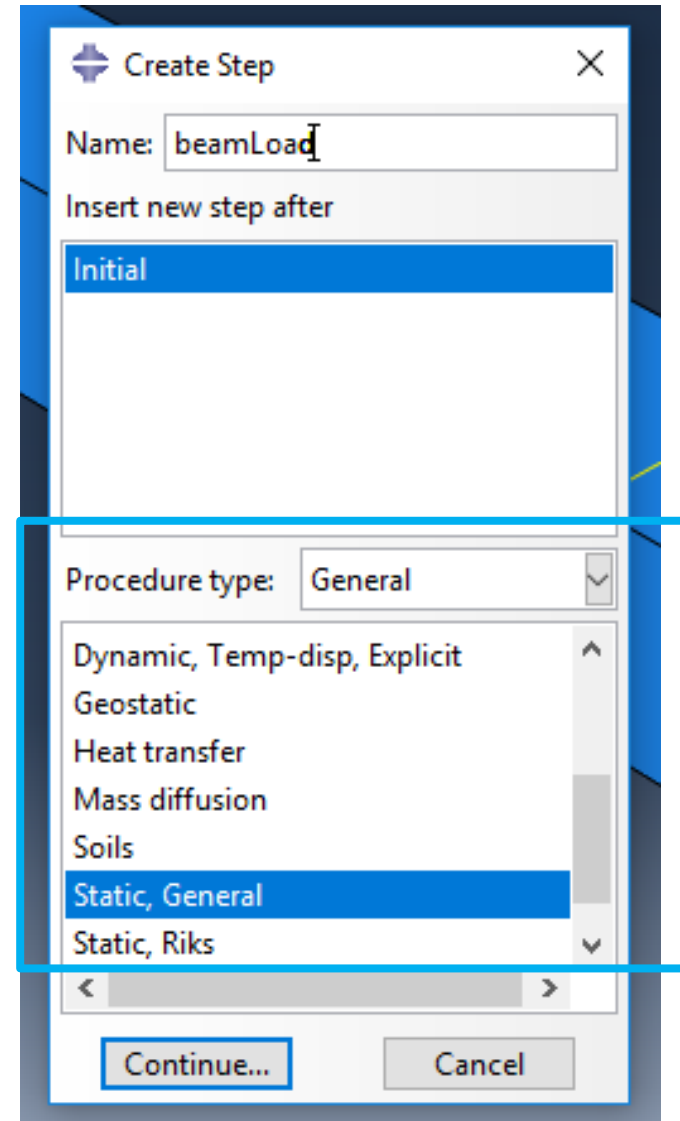
Abre-se a caixa de diálogo **Create Step**, com uma lista de todos os procedimentos gerais e um nome padrão do STEP *Step-1*. Os procedimentos (procedure type) são aqueles que podem ser usados para analisar a resposta linear ou não-linear.





Dê um nome ao step
(BeamLoad);

Na lista de Procedure type
disponível na caixa de
diálogo *Create Step*,
selecione *Static, General*
(se ainda não estiver
selecionado) e clique em
Continue...



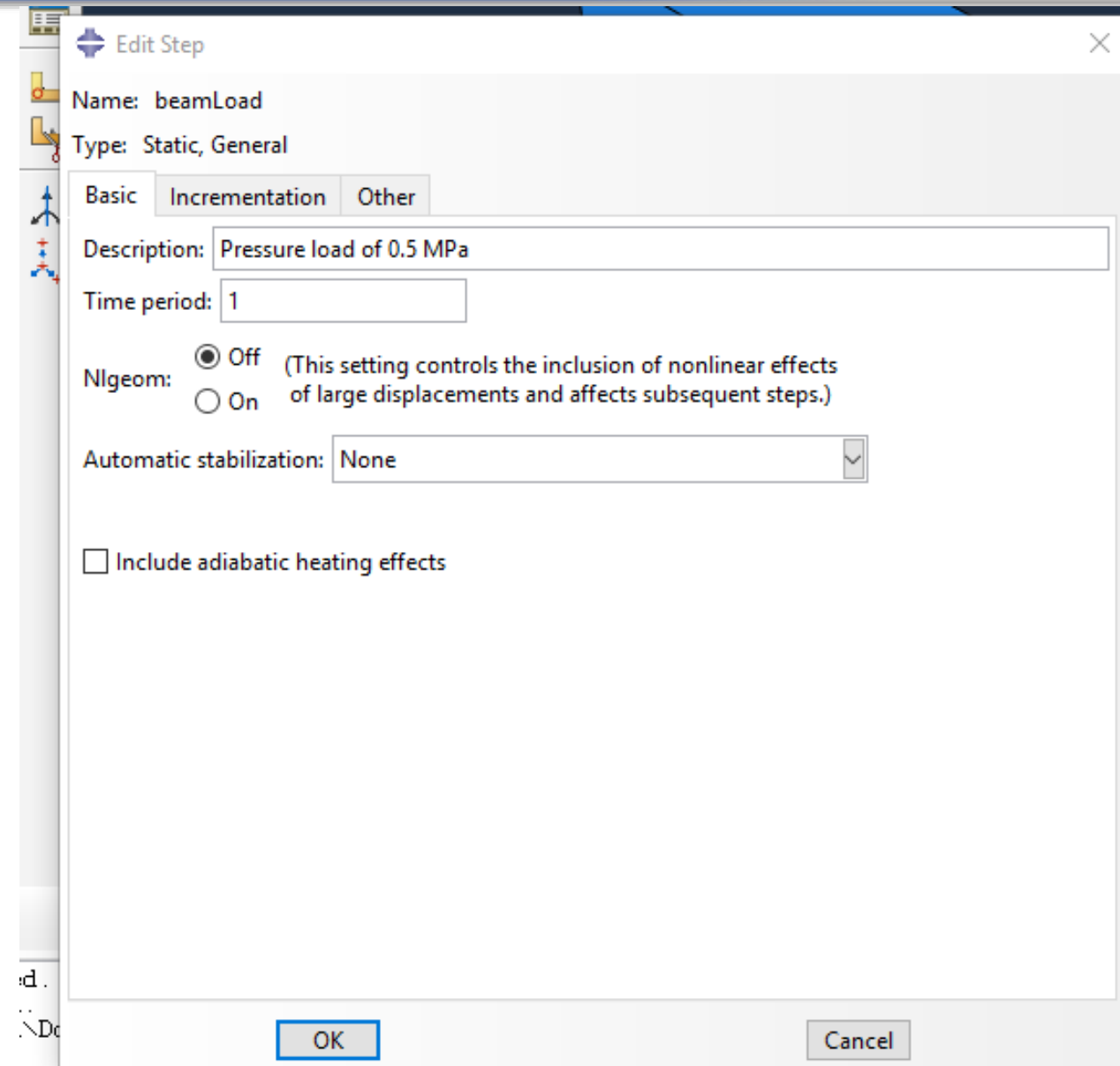


A caixa de diálogo **Edit Step** é exibida com o passo estático padrão

Em **Description**, digite “Pressure load of 0.5 MPa”.

Time period é o tempo total de análise e deixamos o default de 1s.

Nlgeom off – não consideraremos efeitos de grandes deslocamentos da geometria.

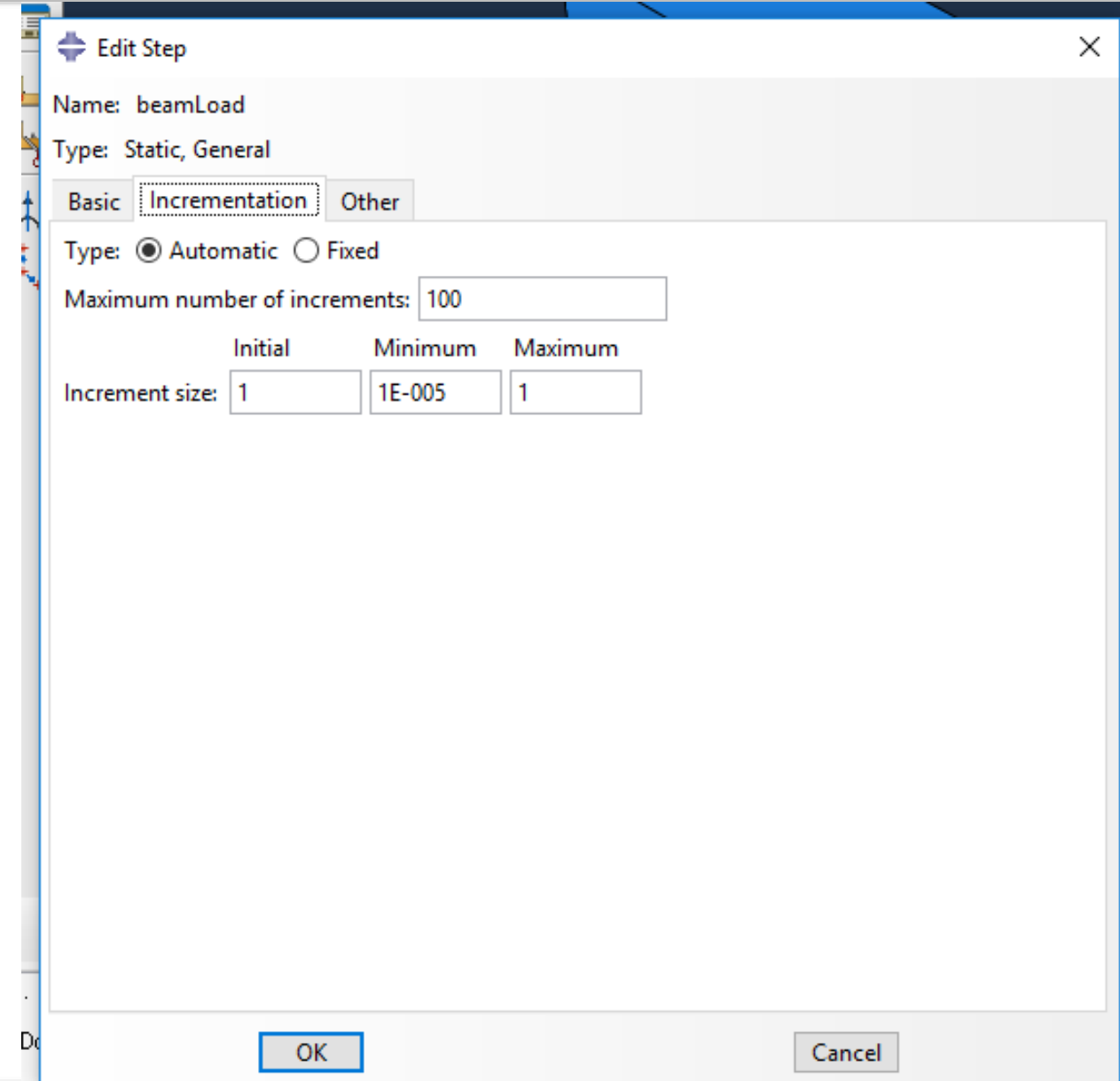


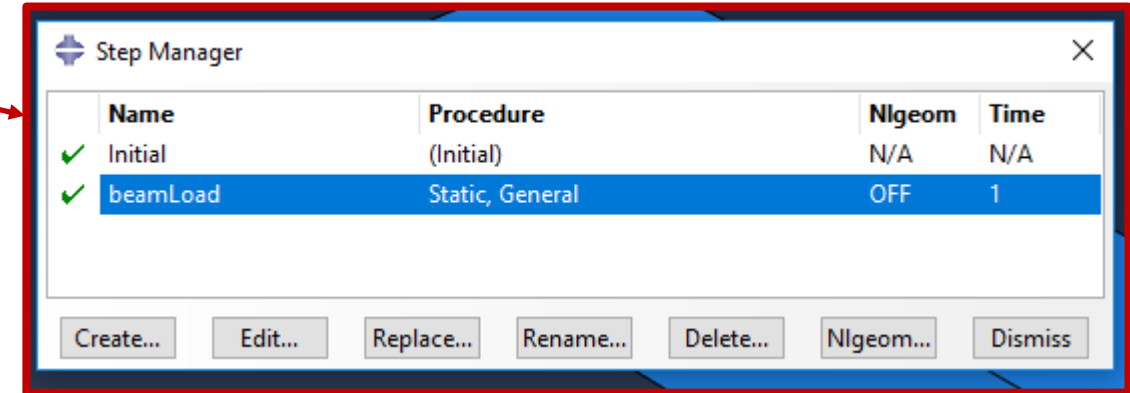
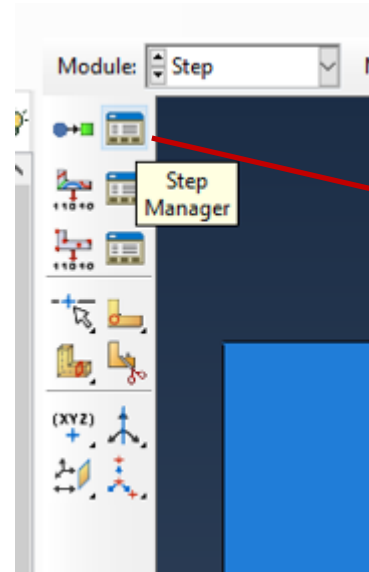
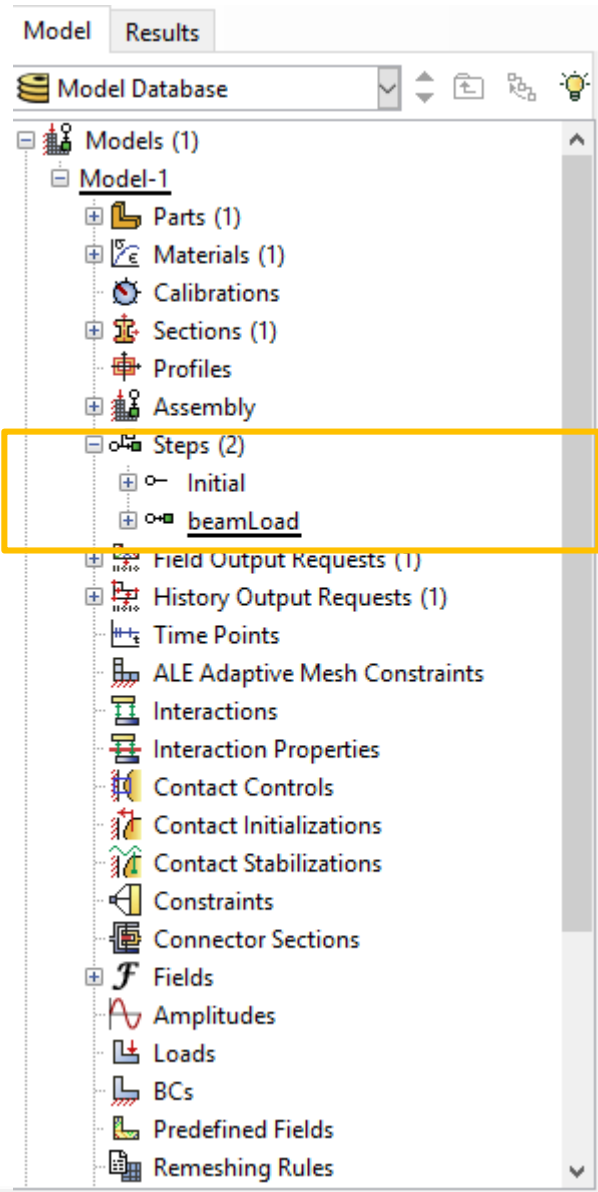


Clique na guia **Incrementation** e aceite as configurações padrão de incremento de tempo.

Clique na última guia (**Other**) para visualizar seus conteúdos; você pode aceitar os valores padrão fornecidos para a etapa.

Clique em OK para criar a etapa e sair da caixa de diálogo **Edit Step**



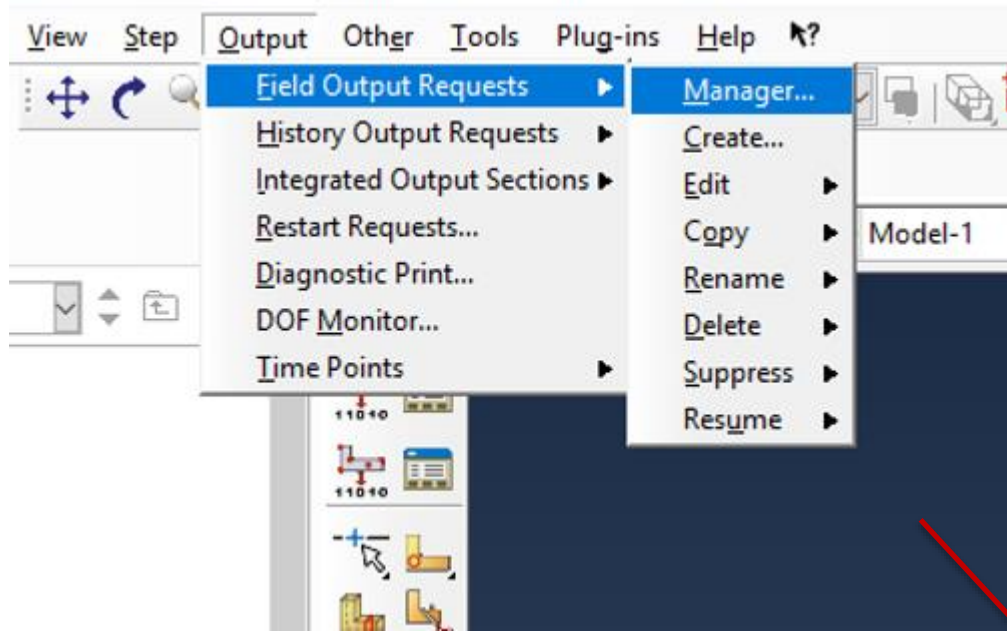


Veja que, na árvore e na barra de ajuda, em Steps, podemos visualizar os dois *steps da análise*, o “Initial”, e o recém criado “beamLoad”

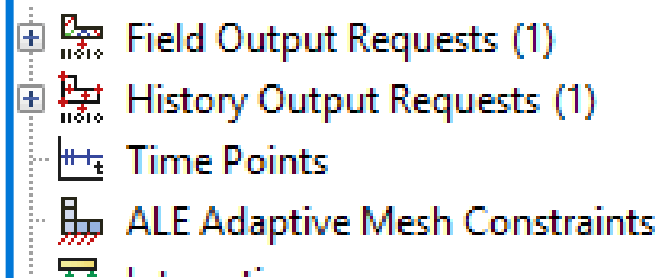


- Quando você envia seu *Job* para análise (calma, faremos mais adiante...), o software escreve os resultados da análise em um banco de dados de saída. Quando você cria um STEP, ABAQUS/CAE gera uma solicitação de saída padrão para o step. Para cada etapa que você criar, você pode usar o ***Field Output 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.

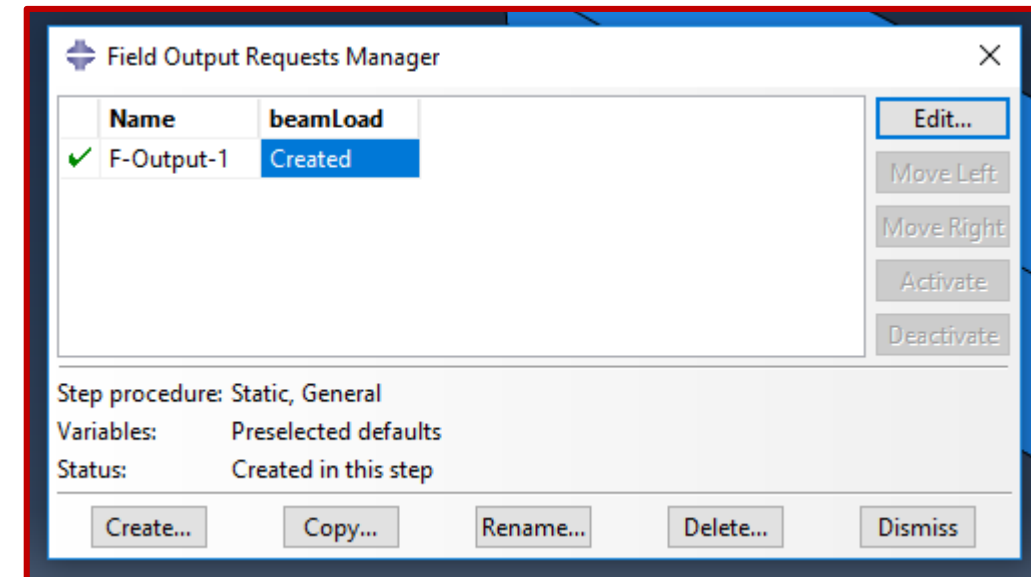
- No menu principal, selecione *Output* → *Field Output Requests* → *Manager*:



- Ou na árvore, selecione



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





Name: F-Output-1
Step: beamLoad
Procedure: Static, General
Domain: Whole model Exterior only
Frequency: Last increment
Timing: Output at exact times
Output Variables:
 Select from list below Preselected defaults All Edit variables
CDISP,CF,CSTRESS,LE,MISES,PE,PEEQ,PEMAG,RF,S,U,
Stresses
Strains
Displacement/Velocity/Acceleration
Forces/Reactions
Contact
Energy
Failure/Fracture
Thermal
Electrical/Magnetic
Porous media/Fluids
Volume/Thickness/Coordinates
Error indicators
State/Field/User/Time
Note: Some error indicators are not available when Domain is Whole Model or Interaction.
 Output for rebar
Output at shell, beam, and layered section points:
 Use defaults Specify:
 Include local coordinate directions when available
OK Cancel

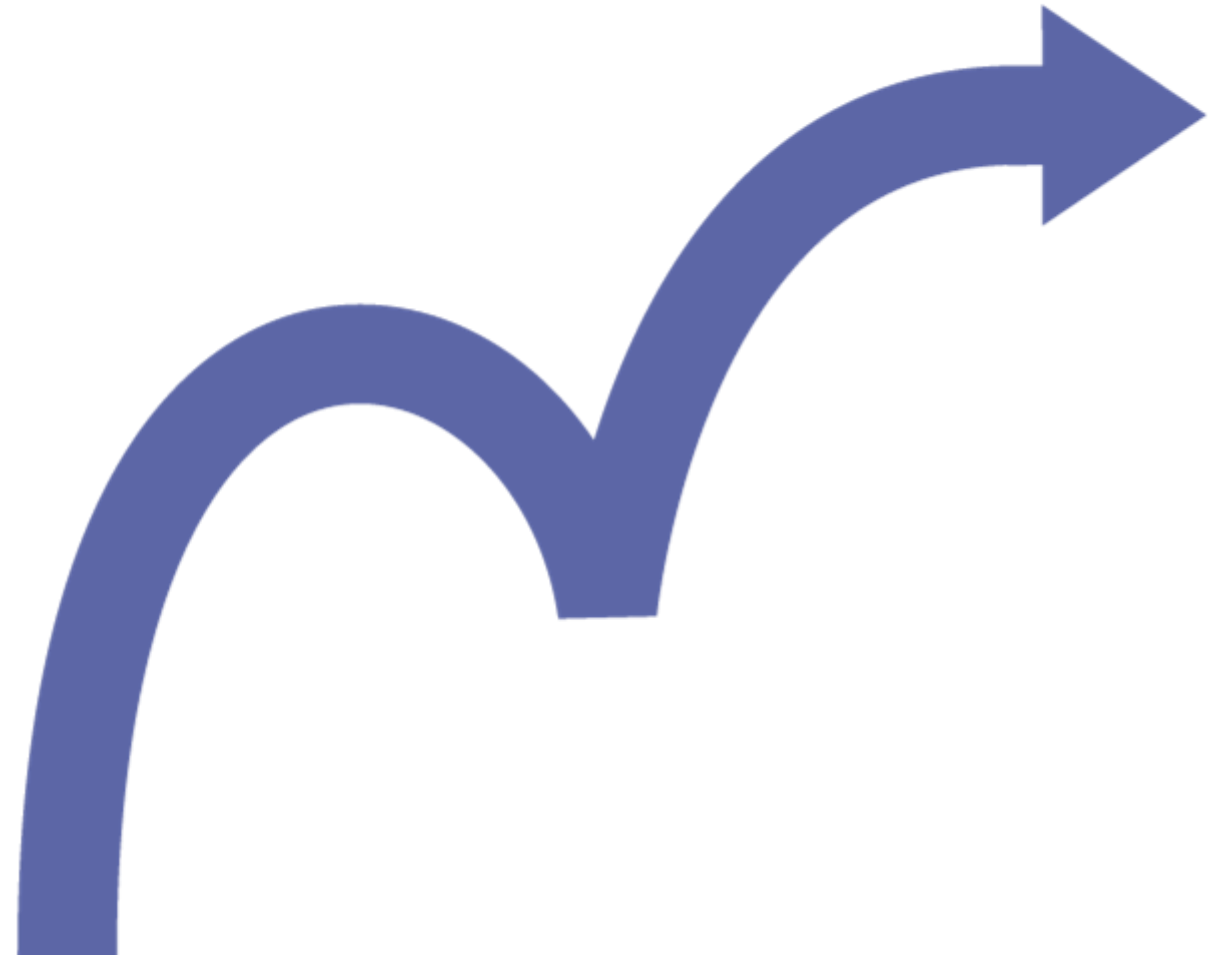
Frequência de saída da resposta

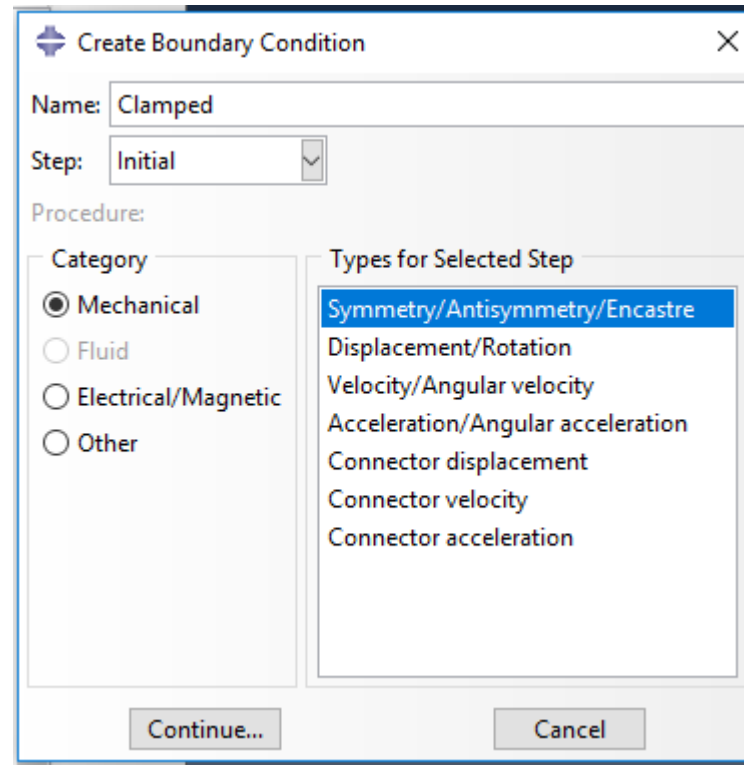
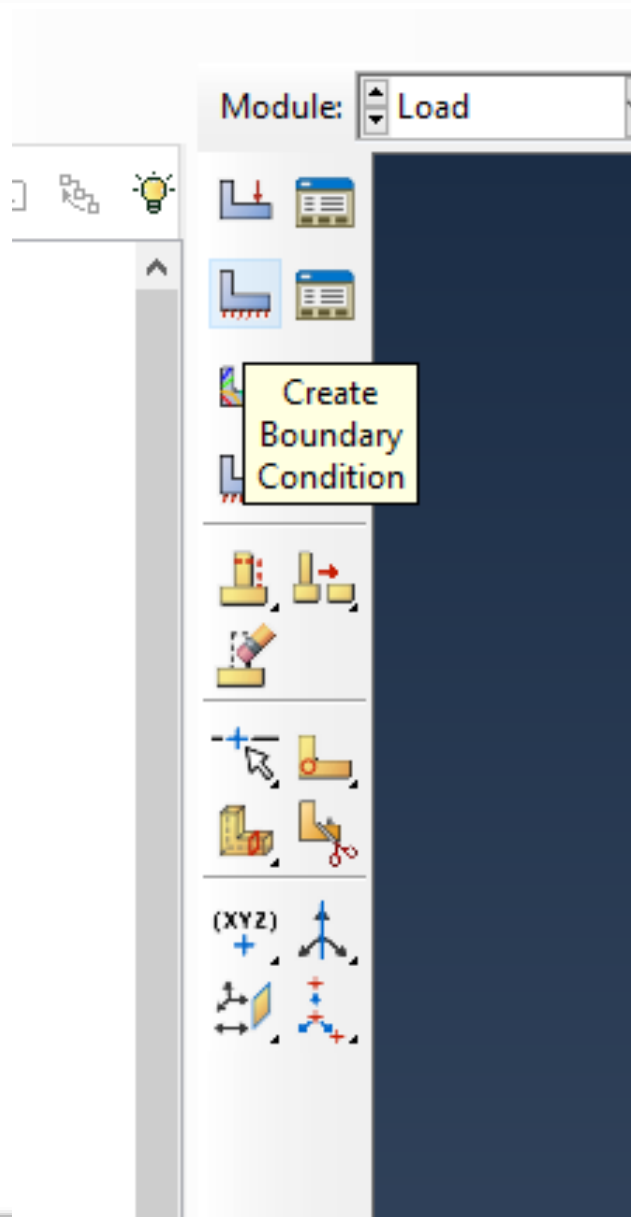
Quais as variáveis de saída. Abra uma delas (Stresses, por exemplo) e veja o que será armazenado no arquivo de saída em termos de tensões. Clique Ok e, depois, Dismiss.

Stresses
 S, Stress components and invariants
 MISES, Mises equivalent stress **Selecione Mises**
 MISESMAX, Maximum Mises equivalent stress
 TSHR, Transverse shear stress (for thick shells)
 CTSHR, 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



Vamos para o passo **Load**.
Pulamos o passo **Interaction**.
Esse passo é necessário quando temos que definir a relação entre partes. Por exemplo, o atrito, contato, interações (movimentos dependentes entre partes)...
Em nosso caso, temos somente uma parte: a viga.





Em Load, clique em “Create Boundary Condition”

- Nomeie a condição de contorno (Clamped)
- Selecione Step “Initial”, category “Mechanical”
- Para “Types for Selected Step” selecione Symmetry/Antisymmetry/Encastre”
- Clique “Continue...”



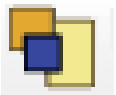
Module: Load Model: Model-1 Step: beamLoad

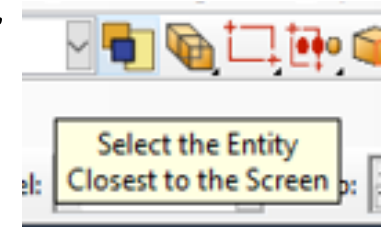
Selecione toda a face que será engastada. Atenção para selecionar SOMENTE a face lateral*.
Clique "Done"

Select regions for the boundary condition (Create set: Set-1 **Done** Sets... SIMULIA

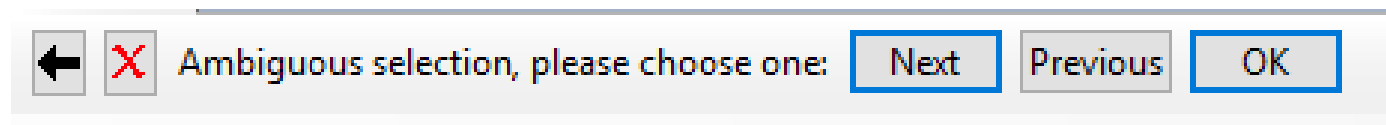
* COMO selecionar a face correta da viga?? Veja no próximo slide



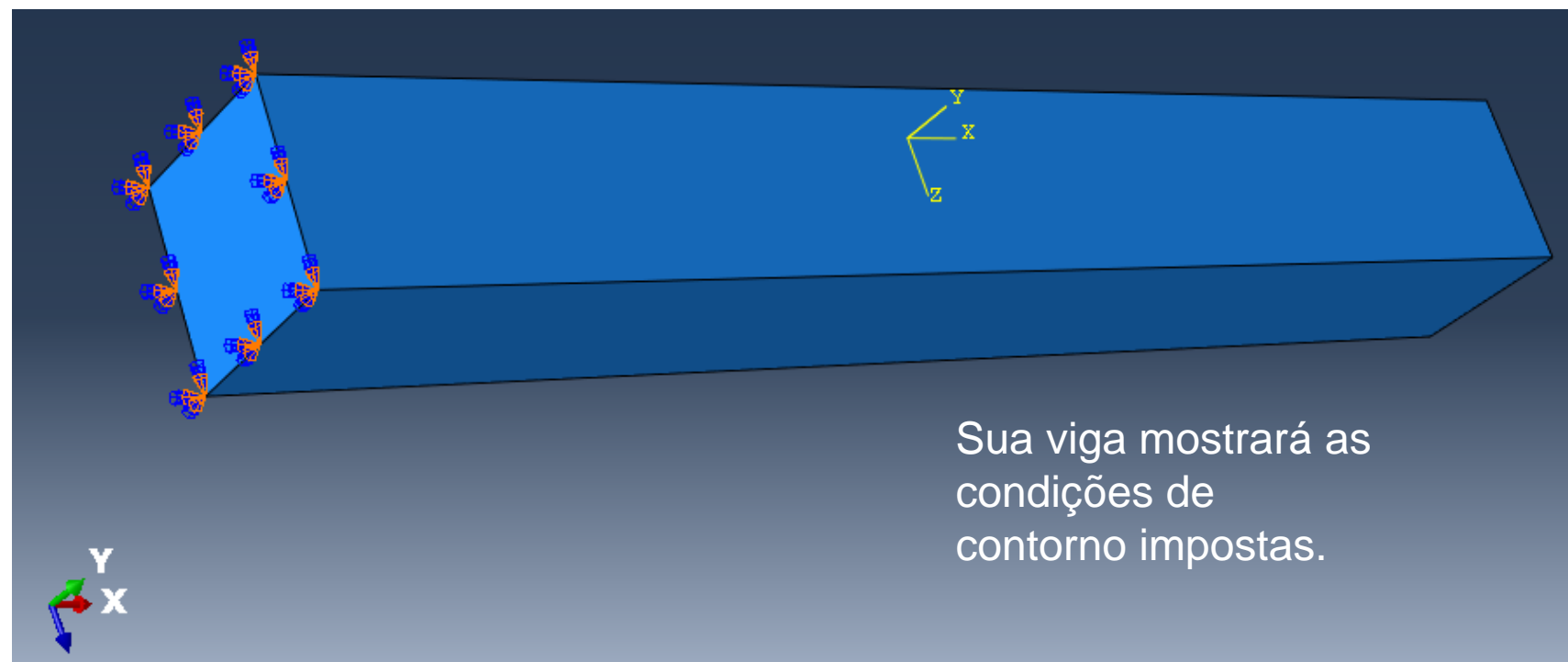
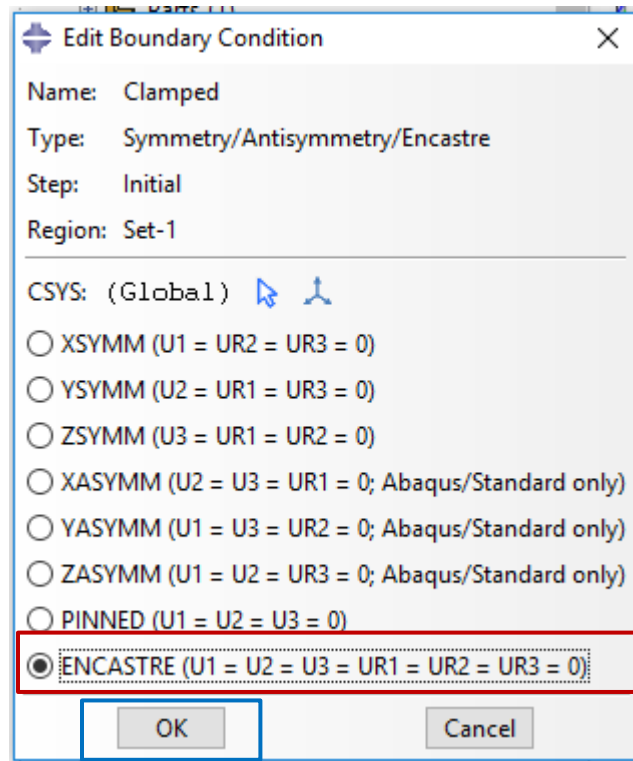
- Para selecionar a face correta será necessário girar a viga, pois quando você clica em uma região em que várias faces se sobrepõem, ABAQUS/CAE seleciona, por default, a face que está "mais próxima" na tela.
- Existe outra maneira de selecionar, sem girar. Aprender essa alternativa pode ser bastante 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**.



Selecione a opção **ENCASTRE**.

Clique "OK"

Sua viga mostrará as condições de contorno impostas.



Agora que você impôs as condições de contorno, você pode aplicar a carga distribuída à face superior da viga. A carga é aplicada durante a etapa geral, estática (General, Static) que você criou usando o módulo **Step**.



Ainda em Load, clique em “Create Load”

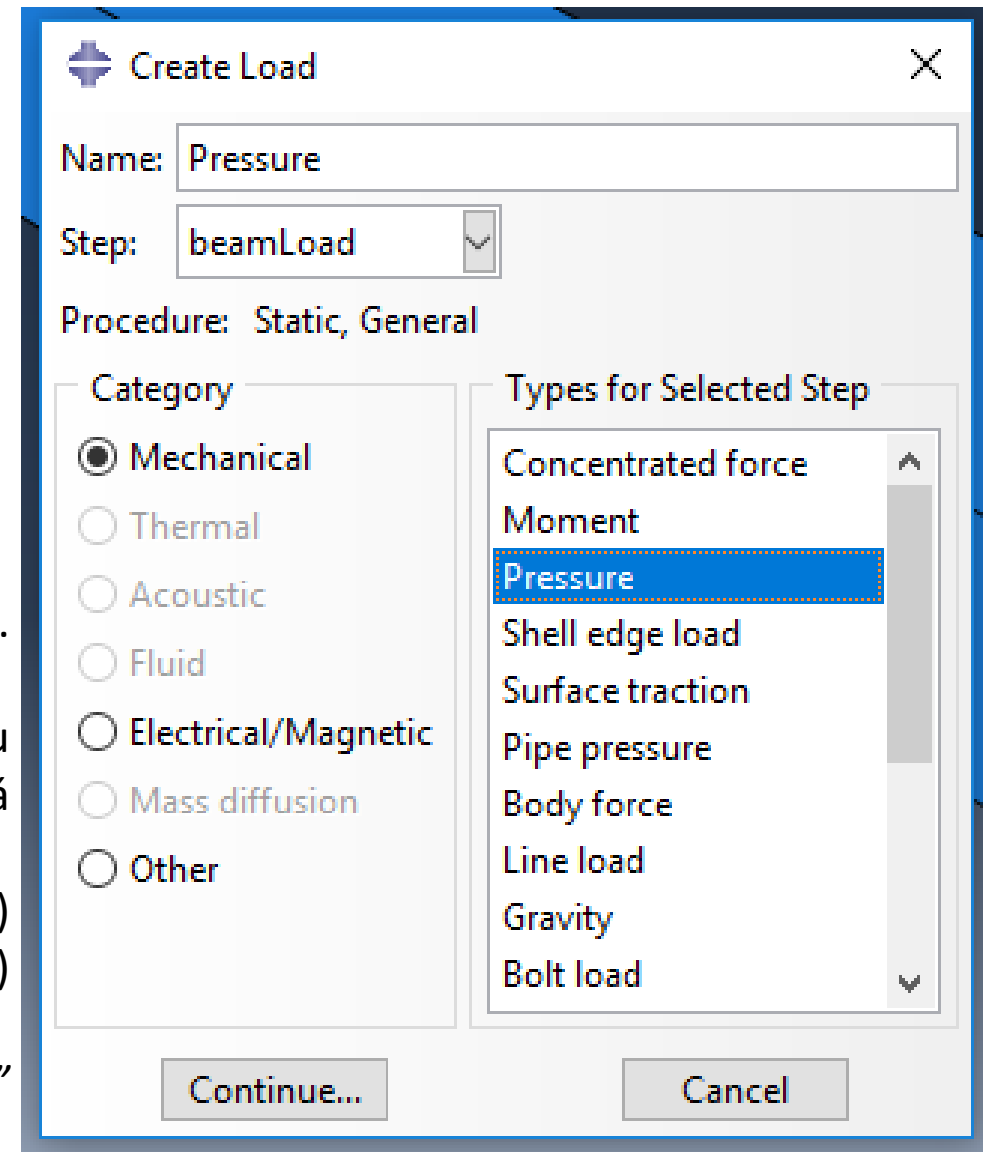
Dê um nome ao carregamento (Pressure).

Quando você selecionar o Step que você criou (beamLoad), surgirá

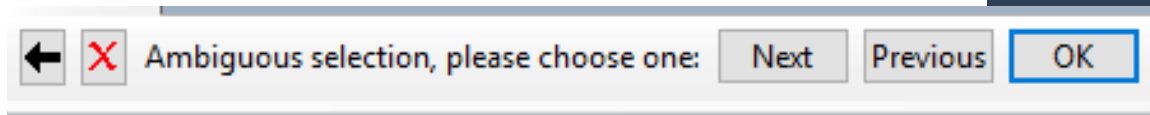
Category (selecione *Mechanical*)

Types for Selected Step (selecione *Pressure*)

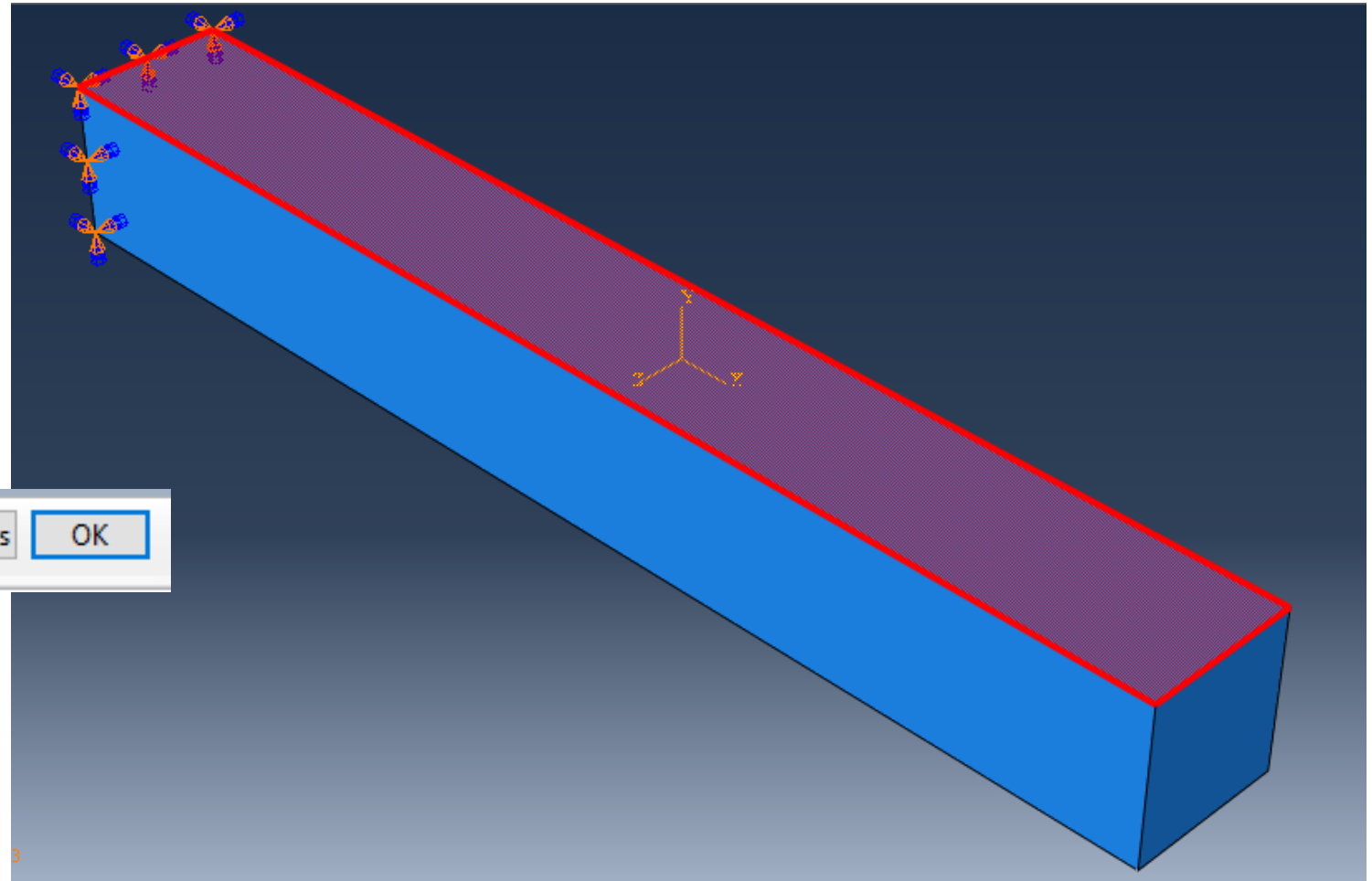
Clique “Continue”



Selecione toda a face que será aplicada a pressão.
Se você seguiu nossa dica e desativou o ícone para selecionar a face mais próxima, aparecerá, no prompt, novamente,



Basta clicar em OK

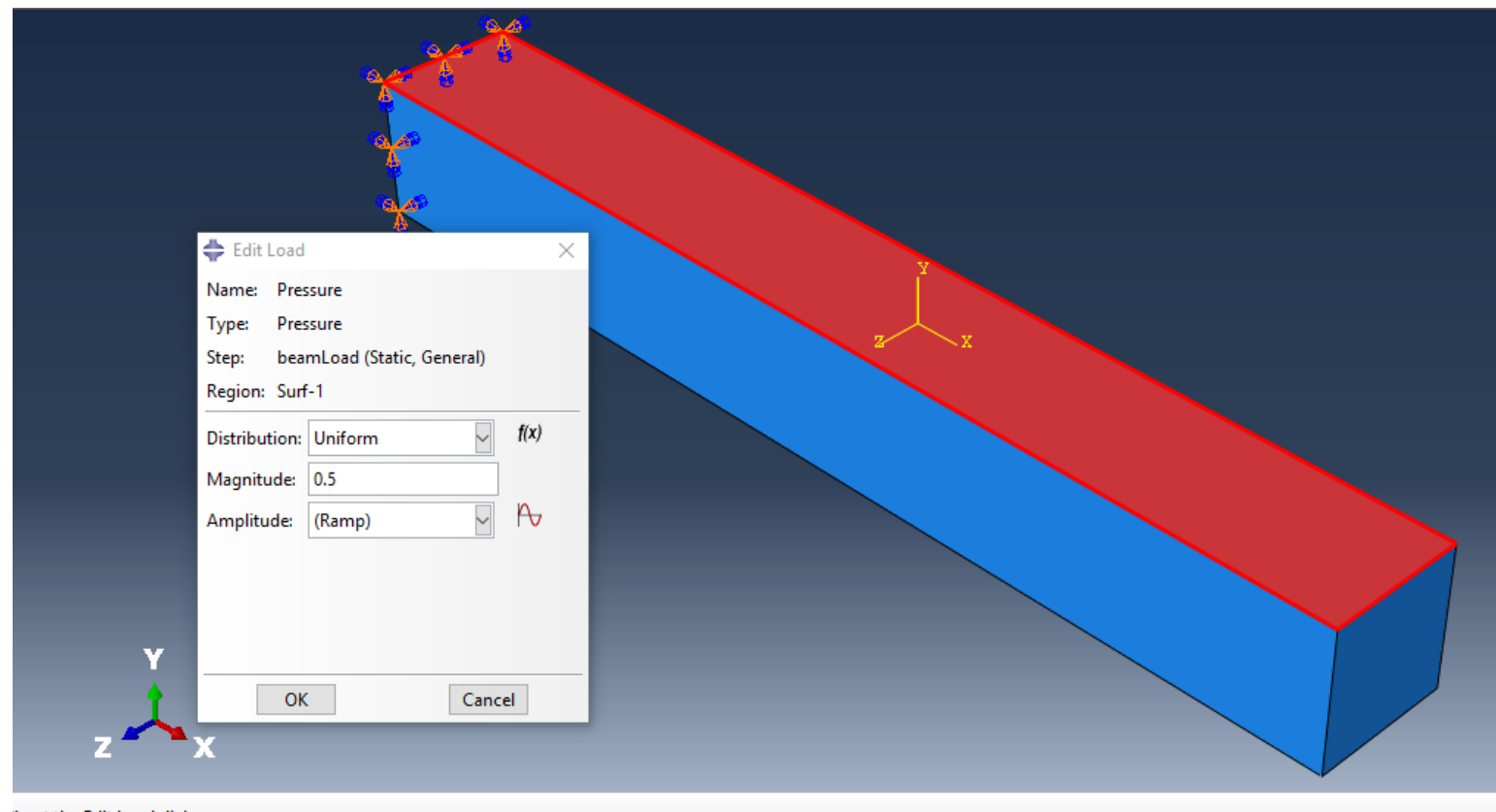


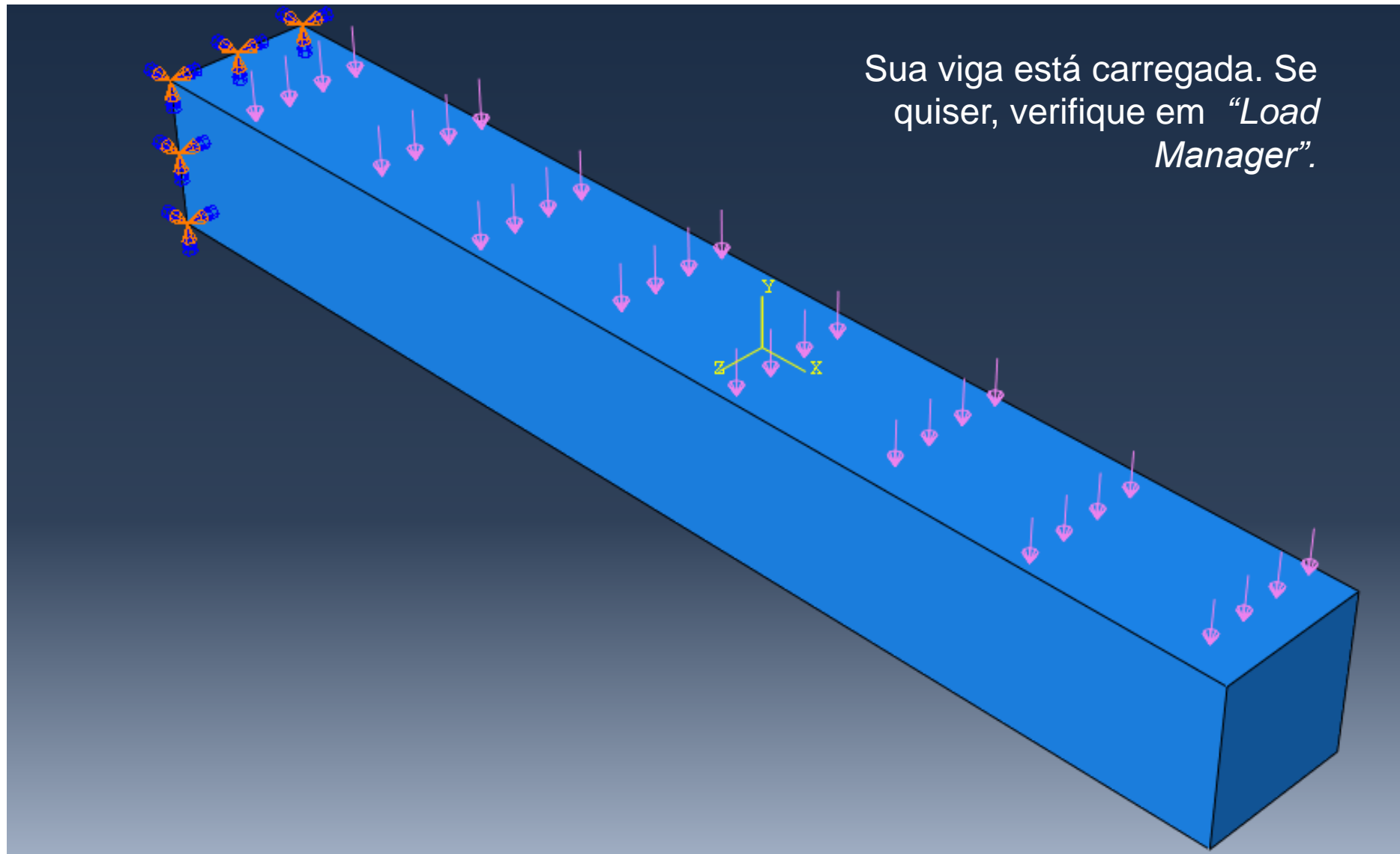


Digite uma **Magnitude** de 0.5 para a carga.

Aceite a seleção de **Amplitude** padrão - ABAQUS/CAE irá aumentar a carga durante a etapa (lembre-se que você já definiu o tempo de análise).

Clique em **OK** para criar a carga e fechar a caixa de diálogo.







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

Importante:

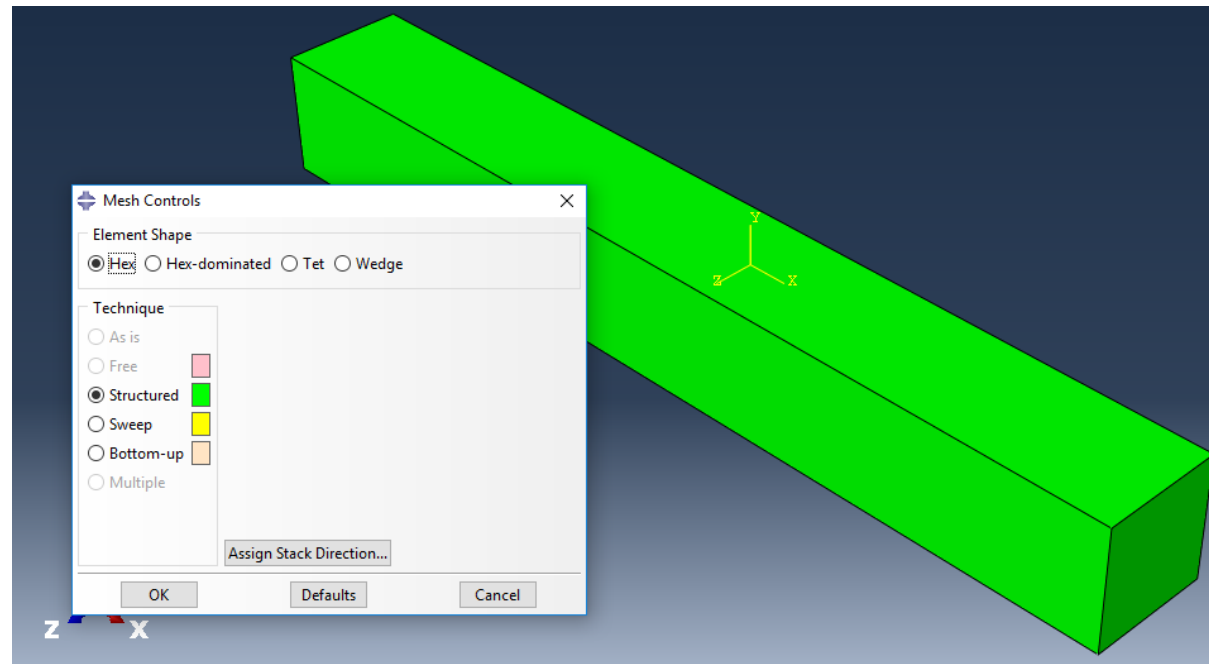
Embora você possa criar uma malha em qualquer ponto após a criação da **Assembly**, você geralmente faz isso depois de configurar o resto do modelo, já que itens como cargas, condições de contorno e etapas *dependem da geometria subjacente e não da malha*. Se você faz com que dependam da malha (por exemplo, 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”

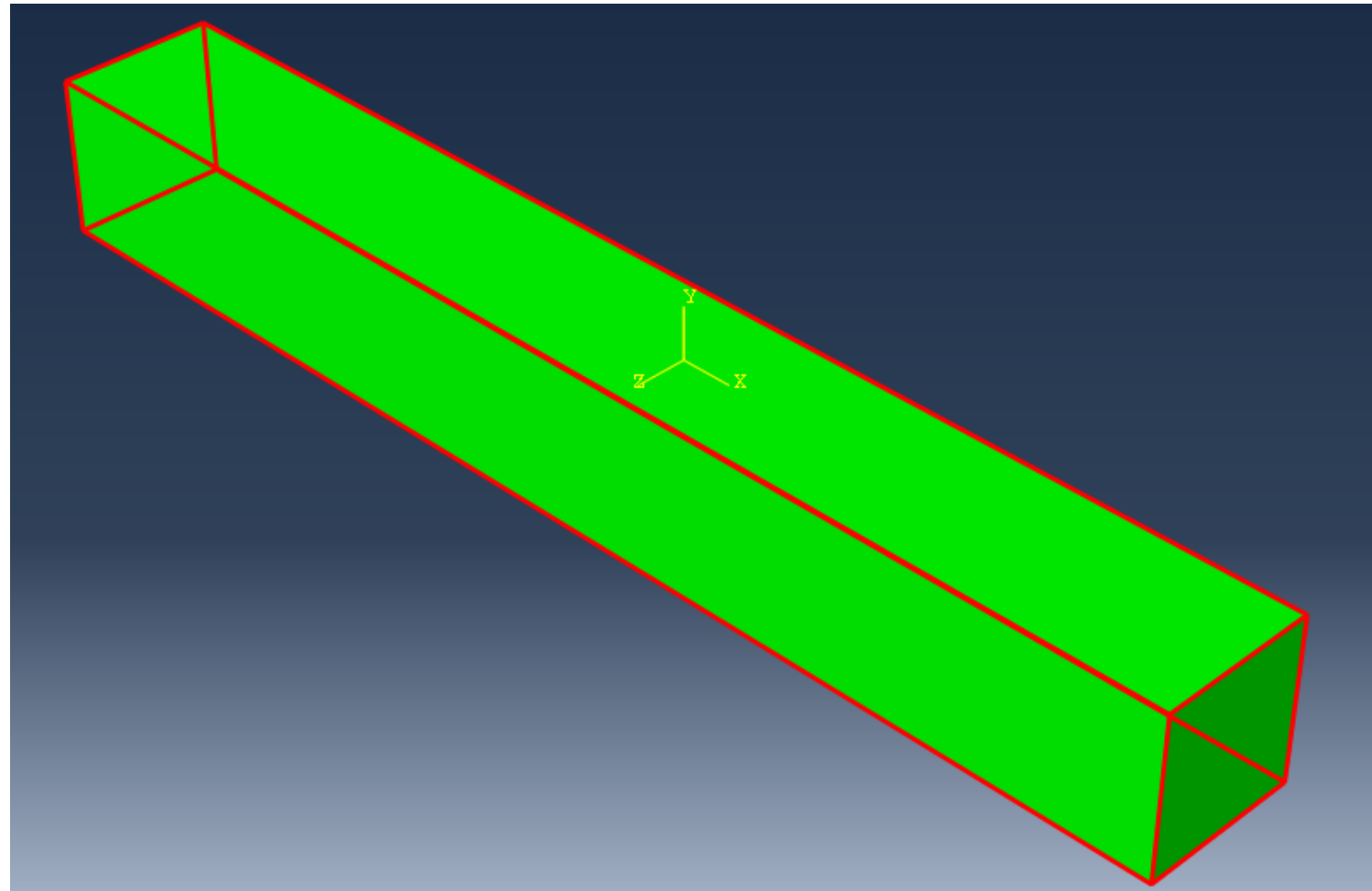
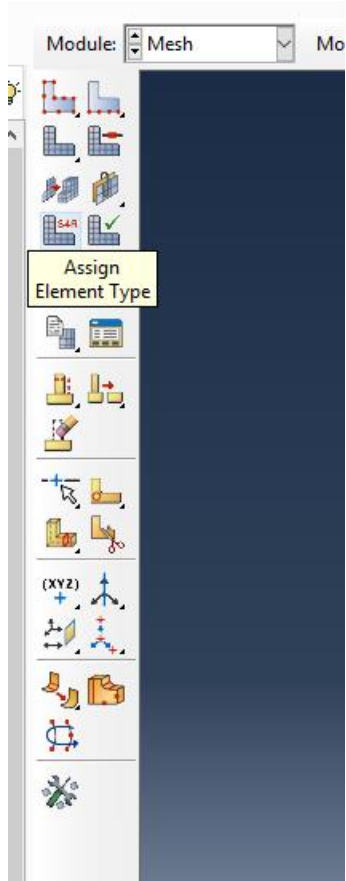
A caixa de diálogo Mesh Controls é exibida. ABAQUS colore as regiões do seu modelo para indicar qual técnica ele usará para fazer a malha nessa região. Como usará malhas estruturadas para a viga, exibirá a viga em verde.

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



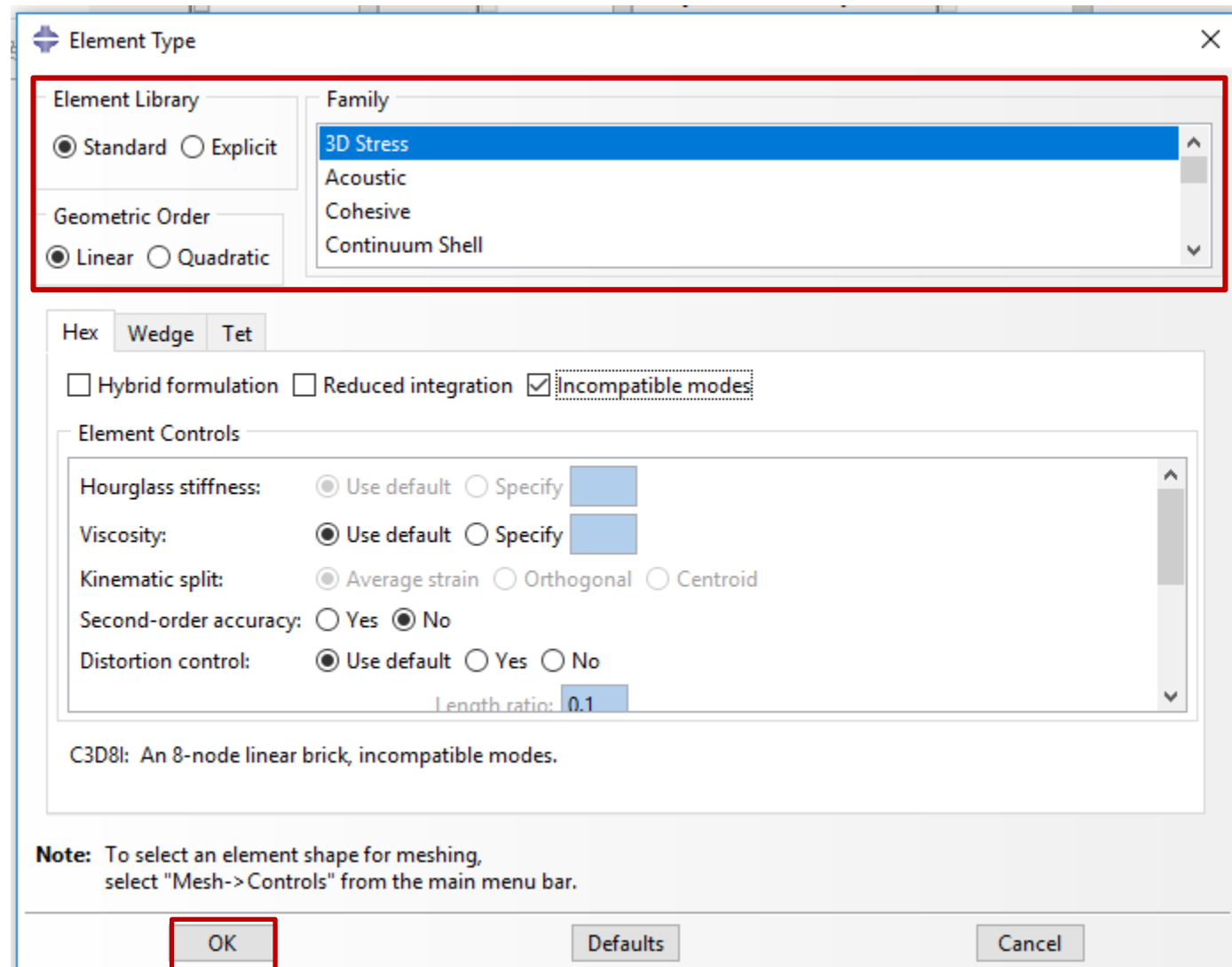
Para escolher o tipo de elemento,

- clique em “Assign Element Type”;
- selecione a viga;
- “Done”





- 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.



Ok



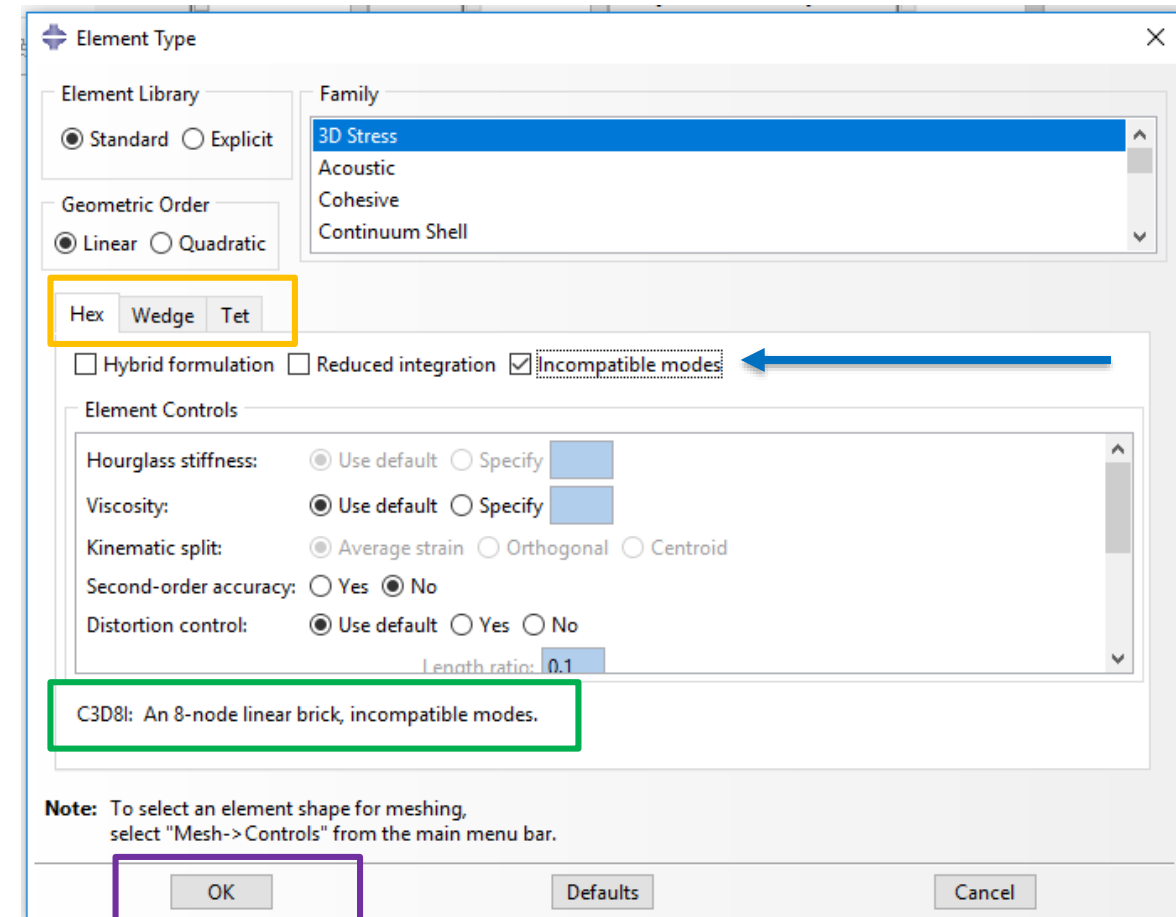
Na parte inferior da caixa de diálogo, examine as opções de forma do elemento. Uma breve descrição da seleção de elemento padrão está disponível na parte inferior de cada aba.

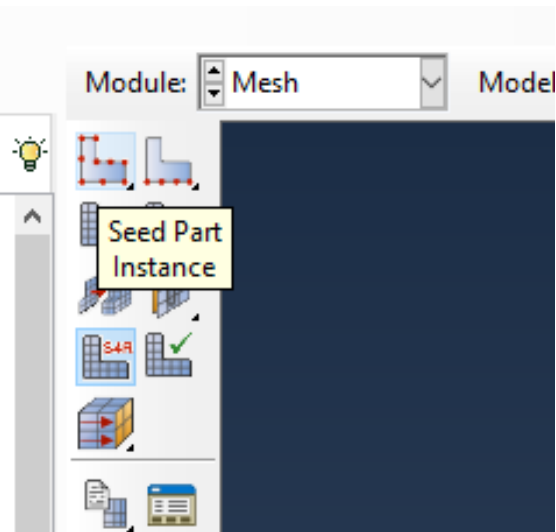
Uma vez que o modelo é um sólido tridimensional, são mostrados apenas os tipos de elementos sólidos tridimensionais - hexaédricos na página **Hex**, prisma triangular na página **Wedge** e tetraédrico na página **Tet**.

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.

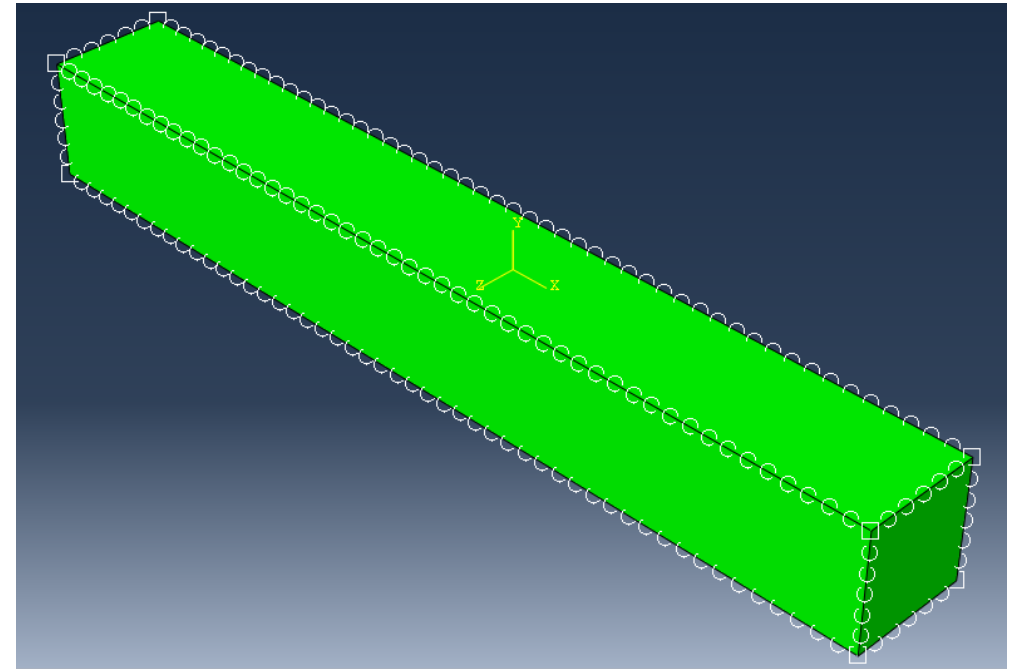
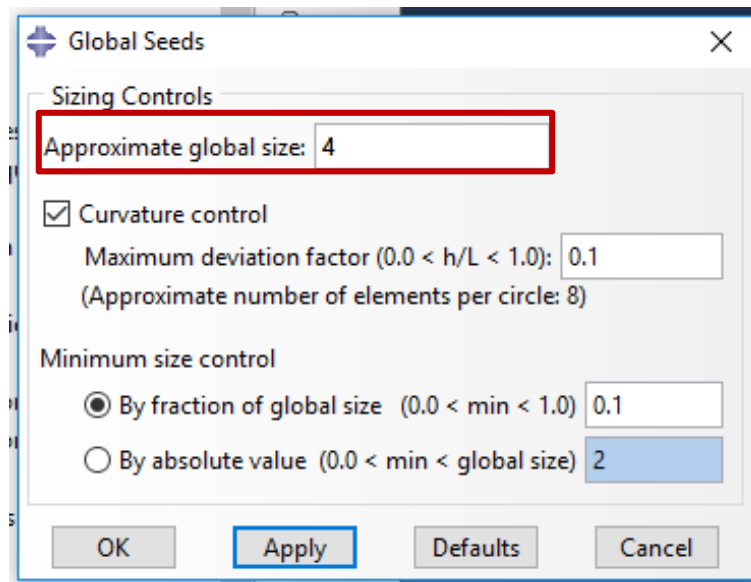
Clique OK





Clique em “Seed Part Instance” para definir a dimensão da malha

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

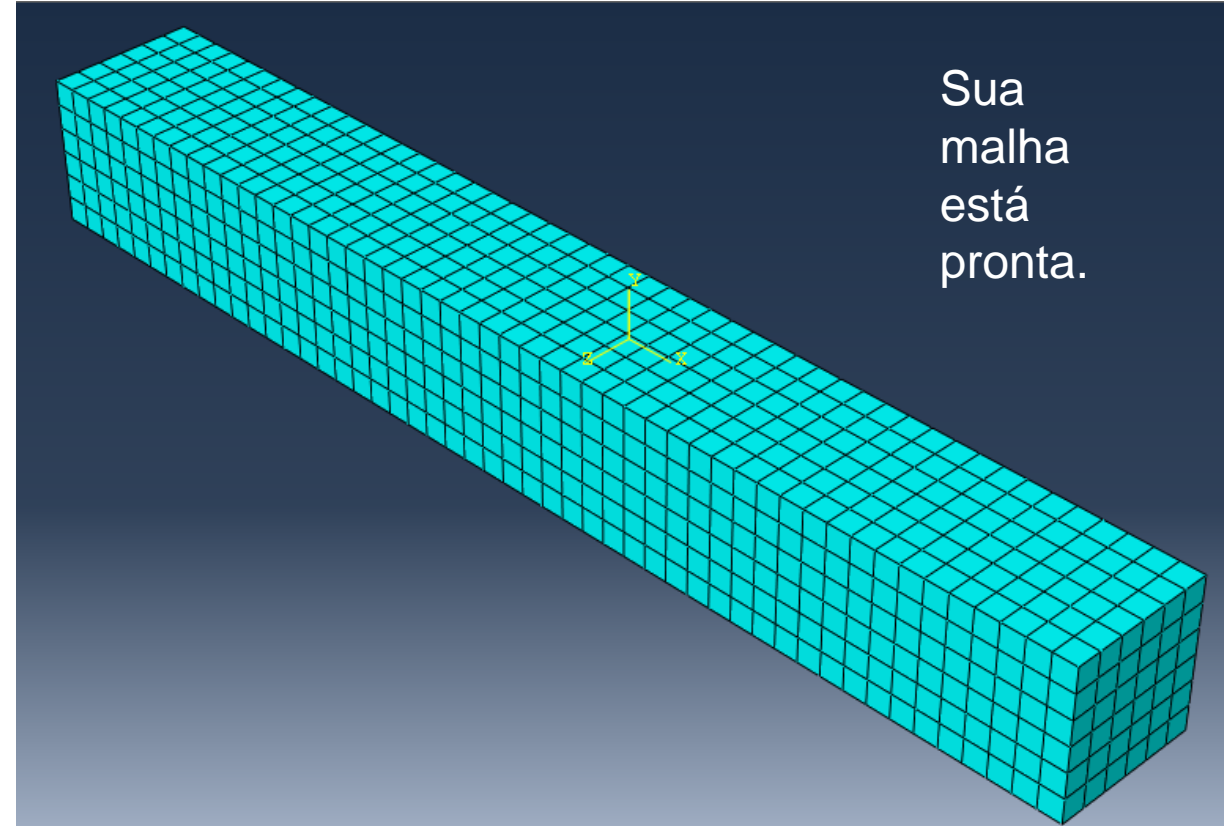
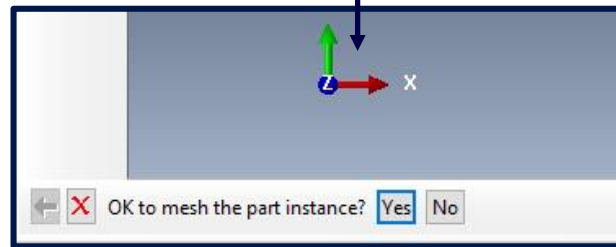


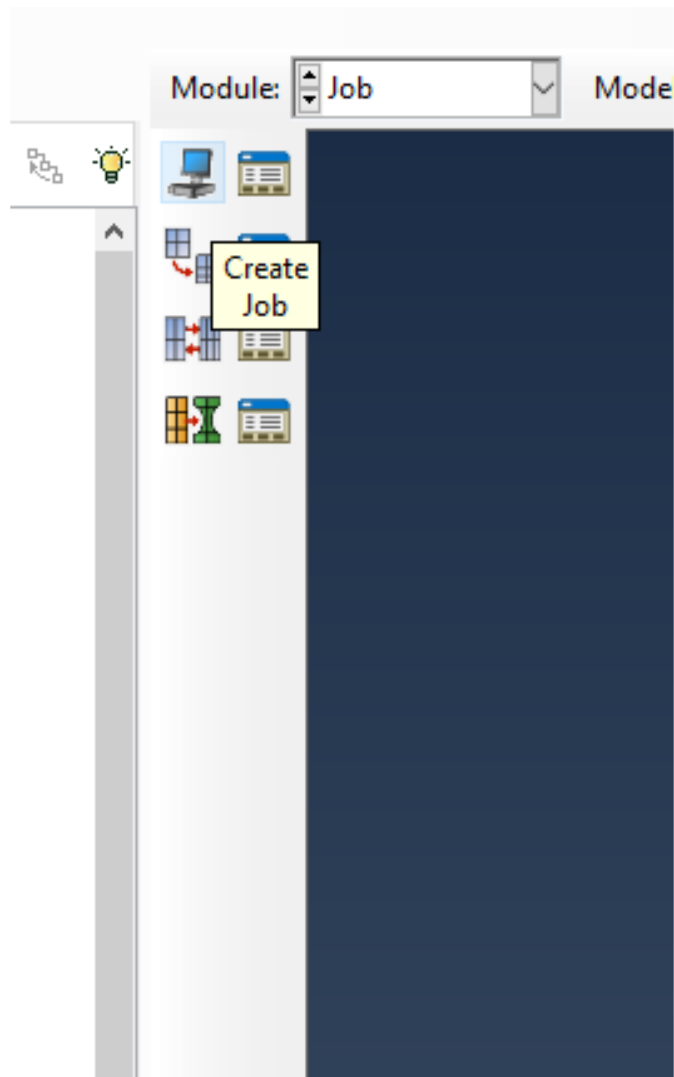
Essa será a visão da viga no Viewport



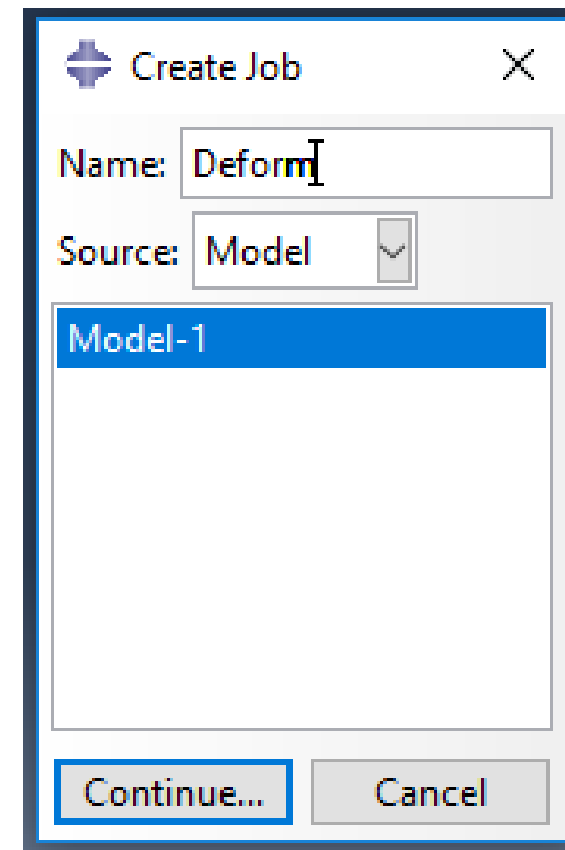
Clique em “Mesh Part Instance” para gerar a malha.

Clique em “Yes”.





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





Edit Job

Name: Deform
Model: Model-1
Analysis product: Abaqus/Standard

Description: Cantilever beam subjected to pressure load

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: Cantilever beam subjected to pressure load

Submission | General | Memory | **Parallelization** | Precision

Use multiple processors 8
 Use GPGPU acceleration 1

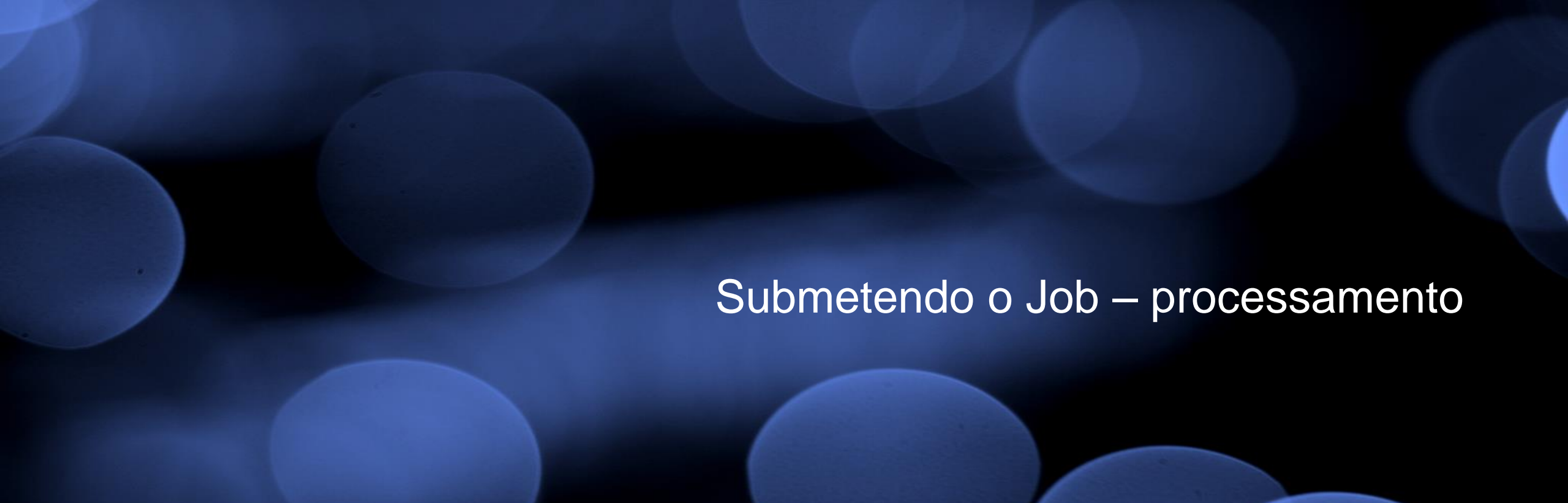
Abaqus/Explicit

Number of domains: 1
Parallelization method: Domain
Multiprocessing mode: Default

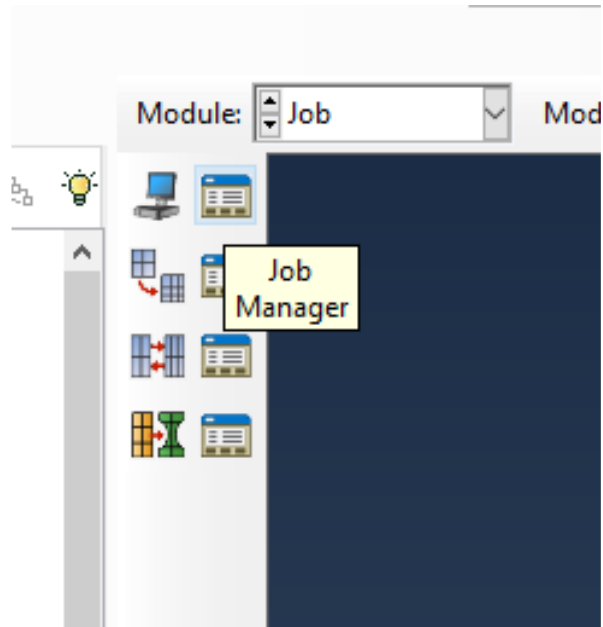
Para problemas grandes, defina o número de processadores (aqui não é necessário).

Clique "OK".

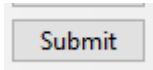
OK | Cancel



Submetendo o Job – processamento

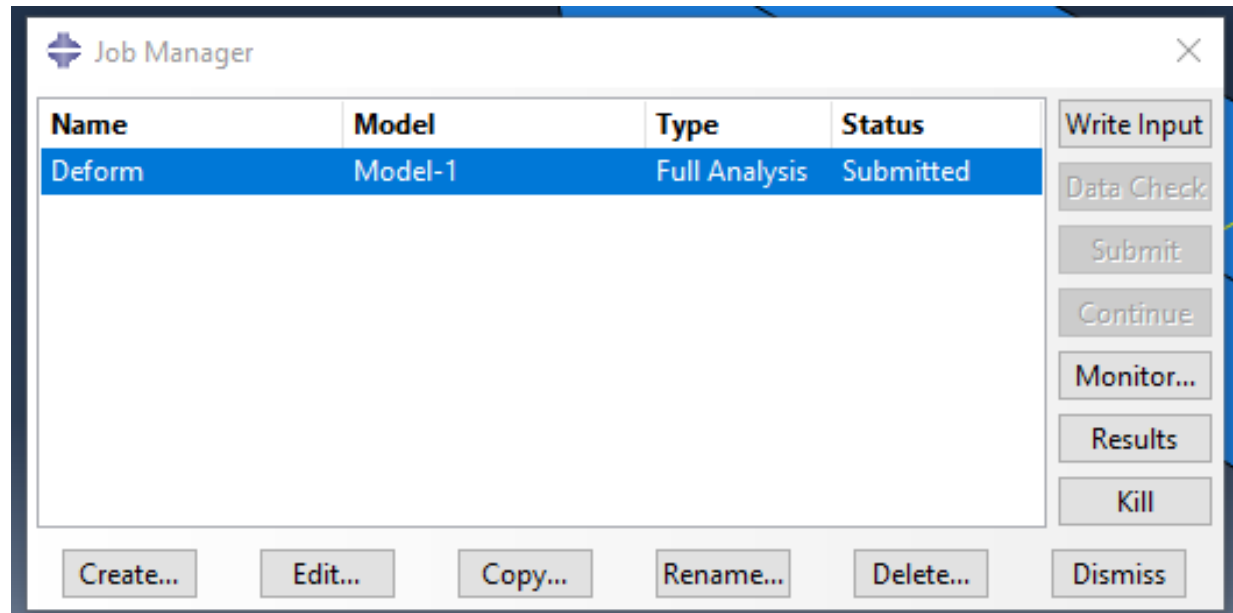


Em “Job Manager”, submeta seu trabalho,





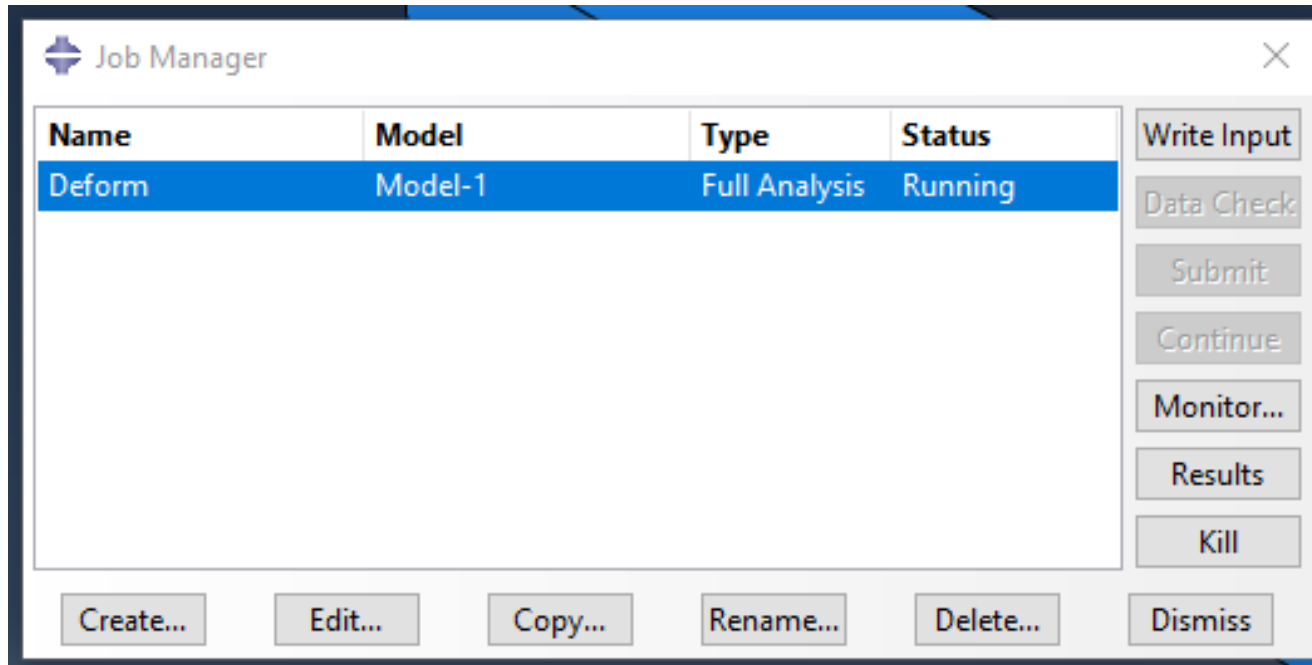
Primeiro, o programa irá analisar se seu modelo está ok (status Submitted)



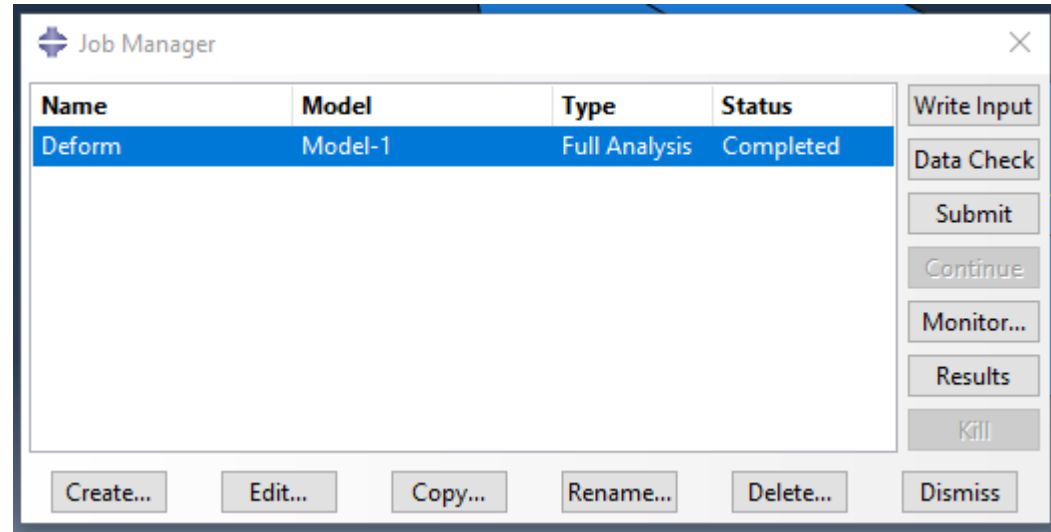
```
The job input file "Deform.inp" has been submitted for analysis.  
Job Deform: Analysis Input File Processor completed successfully.
```



Depois, a análise se inicia (status Running).



```
The job "Deform" has been created.  
The job input file "Deform.inp" has been submitted for analysis.
```

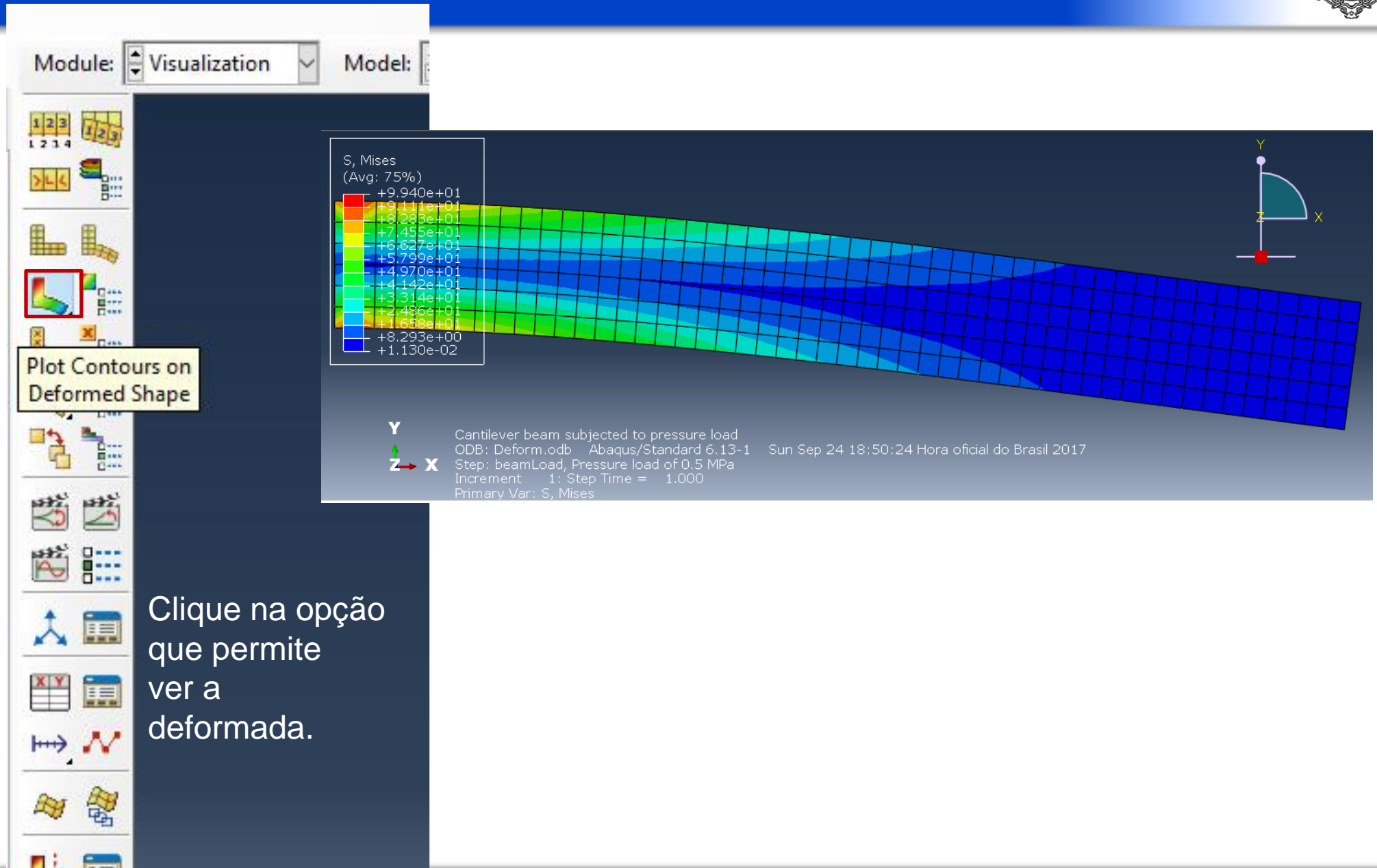


Quando a análise tiver terminado (status “Completed”), clique em “Results”

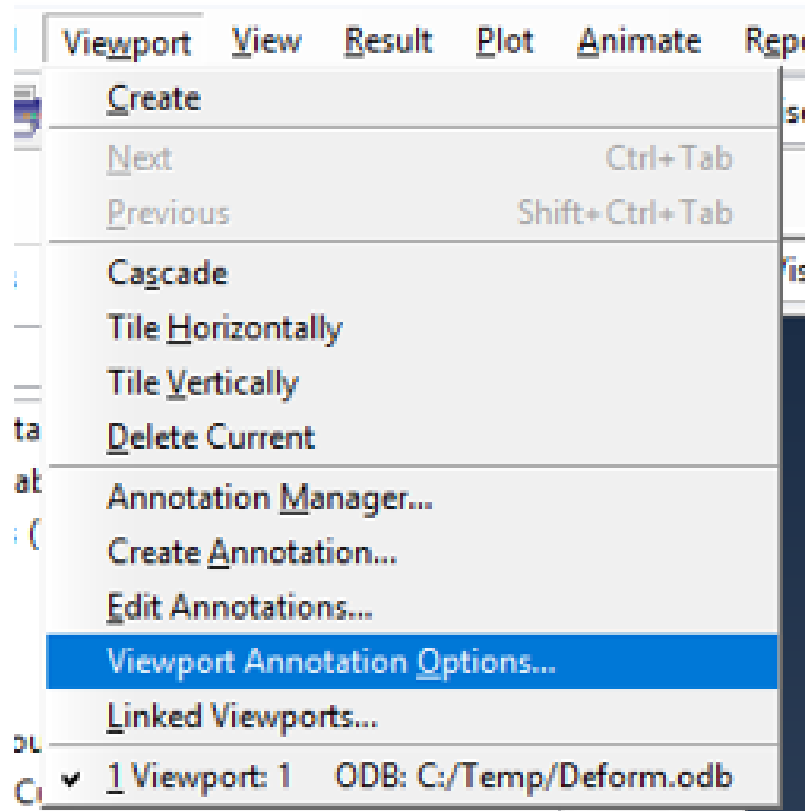
```
A new model database has been created.
The model "Model-1" has been created.
The model database "C:\Users\Larissa\Documents\01_ENSINO\02_POS GRADUACAO\MecSol\AulasTeoricas\02\MEF_Abaqus\Beam.cae" has been opened.
The model database has been saved to "C:\Users\Larissa\Documents\01_ENSINO\02_POS GRADUACAO\MecSol\AulasTeoricas\02\MEF_Abaqus\Beam.cae".
Application restarted after 2766 minutes of idle time; the license will be checked within the next 3 minutes.
The model database has been saved to "C:\Users\Larissa\Documents\01_ENSINO\02_POS GRADUACAO\MecSol\AulasTeoricas\02\MEF_Abaqus\Beam.cae".
A new model database has been created.
The model "Model-1" has been created.
The model database "C:\Users\Larissa\Documents\01_ENSINO\02_POS GRADUACAO\MecSol\AulasTeoricas\02\MEF_Abaqus\Beam.cae" has been opened.
Global seeds have been assigned.
Global seeds have been assigned.
1800 elements have been generated on instance: Beam-1
The job "Deform" has been created.
The job input file "Deform.inp" has been submitted for analysis.
Job Deform: Analysis Input File Processor completed successfully.
Job Deform: Abaqus Standard completed successfully.
Job Deform completed successfully.
```

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

Resultados – Pós processamento

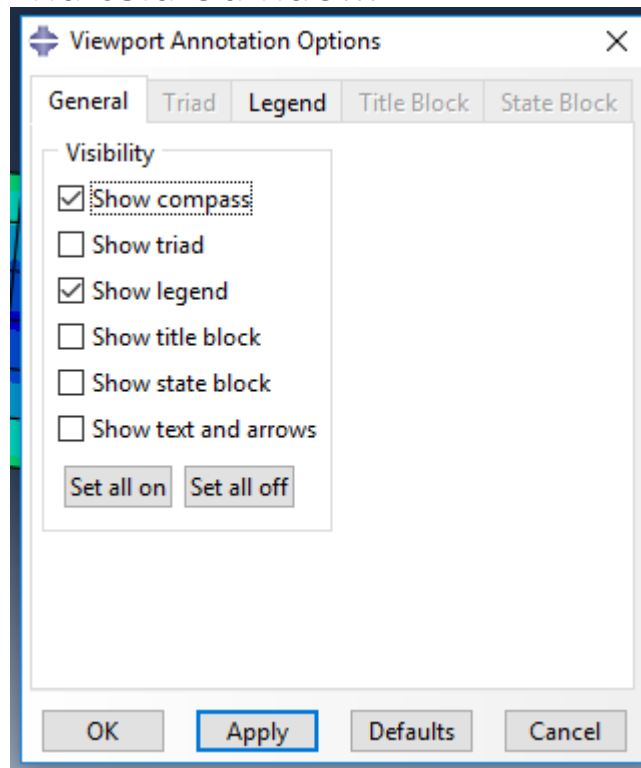


Clique na opção que permite ver a deformada.

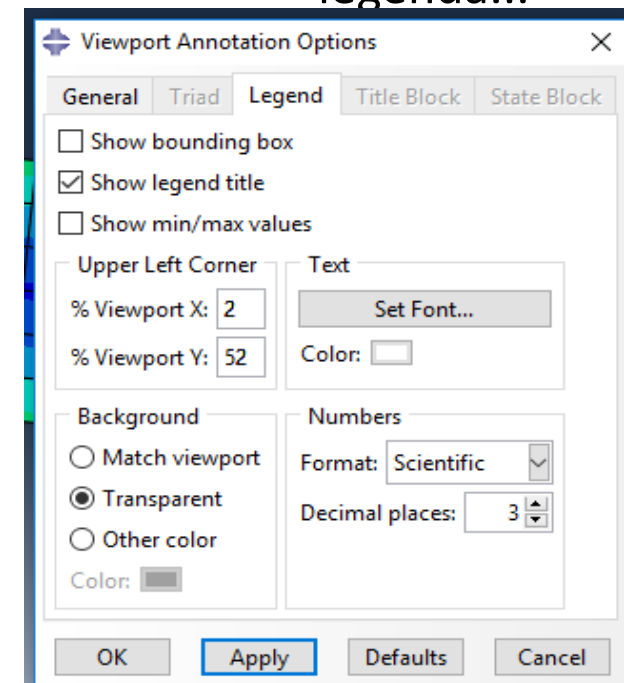


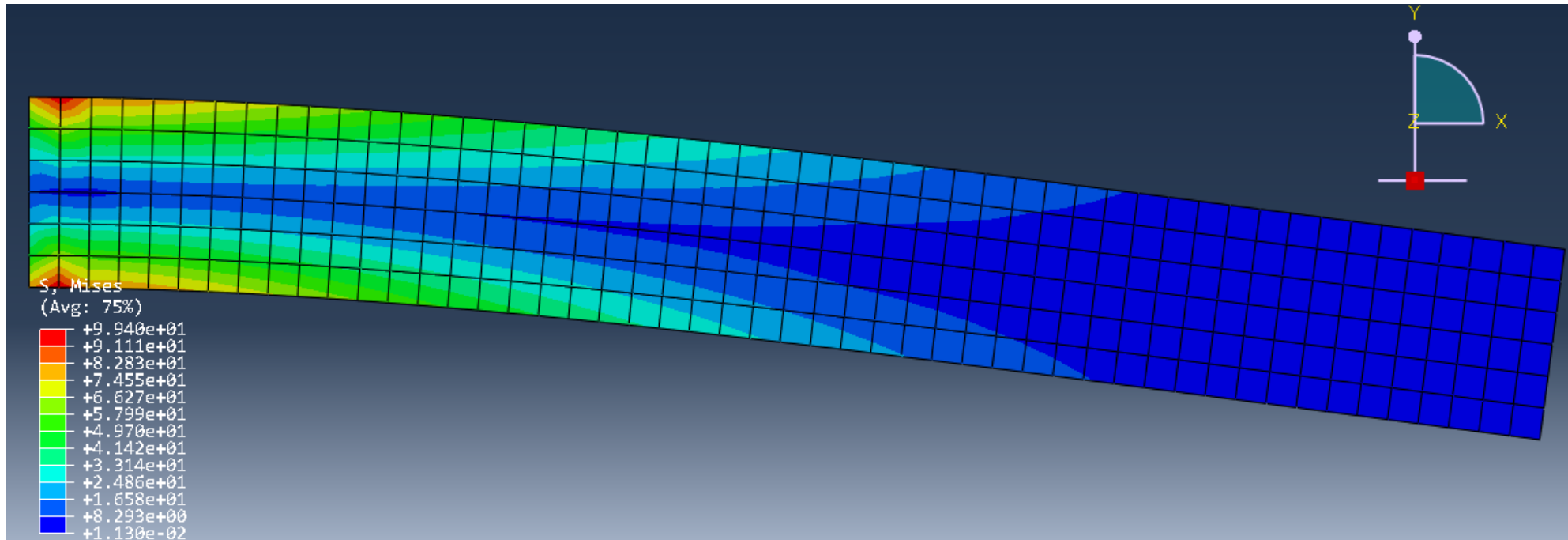
Em Viewport → Viewport Annotation Options...

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

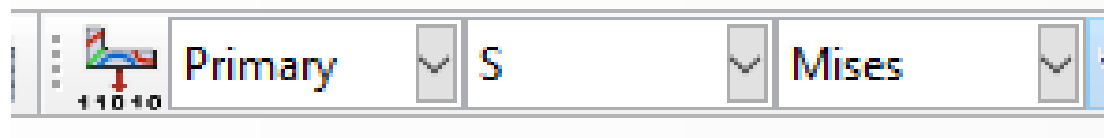


Ou os dados da legenda...

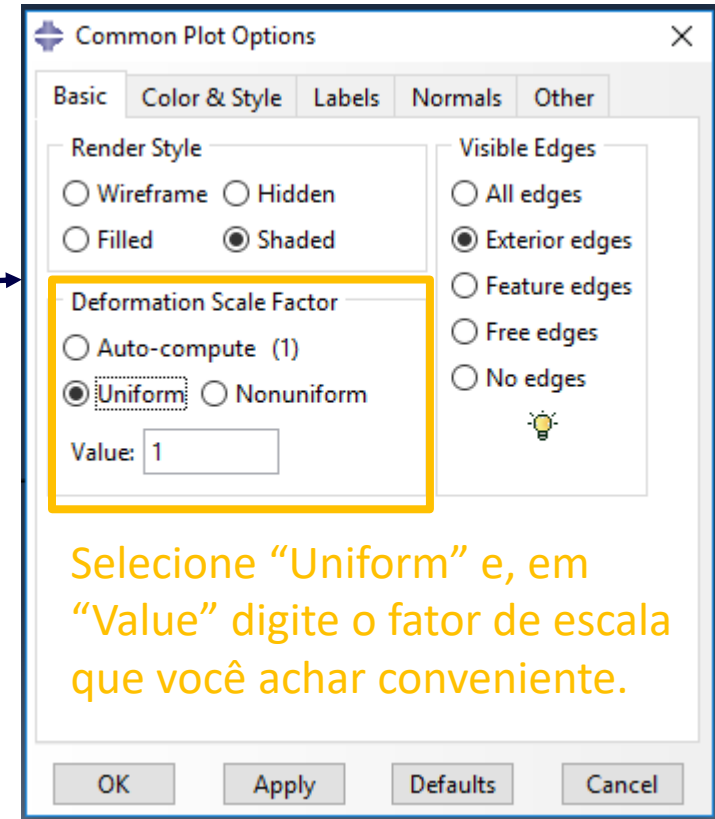
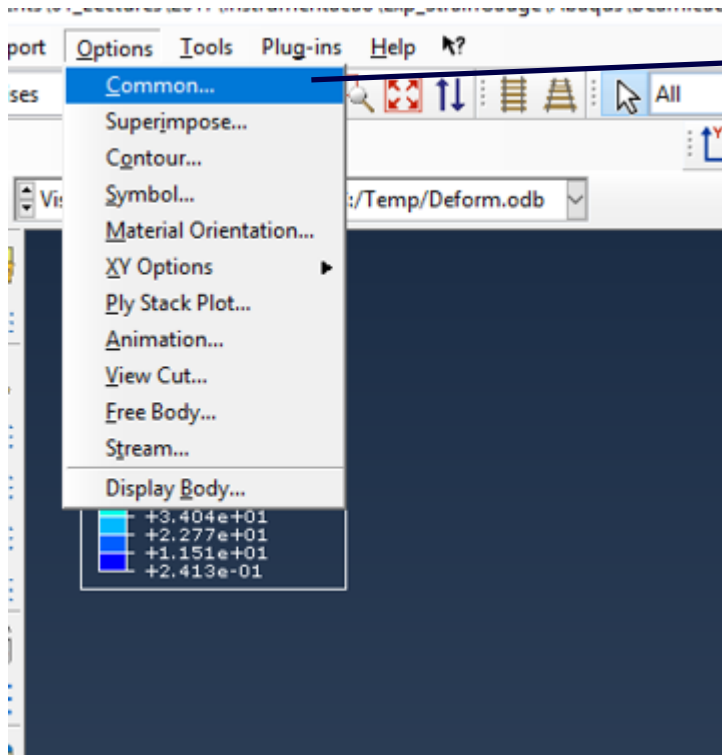




Essa visualização é da tensão de von Mises. Você pode visualizar outras variáveis mudando a seleção em:



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.



FIM