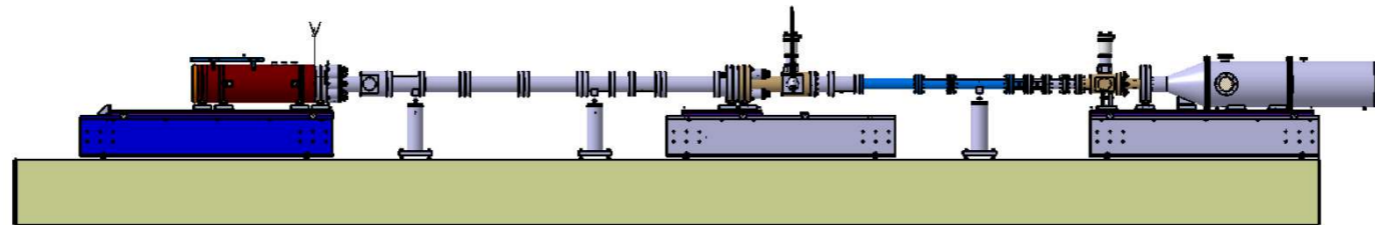


# Projeto do Diafragma para o Tubo de Choque ESTHER

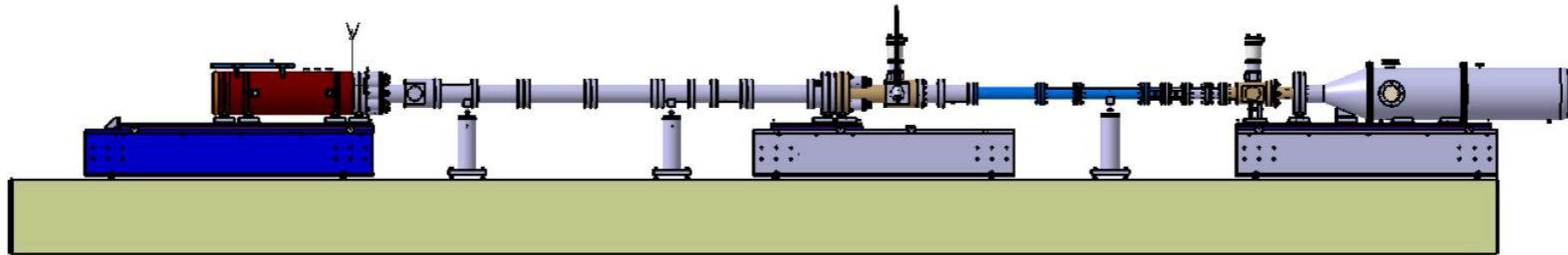


Francisco João Gonçalves Afonso

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Mecânica**

Orientador (es): Prof./Dr./Eng. Luis Filipe Galvão dos Reis  
Prof./Dr./Eng. Mário Lino Prazeres da Silva

# Objetivos:



- 1) dimensionamento dos diafragmas e geometria do entalhe;
- 2) determinação do tempo de abertura do diafragma;
- 3) opções de fabrico;
- 4) projecto de alguns componentes do tubo.

# Missão ESTHER

- **Reentrada do espaço**
  - Aquecimento por fricção na entrada da atmosfera
  - Diferentes composições de gás e velocidades de entrada (6-12 km/s)
- **O aquecimento de parede provocado pelo escoamento hiperbólico vai impactar o dimensionamento das protecções térmicas do veículo.**
- **Um tubo de choque reproduz no solo estas condições aerotermodinâmicas.**



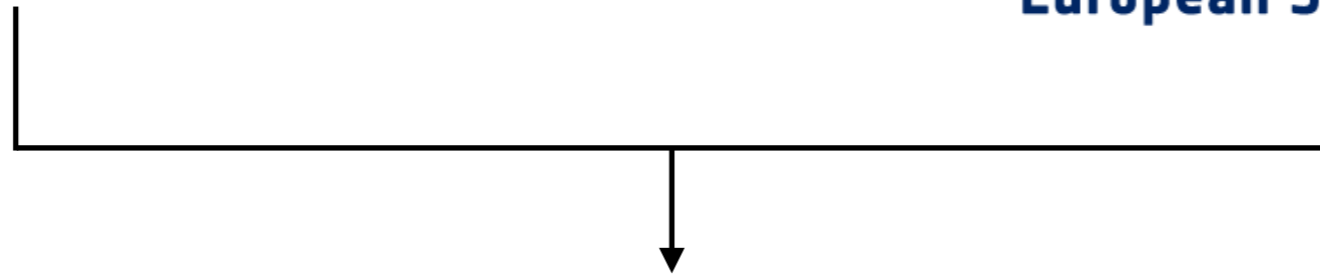


**ipfn**  
INSTITUTO DE PLASMAS  
E FUSÃO NUCLEAR

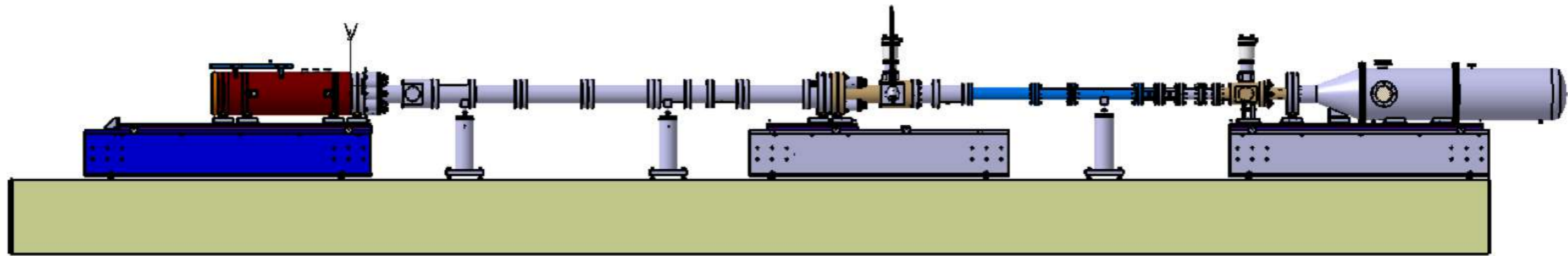


**esa**

**European Space Agency**



# Operação do Tubo de Choque

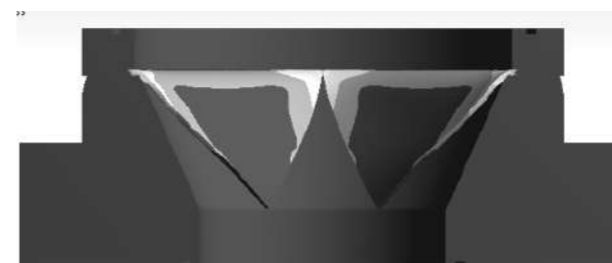
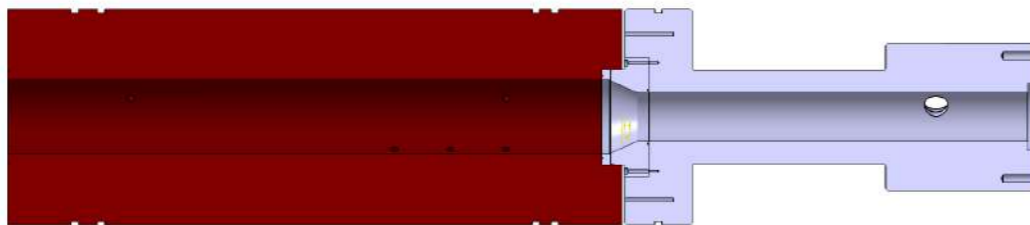


- Enchimento de mistura de gases  $H_2/O_2/He$

- Ignição por laser
- Combustão

- Aumento de pressão
- Ruptura do diafragma

- Formação da onda de choque



# Requisitos de projeto

- 1) O tempo de abertura do diafragma deverá ser próximo do valor teórico;
- 2) A estrutura de suporte dos diafragmas deverá impedir o escorregamento dos diafragmas aquando da sua abertura;
- 3) Os diafragmas deverão ser fabricados num aço de baixo custo;
- 4) O processo de fabrico deverá garantir a integridade geométrica pretendida e deverá ser de baixo custo;
- 5) O material usado no tubo deverá conter o mínimo teor em carbono possível por forma a garantir a não reação com a mistura.

# Calculo fator de segurança de projeto

## Método de Pugsley

$$n_s = n_{sx} n_{sy}$$

Characteristic <sup>a</sup>		B =			
		vg	g	f	p
A = vg	C = {	1.1	1.3	1.5	1.7
	g	1.2	1.45	1.7	1.95
	f	1.3	1.6	1.9	2.2
	p	1.4	1.75	2.1	2.45
A = g	C = {	1.3	1.55	1.8	2.05
	g	1.45	1.75	2.05	2.35
	f	1.6	1.95	2.3	2.65
	p	1.75	2.15	2.55	2.95
A = f	C = {	1.5	1.8	2.1	2.4
	g	1.7	2.05	2.4	2.75
	f	1.9	2.3	2.7	3.1
	p	2.1	2.55	3.0	3.45
A = p	C = {	1.7	2.15	2.4	2.75
	g	1.95	2.35	2.75	3.15
	f	2.2	2.65	3.1	3.55
	p	2.45	2.95	3.45	3.95

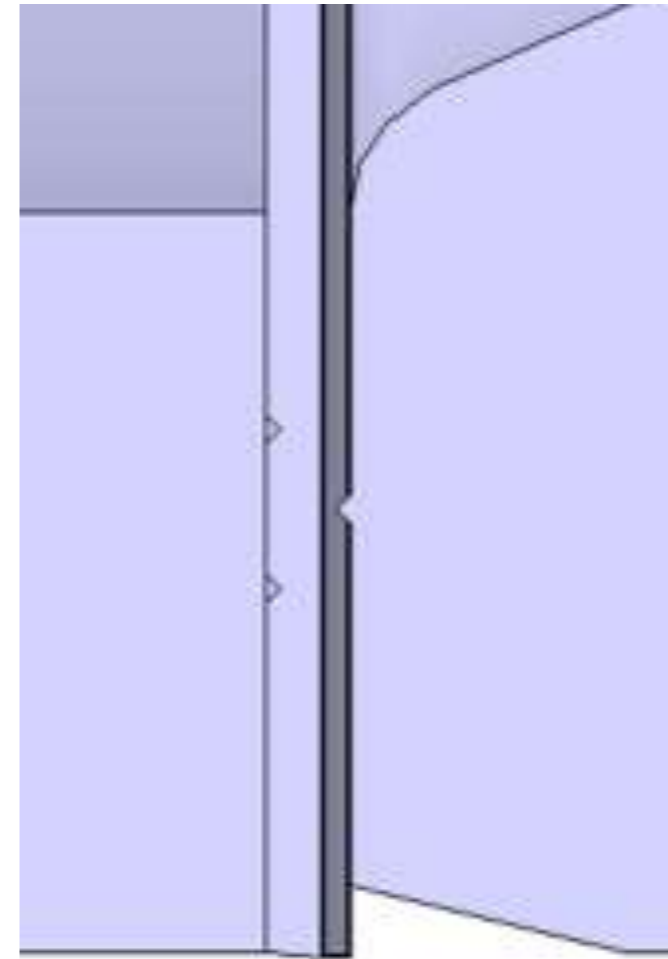
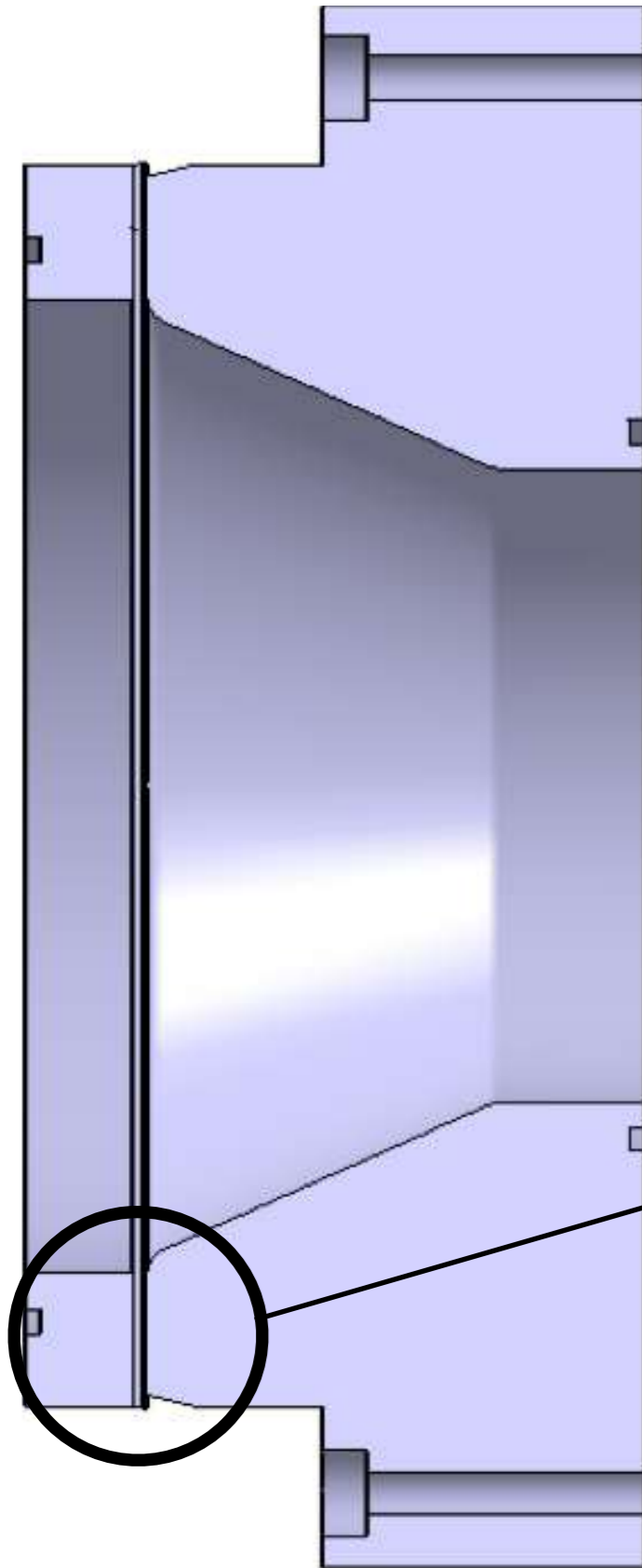
Characteristic <sup>a</sup>		D =		
		ns	s	vs
E = {	ns	1.0	1.2	1.4
	s	1.0	1.3	1.5
	vs	1.2	1.4	1.6

<sup>a</sup> vs = very serious, s = serious, and ns = not serious  
 D = danger to personnel.  
 E = economic impact.

$$n=1.32$$

<sup>a</sup> vg = very good, g = good, f = fair, and p = poor.  
 A = quality of materials, workmanship, maintenance, and inspection.  
 B = control over load applied to part.  
 C = accuracy of stress analysis, experimental data, or experience with similar parts.

# Suportes de Diafragma





# Sistema de fecho da câmara

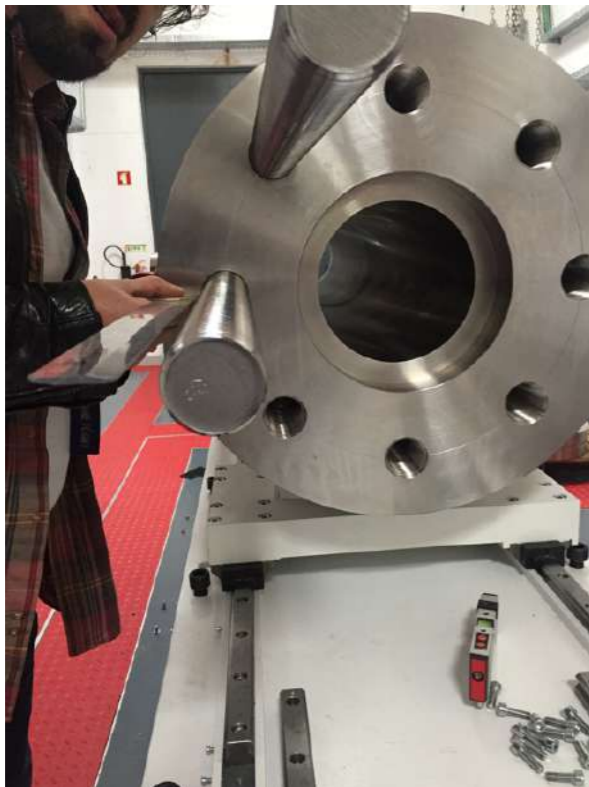
- Sistema de fecho



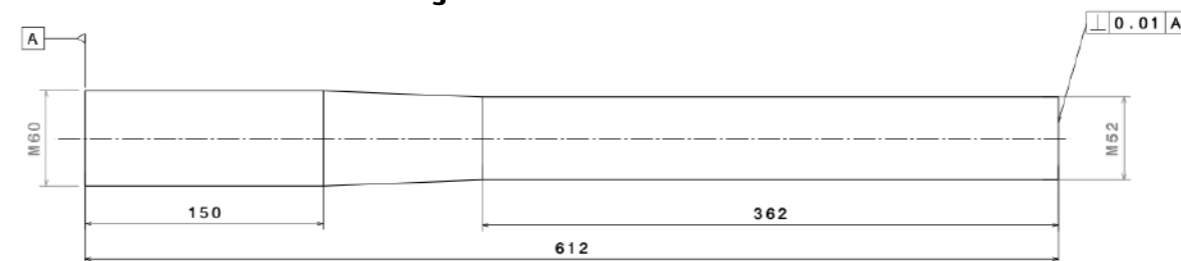
- 8 hidráulicos
- 60 ton / hidráulico



- Problemas no fabrico



## Solução encontrada:

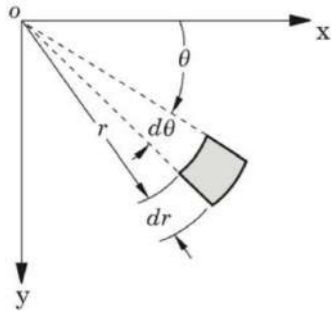


Front view  
Scale: 1:2

**Erro de fabrico**



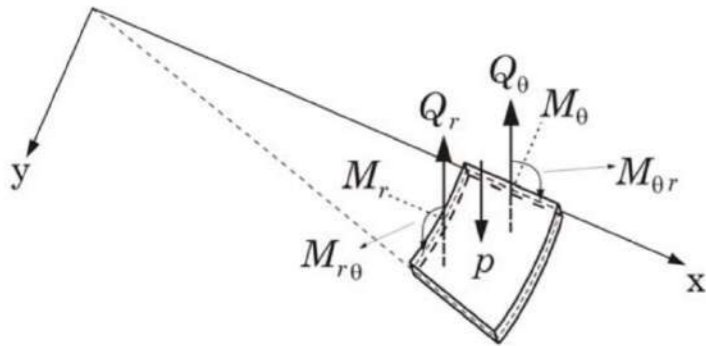
# Projeto estático da câmara



$$\sigma_{t \max} = p \cdot \frac{(r_0^2 + r_i^2)}{(r_0^2 - r_i^2)}$$

$$\sigma_{r \max} = -p$$

$$\sigma_{l \max} = p \cdot \frac{r_i^2}{(r_0^2 - r_i^2)}$$

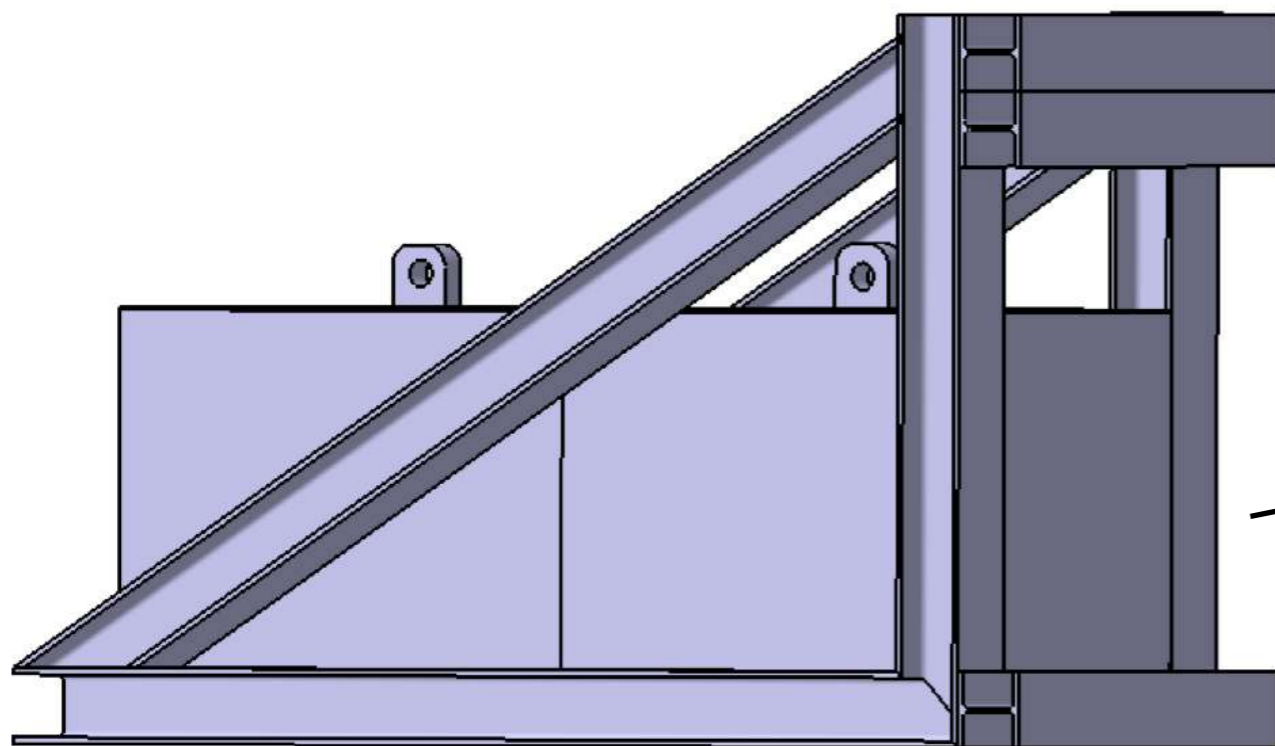


$$\sigma_t = \sigma_1 ; \sigma_l = \sigma_2 ; \sigma_r = \sigma_3$$

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}} \leq \frac{S_y}{n}$$

$$r_0 \geq r_i \sqrt{\frac{S_y}{S_y - \sqrt{3}n \cdot p}} \rightarrow r_0 \geq 130 \text{ mm}$$

# Estrutura inercial de impacto



**Em caso de falha - impulso 3000Ns**

Se existir uma falha catastrófica durante a abertura do diafragma o escoamento do gás induz um impulso contrário da câmara de combustão no caso dos hidráulicos falharem

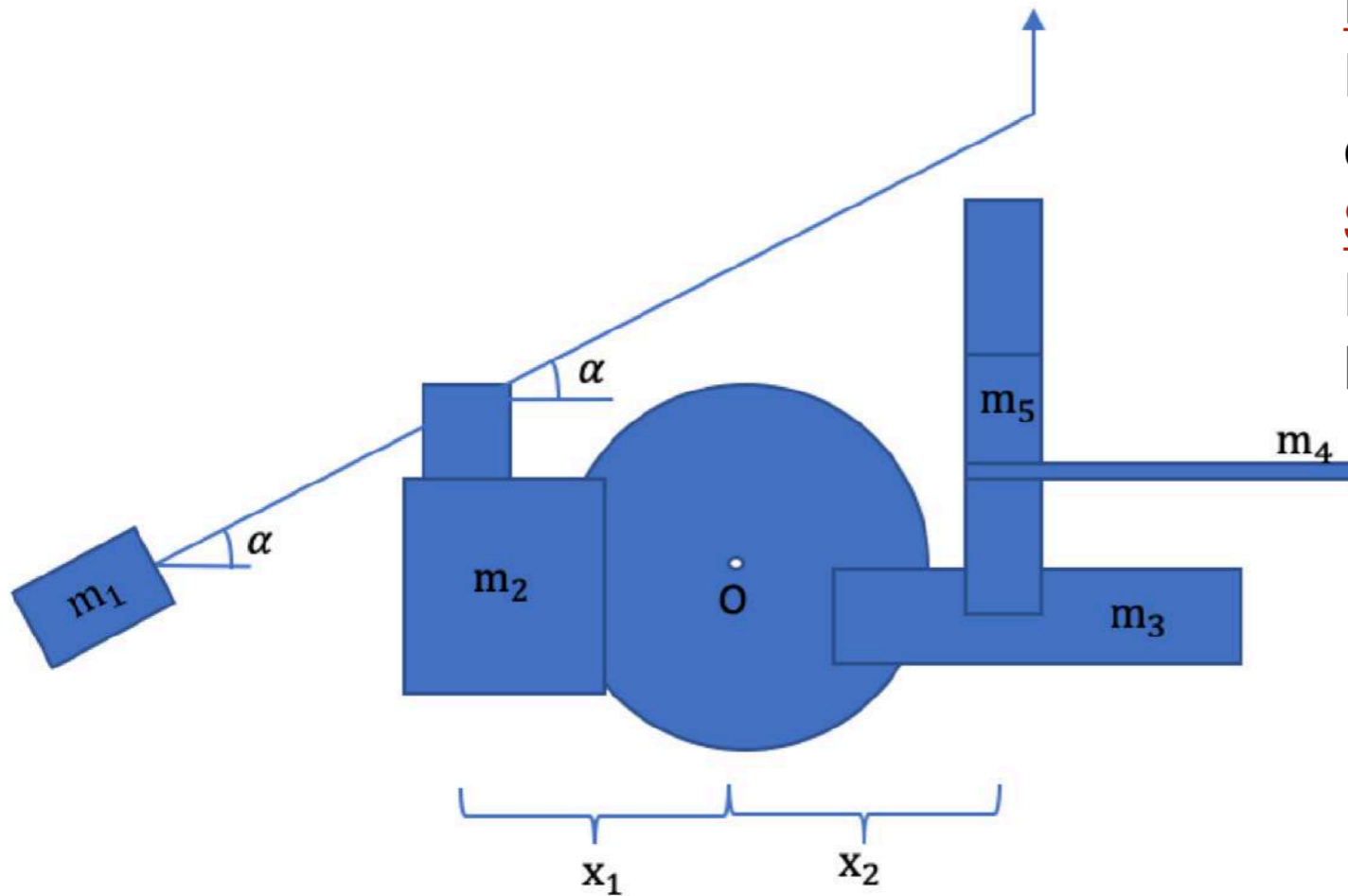
# Mecanismo de suspensão da bomba de vácuo

## Problema:

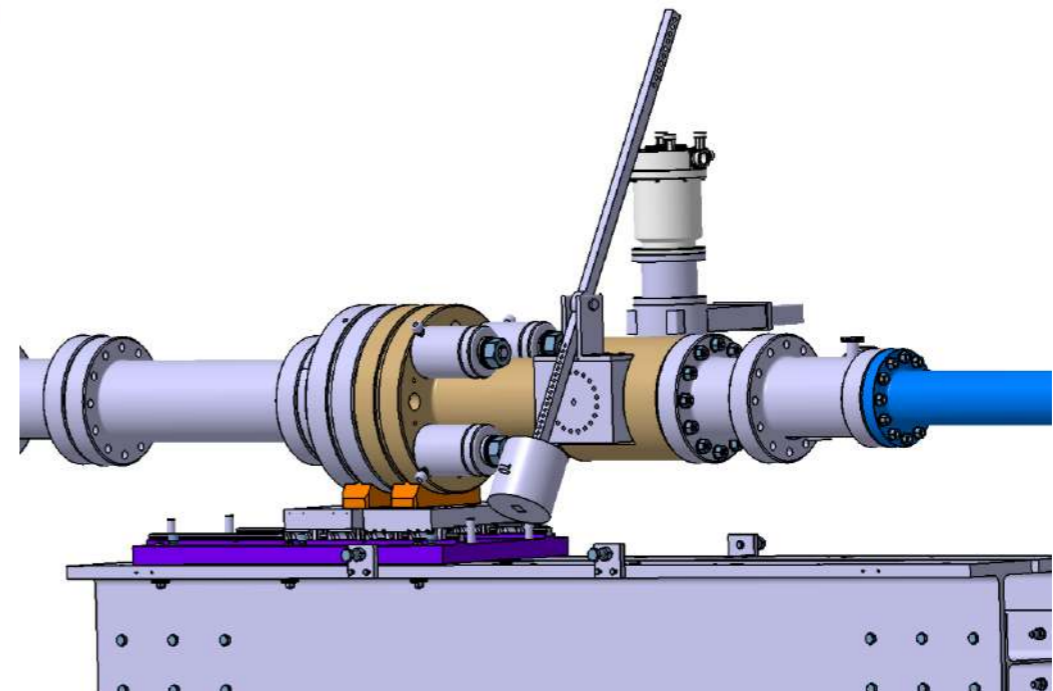
Falta de espaço livre para colocar a bomba de vácuo em posição normal

## Solução:

Posição invertida com mecanismo de balança a segurar

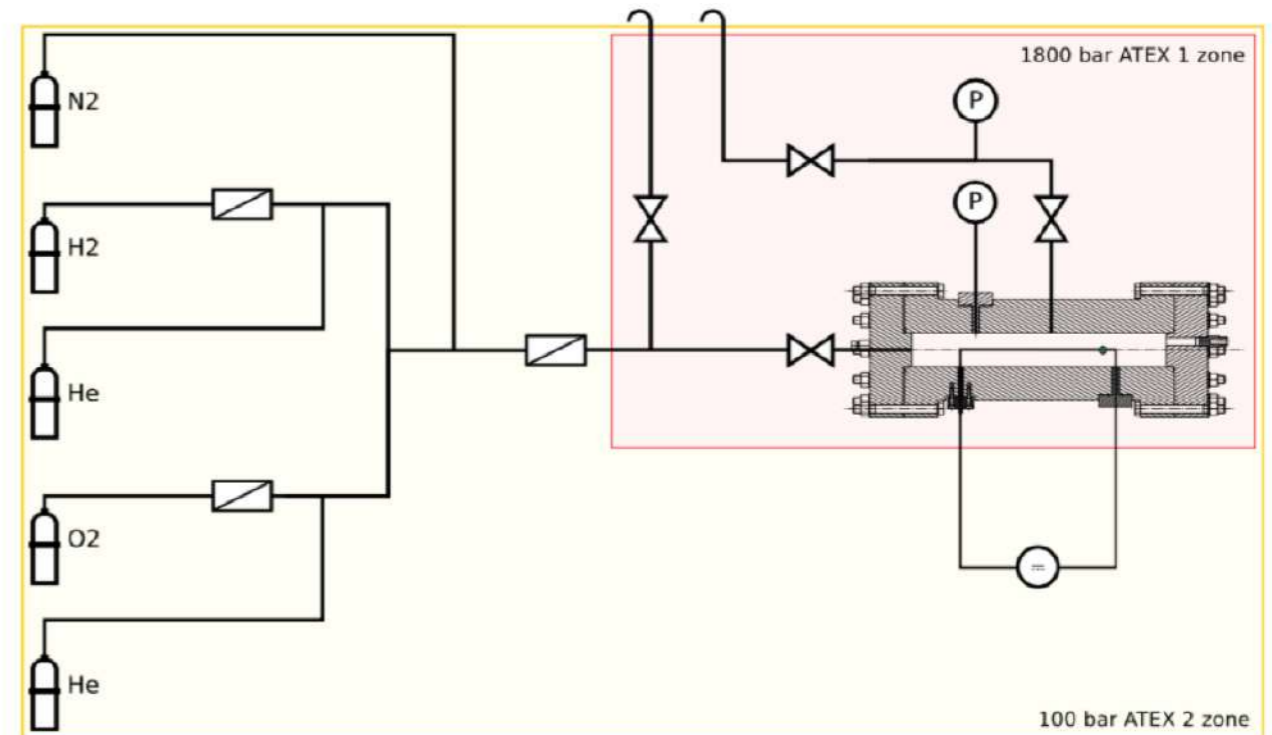
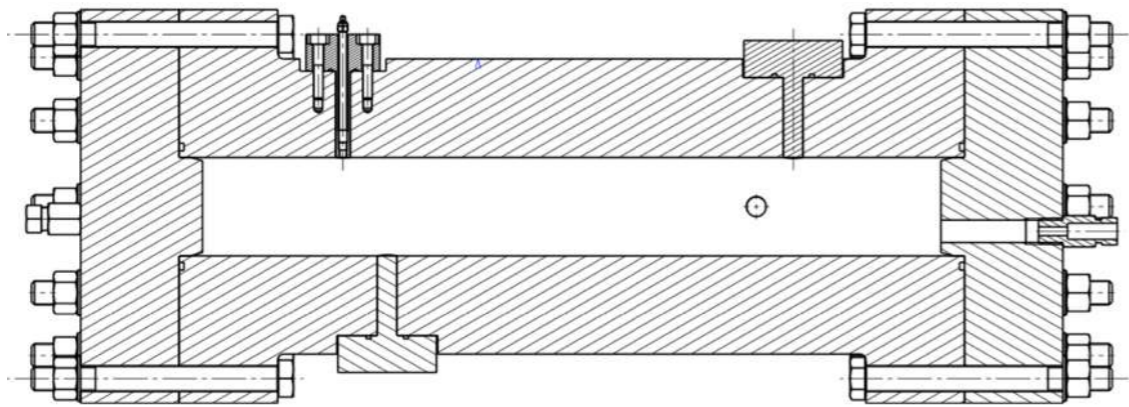


$m_2=66$  kg



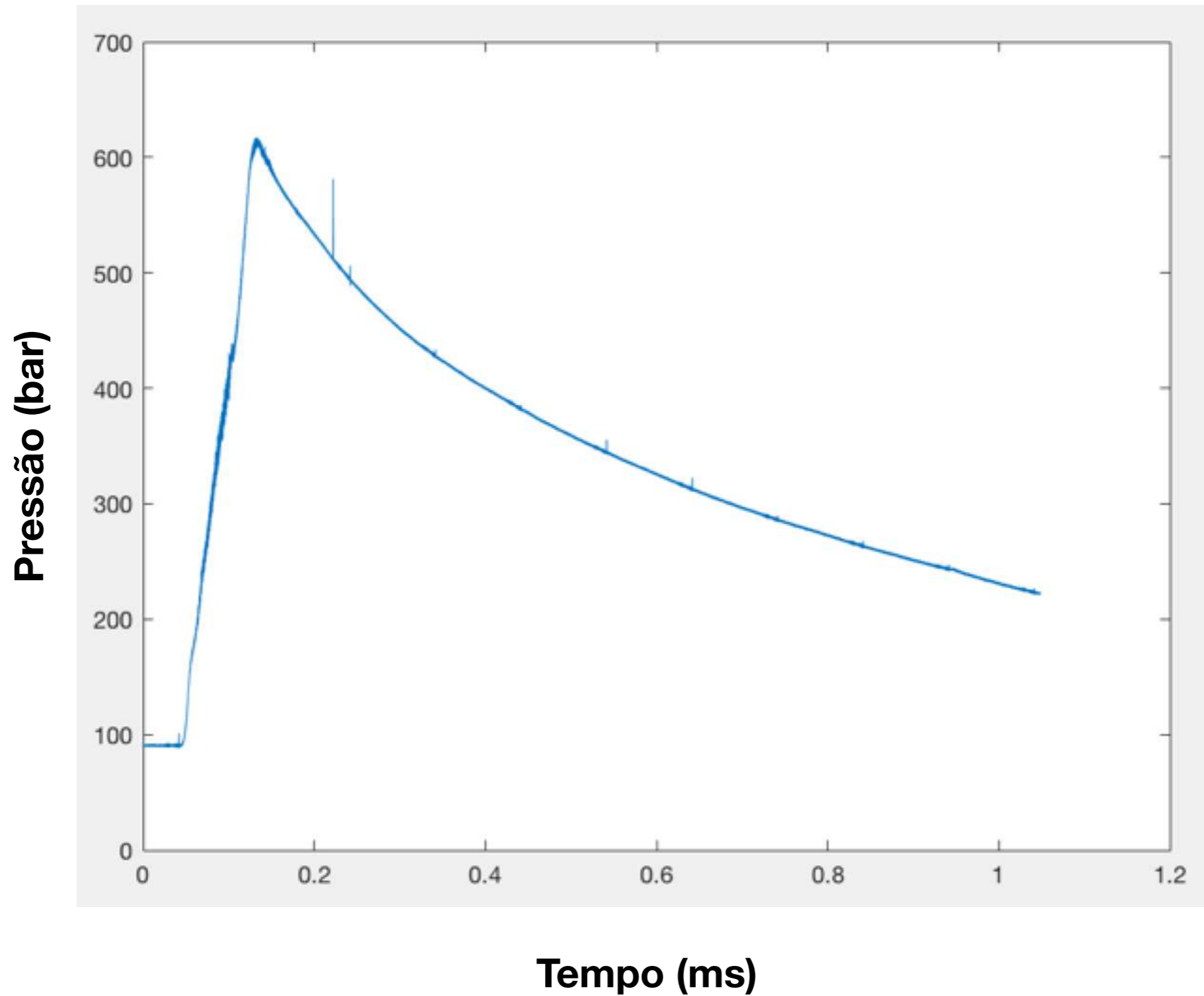
# **Procedimento de modelação da abertura dos diafragmas**

# Obtenção do perfil de pressão no interior da câmara



Entre 2016 e 2017 foi testado um protótipo à escala que validou o conceito de combustão a muito altas pressões — —-> obtenção de perfis de pressão de combustão representativos

# Perfil Pressão vs Tempo



# Inferição do perfil de temperatura no interior da câmara

A mistura é considerada um fluido super crítico

A fase dominante dadas as condições de serviço é a fase gasosa



Gás superfluido

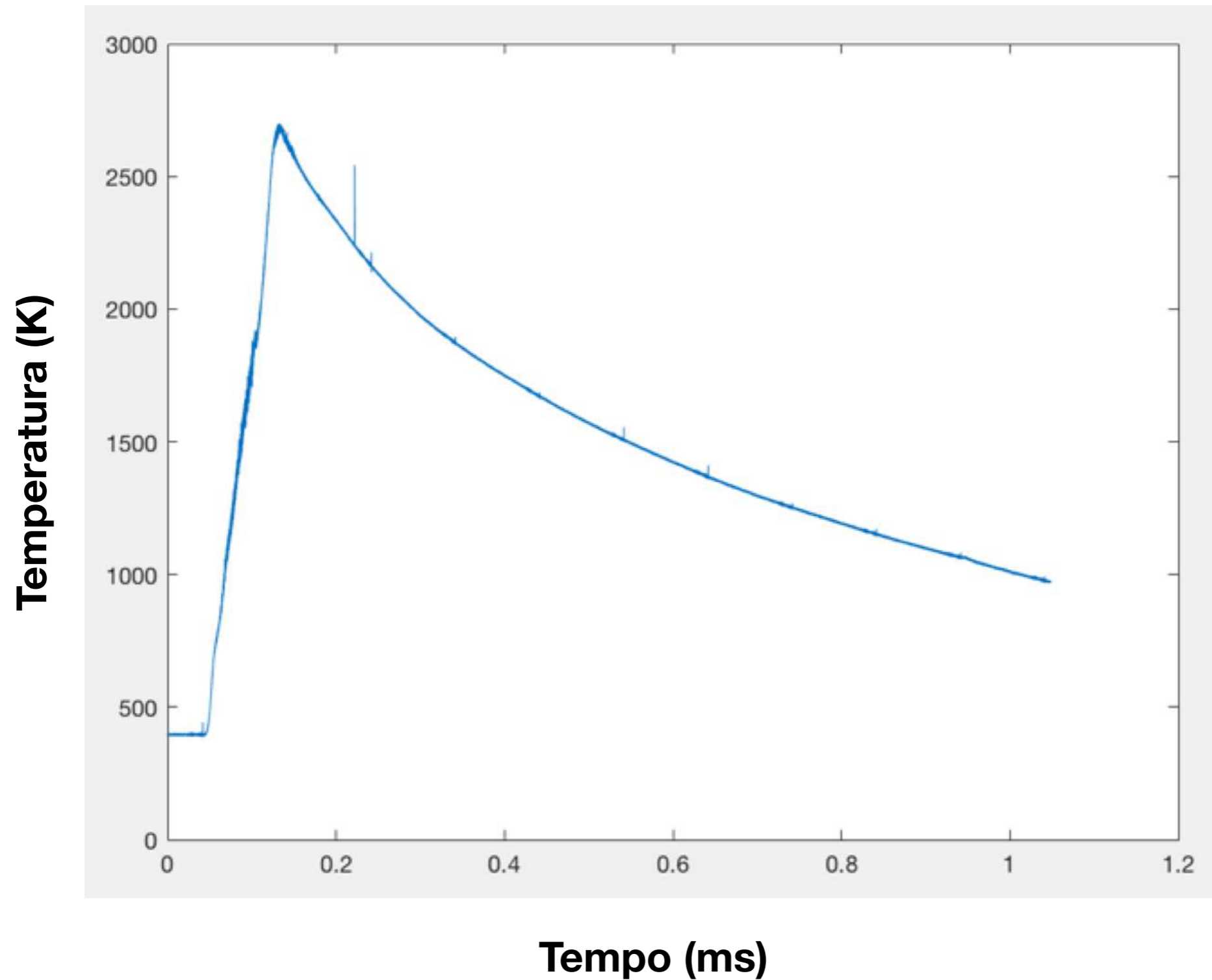
A Lei dos Gases perfeitos é válida  $PV=nRT$

$$T(t)=K*p(t)$$

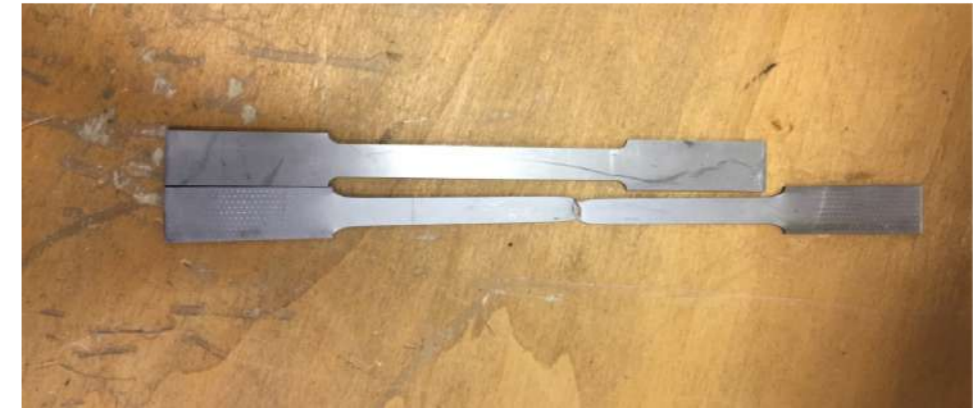
$$K = \frac{T_{\max}}{P_{\max}} = \frac{2800}{640}$$



# Perfil Temperatura vs Tempo



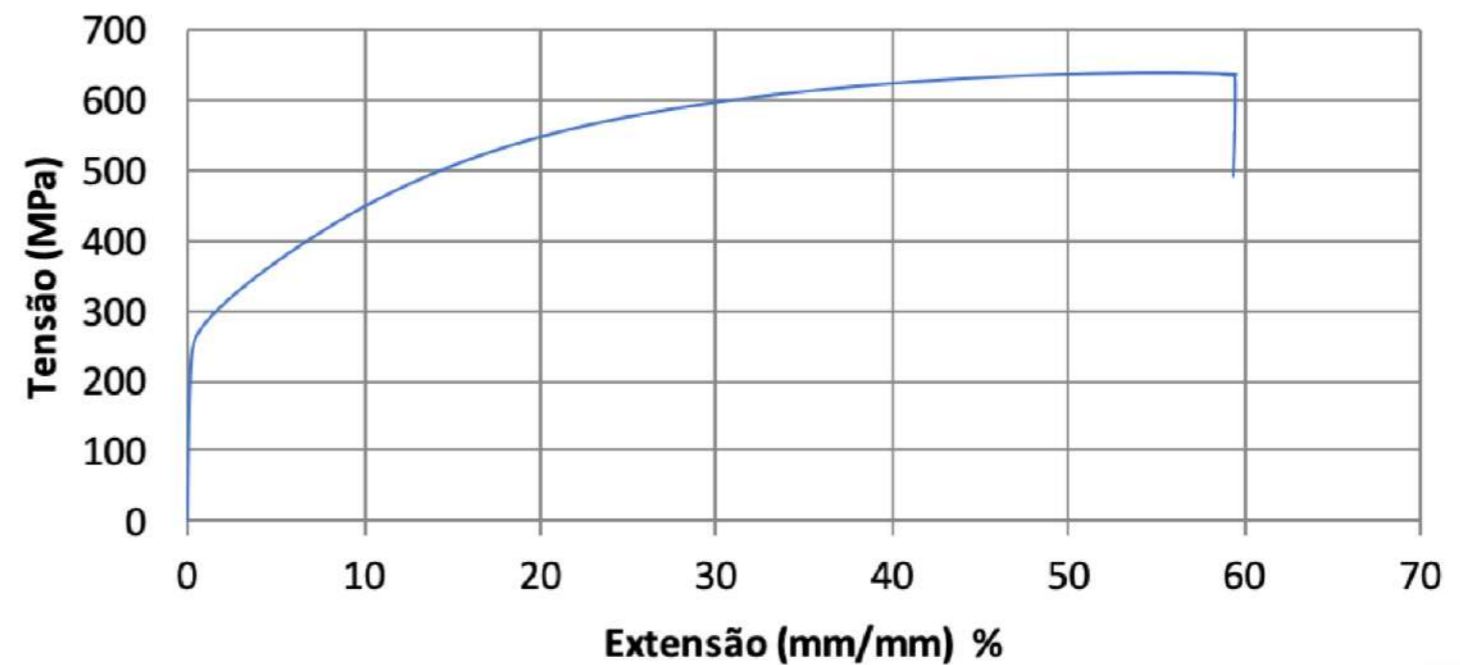
# Caracterização do material



Propriedade	E (GPa)	$\sigma_y$ (MPa)	UTS (MPa)	$\epsilon_{max}$
Valor	161,4	255,4	645,7	0,54748



## Tensão-Extensão AISI 304L

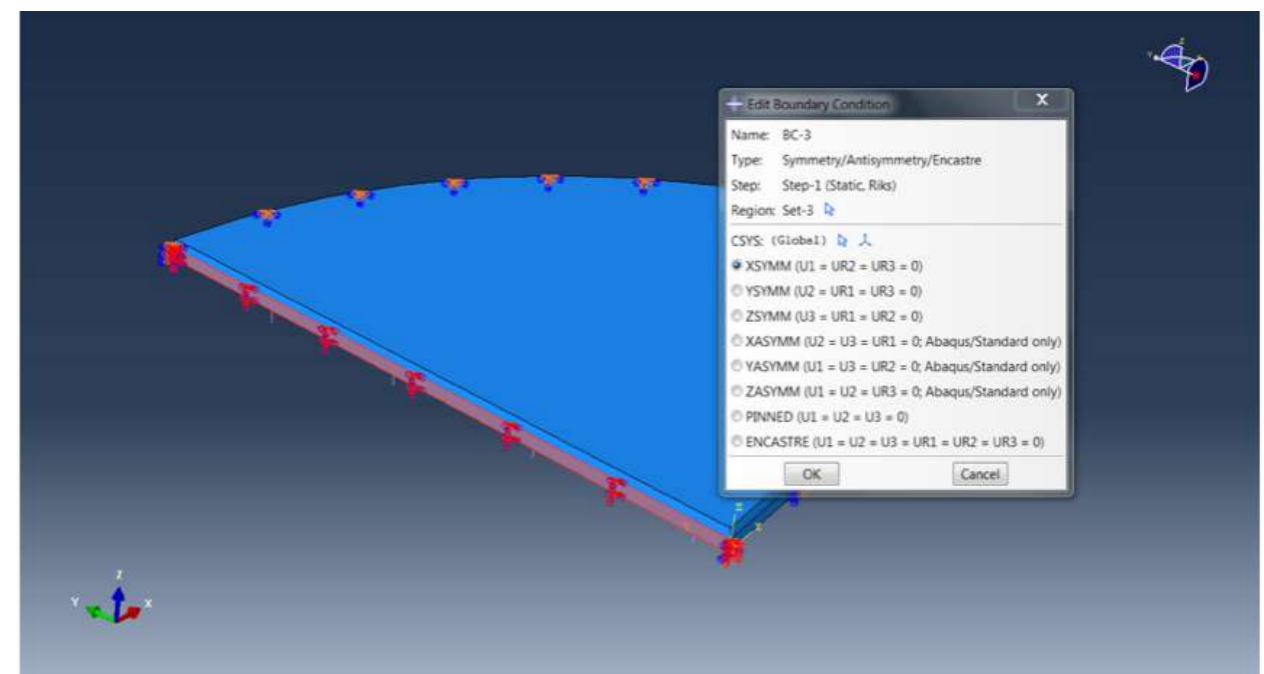
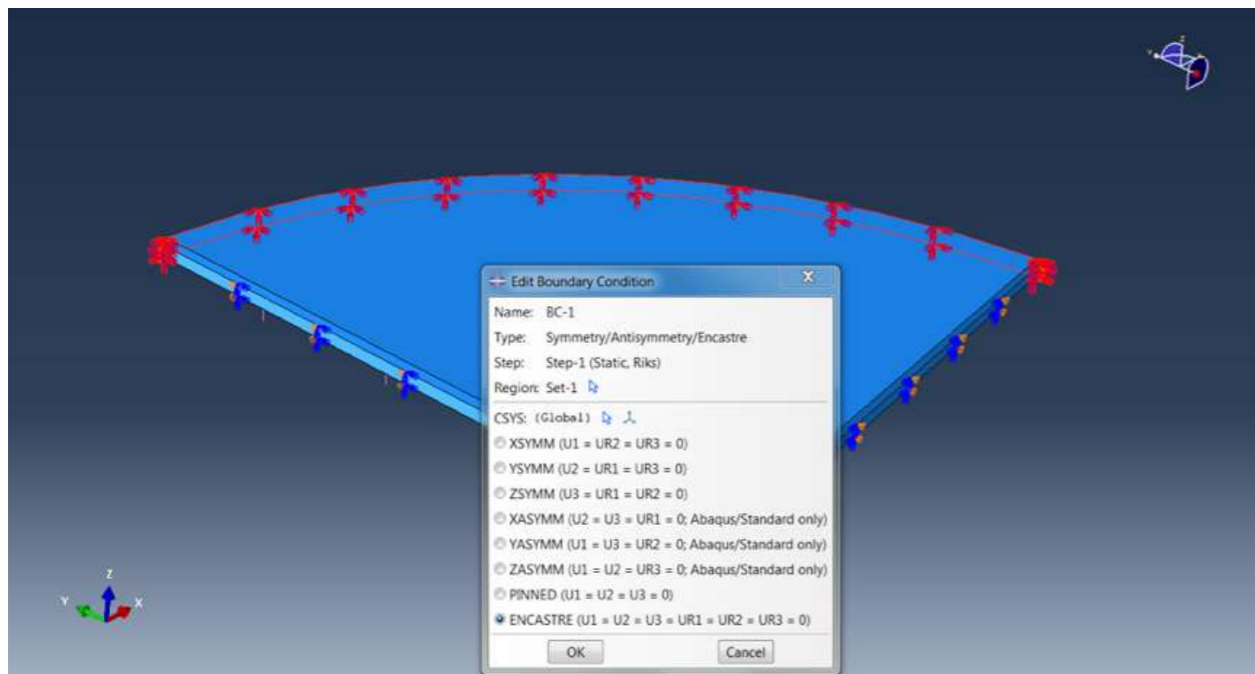


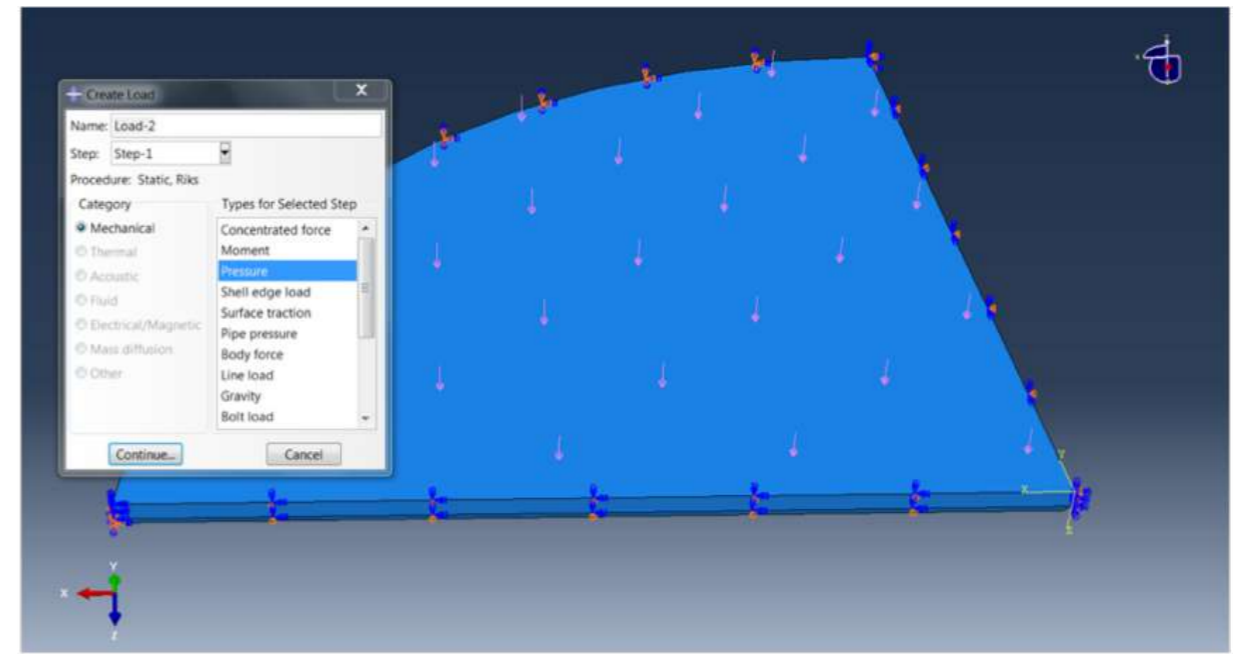
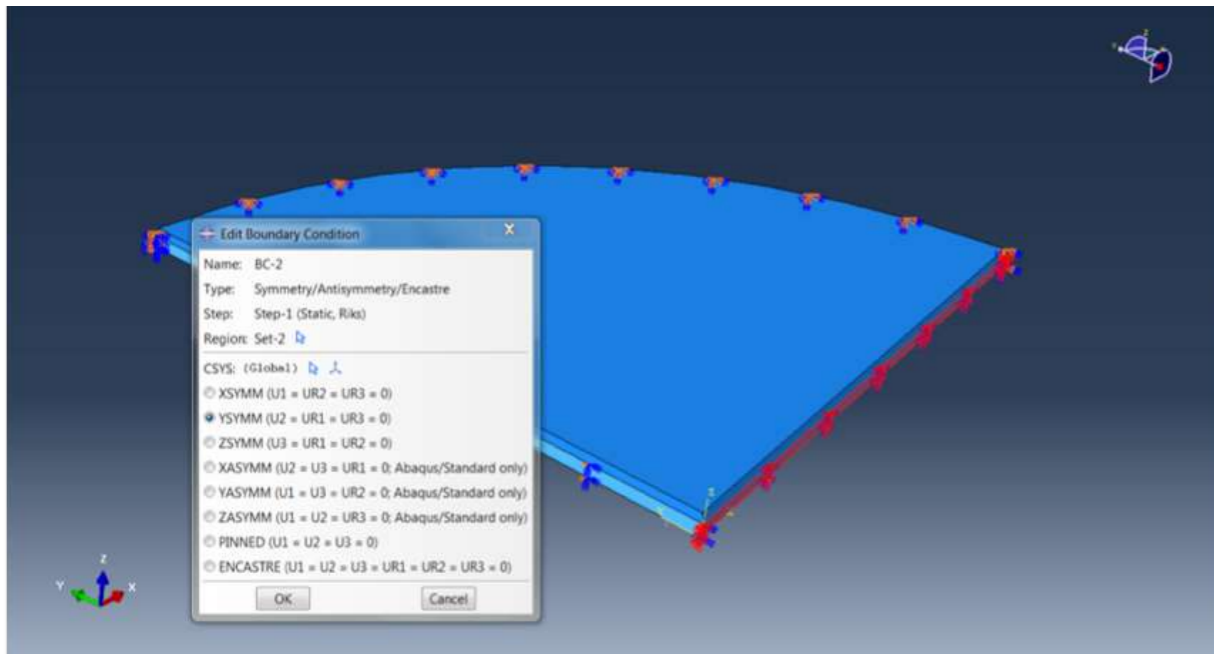
# Análise pelo MEF para obtenção dos parâmetros do diafragma

Determinação da espessura

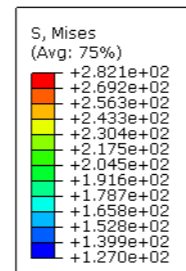
Software ABAQUS - Análise estática

Condições de Fronteira impostas:

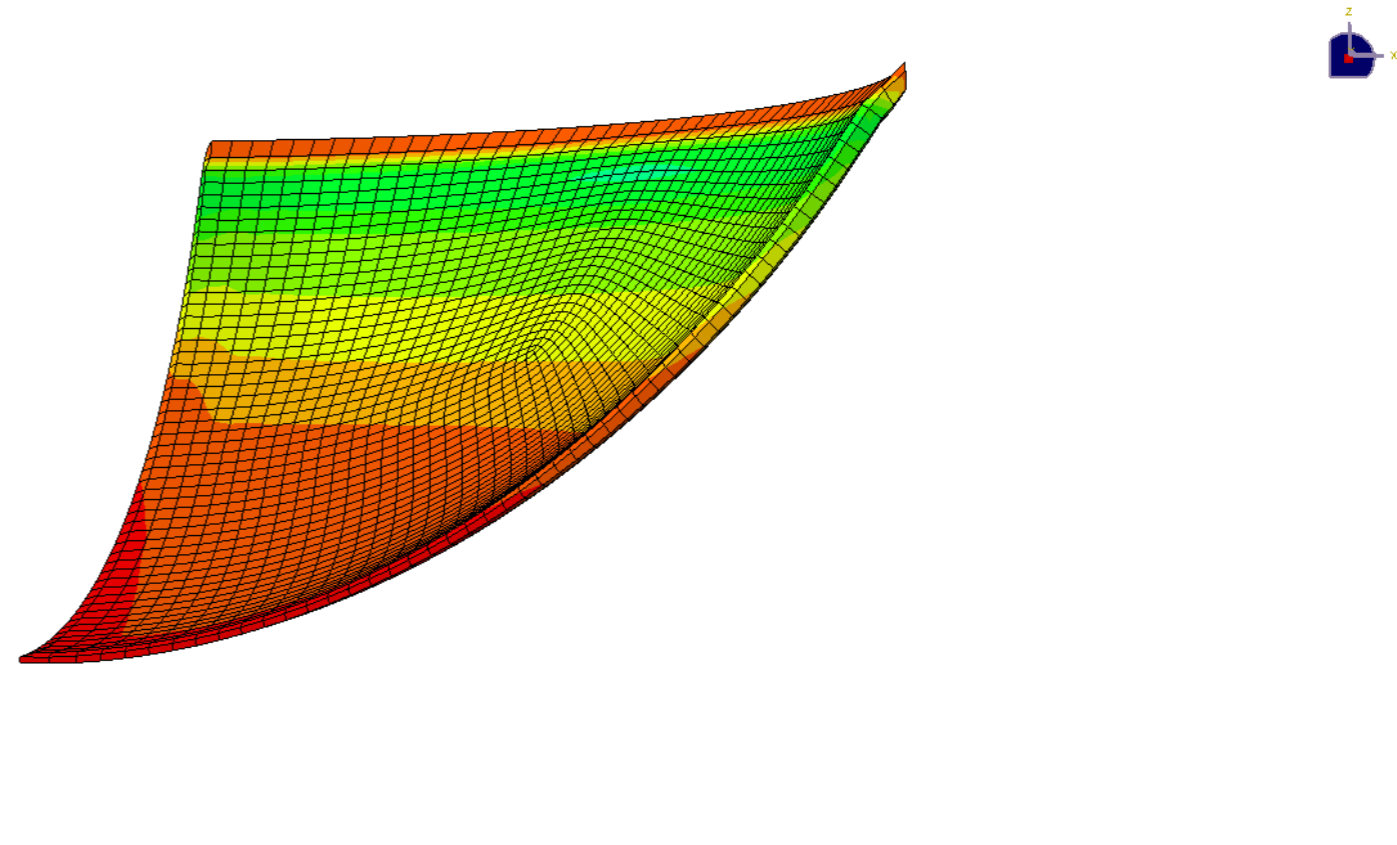




## Resultados da Simulação:

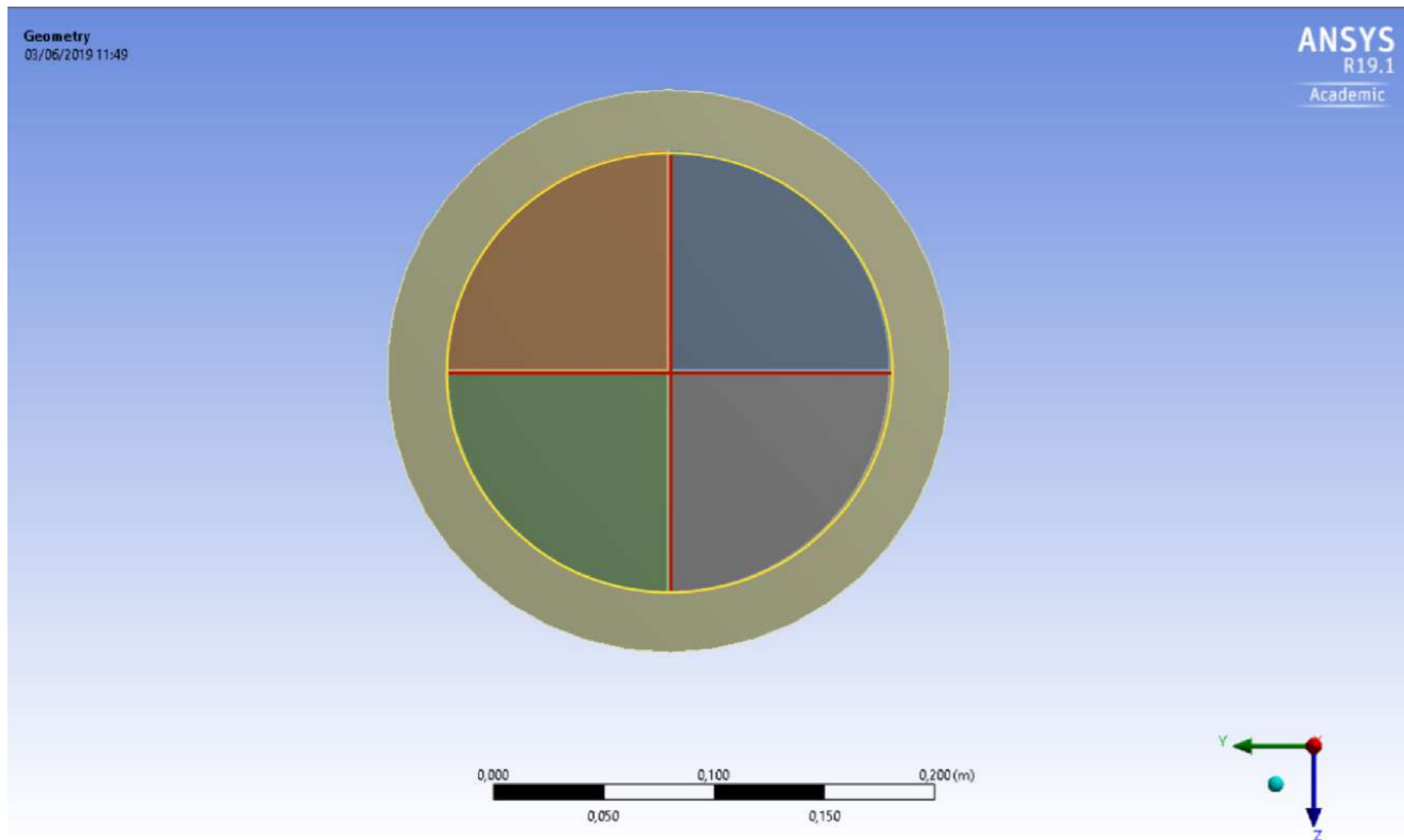


**Validou-se a espessura de 3 mm**



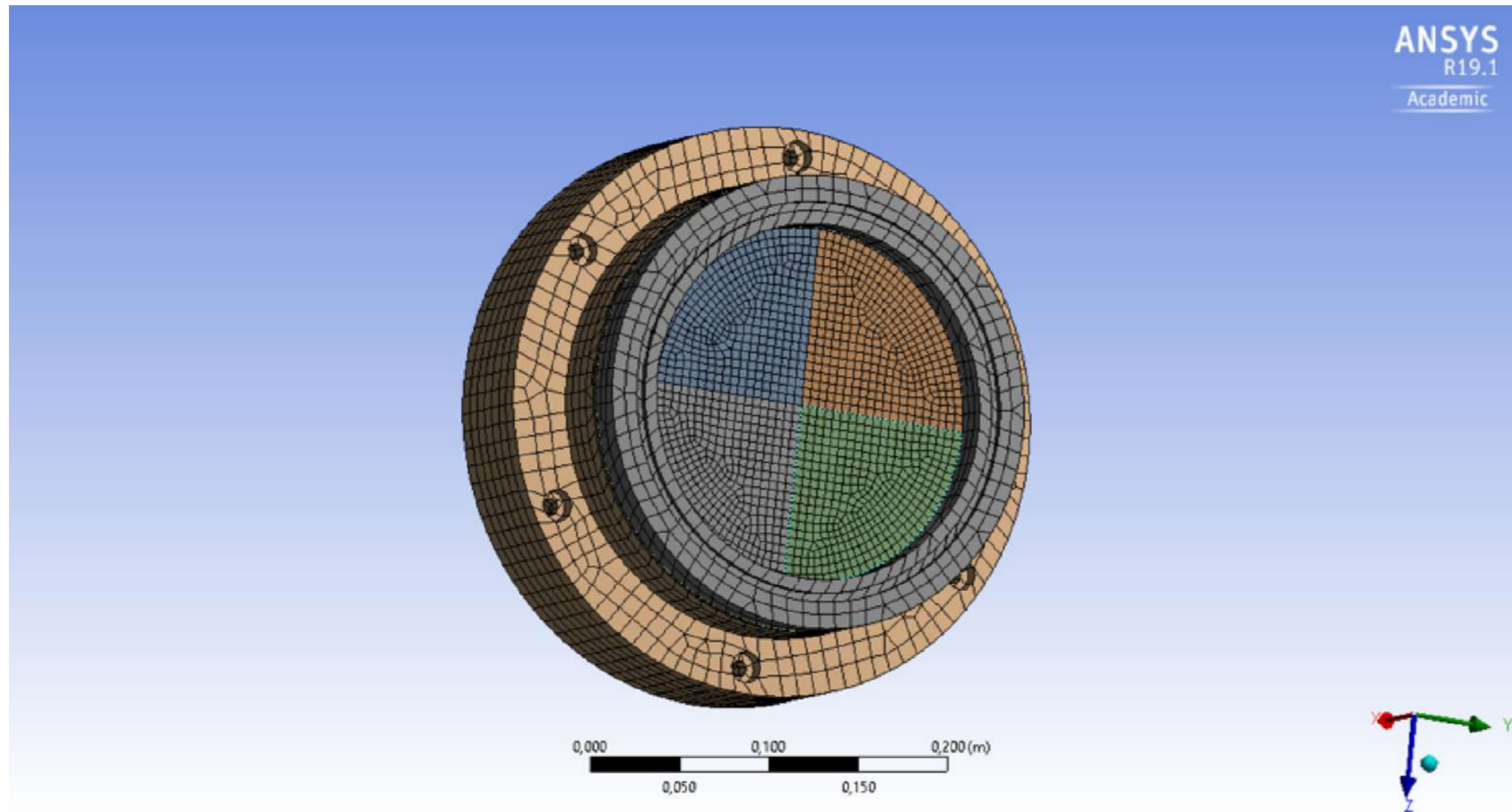
# Análise pelo MEF para obtenção dos parâmetros do diafragma

**Determinação dos parâmetros do entalhe**    Software ANSYS - Análise Transiente estrutural



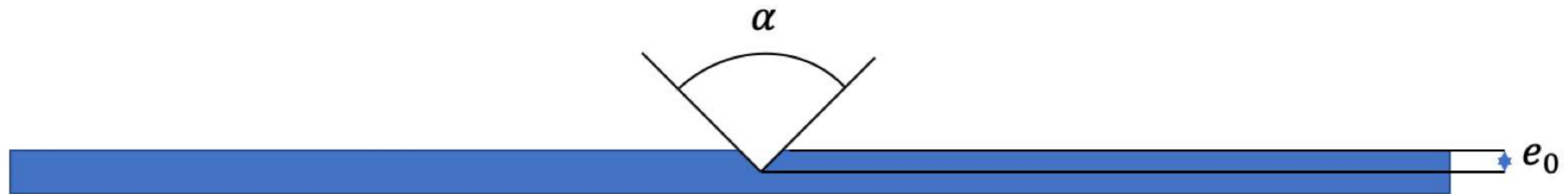
**Vermelho:** rough  
**Amarelo:** bonded

# Análise pelo MEF para obtenção dos parâmetros do diafragma



**Método hexagonal dominante**

# Entalhe



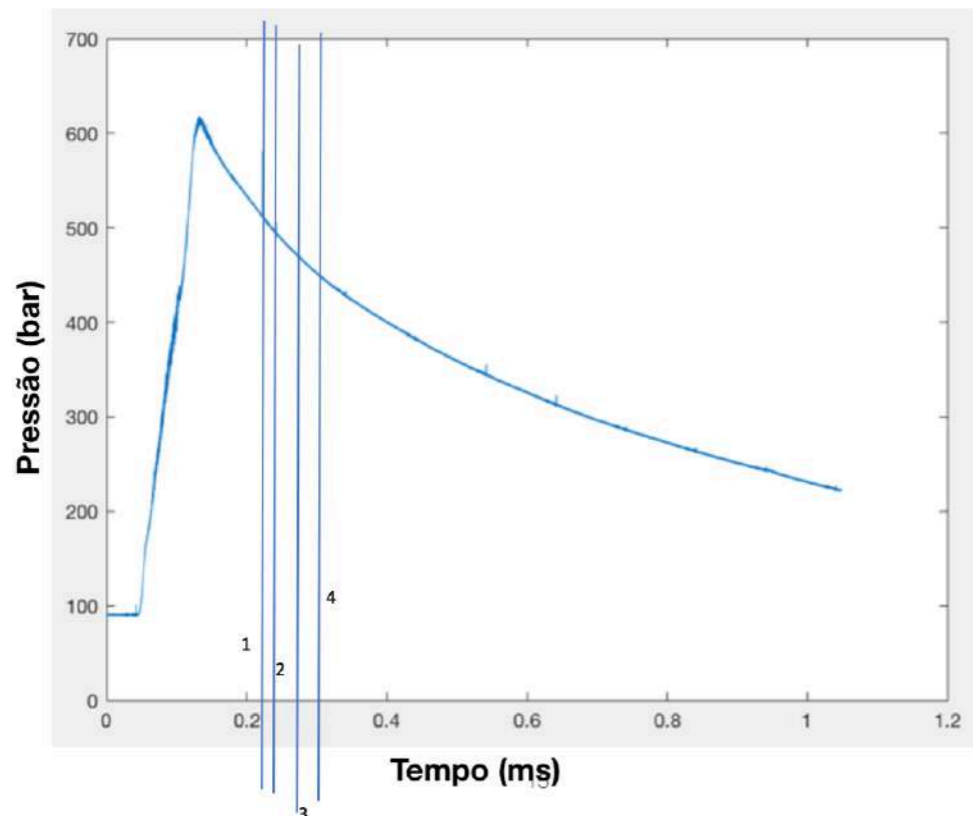
Ângulo $\alpha$ (°)	Profundidade $e_0$ (mm)
45	1
60	1
60	0.5
90	1

**Cenários de simulação considerados**

# Análise pelo MEF para obtenção dos parâmetros do diafragma

Resultados das diferentes simulações obtidos:

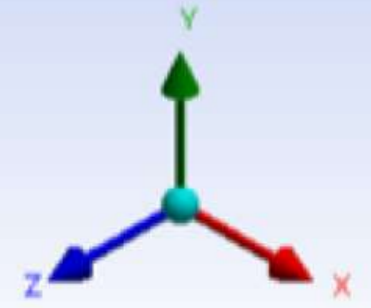
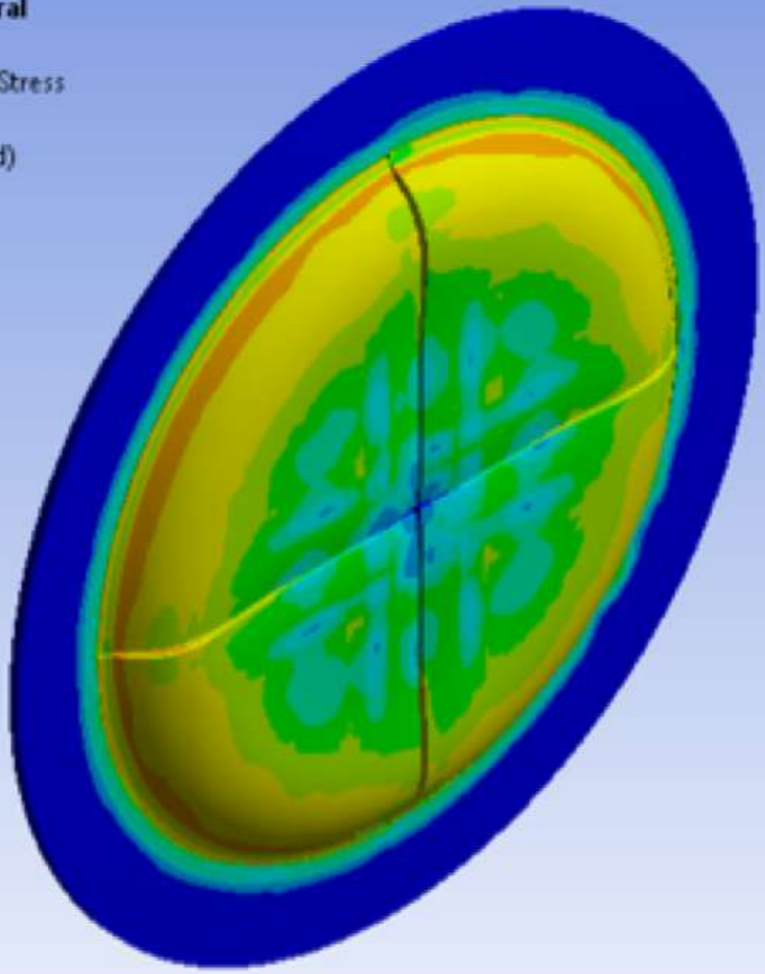
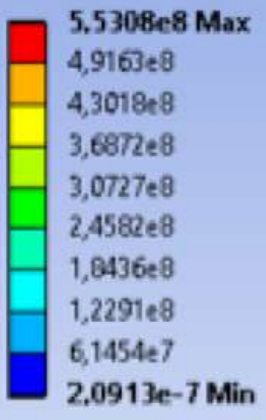
Ângulo $\alpha$ (°)	Profundidade $e_0$ (mm)	Tempo de abertura (s)
45	1	$2,16 \cdot 10^{-4}$
60	1	$1,24 \cdot 10^{-4}$
60	0.5	$1,61 \cdot 10^{-4}$
90	1	$2,04 \cdot 10^{-4}$



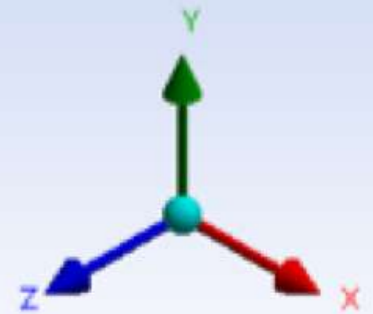
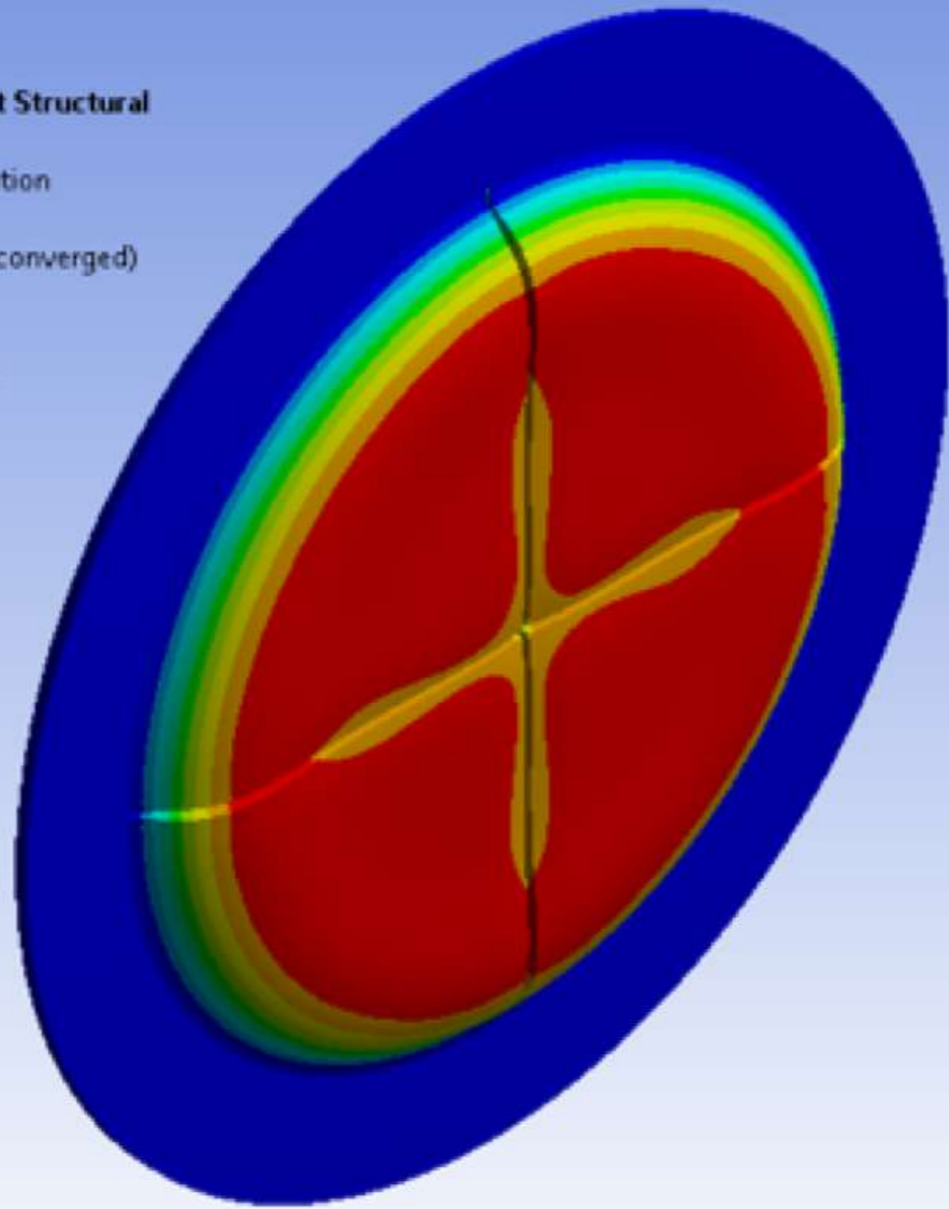
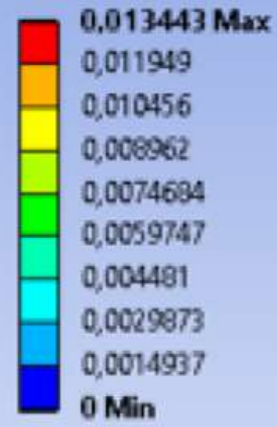
- 1)  $t_{580} + 1,24 \cdot 10^{-4}$
- 2)  $t_{580} + 1,61 \cdot 10^{-4}$
- 3)  $t_{580} + 2,04 \cdot 10^{-4}$
- 4)  $t_{580} + 2,16 \cdot 10^{-4}$



**B: Copy of Transient Structural**  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: Pa  
Time: 1,05e-003 (Unconverged)  
07/06/2019 15:48



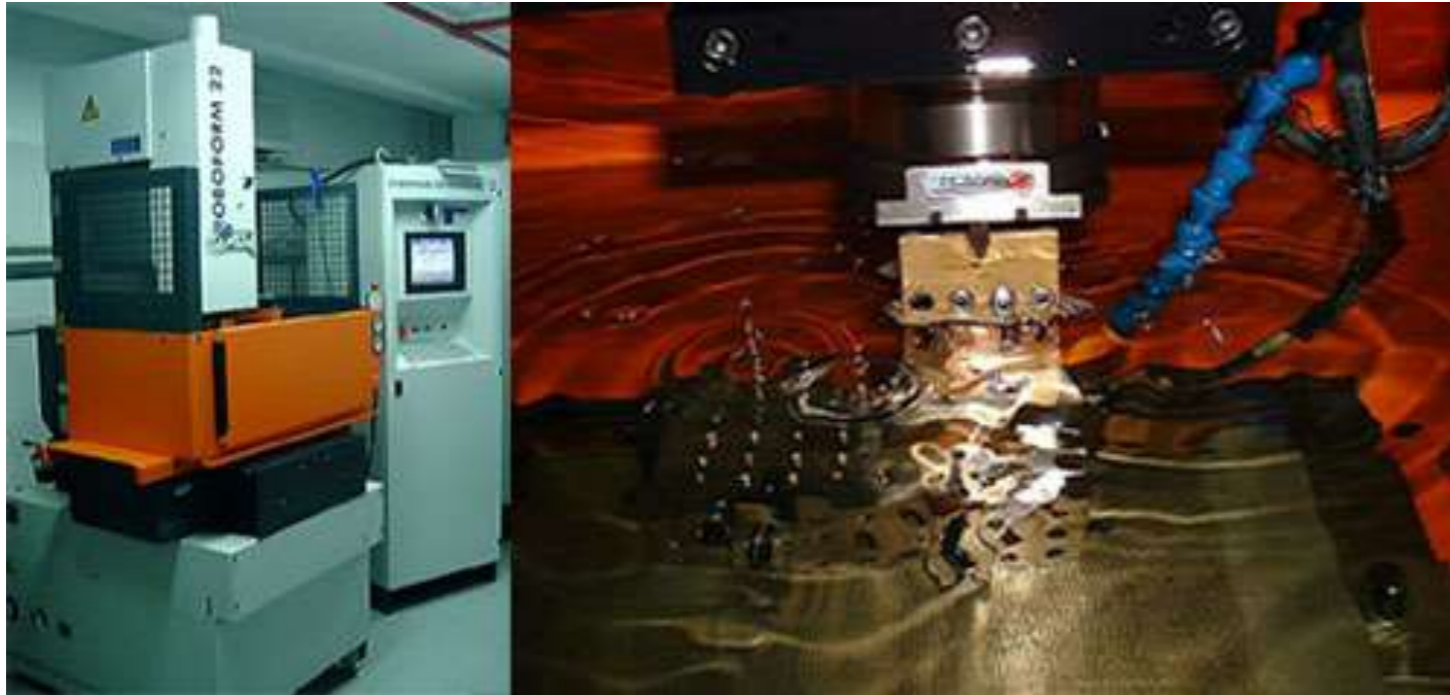
**B: Copy of Transient Structural**  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: m  
Time: 1,05e-003 (Unconverged)  
07/06/2019 15:50



# Processo e método de fabrico

## Processo selecionado:

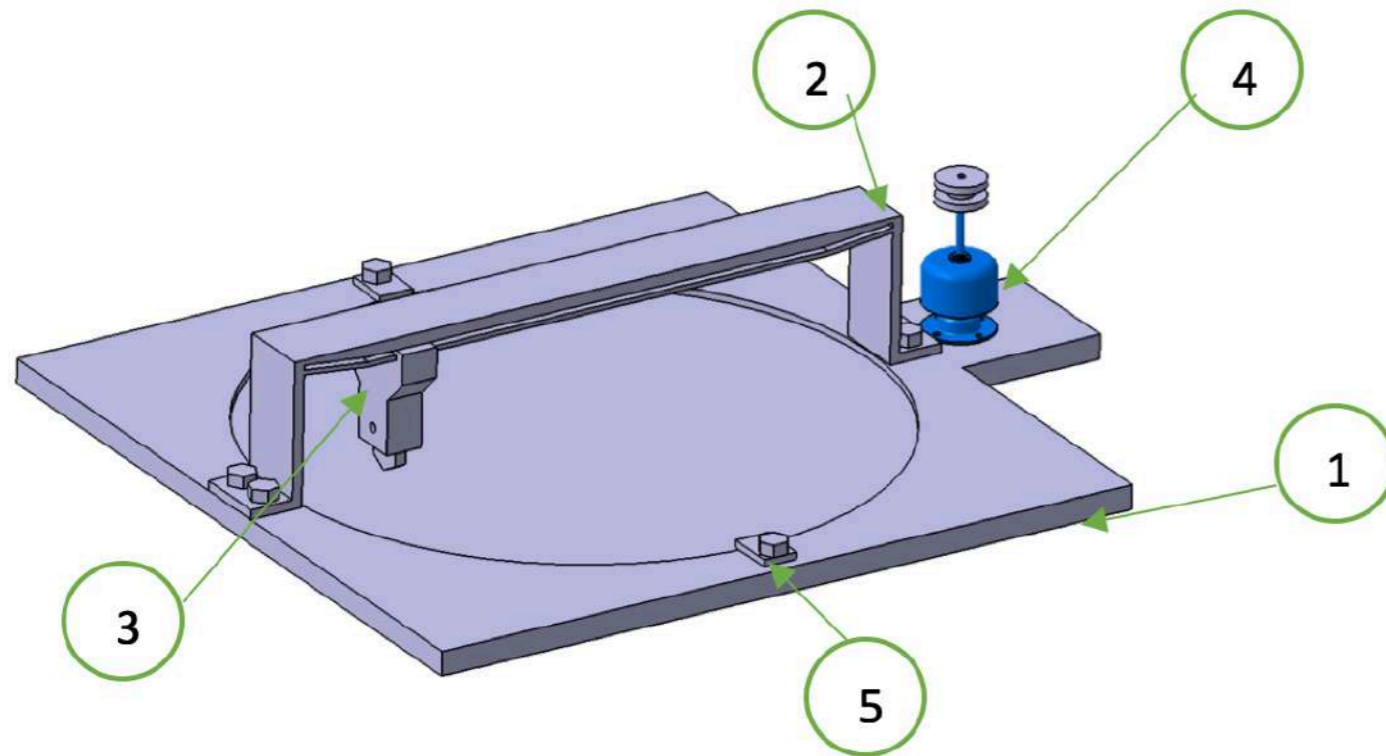
Electro-Erosão por penetração em polaridade direta



Processo inviável

100-200 diafragmas por trimestre

## Solução Proposta:



- 1) Placa
- 2) Calha
- 3) Indentador
- 4) Motor
- 5) Fixadores

**A solução proposta torna-se inviável também porque apresenta baixa precisão**

**Processo adotado:** maquinação por arranque de aparamento recorrendo a uma CNC

# Conclusões

Esta dissertação resulta da oportunidade única de ter participado numa investigação com a dimensão do ESTHER.

Com este trabalho consegui enriquecer todo o meu conhecimento enquanto engenheiro e com o próprio contexto industrial lidando com problemas concretos que exigiram destreza a solucioná-los.

Todos os objectivos da tese foram cumpridos, e muitos dos componentes projetados foram fabricados até ao momento.

# Trabalhos futuros

- Programação da máquina de CNC / selecção das pastilhas de corte;
- Analise micro-estrutural;
- Análise da anisotropia do material;
- Análises SEM de diafragmas que tiveram ruptura em condições reais;
- Analise comportamental da ruptura dos diafragmas;
- Estudo de convergência da malha de elementos finitos:

The logo consists of the letters 'FIM' in a bold, blue, sans-serif font, centered within a blue rectangular border that has a slightly distressed or hand-drawn appearance.