

## Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Dimensionamento Preliminar e Seleção de Materiais  
Candidatos para Tubeira de Motor Foguete viam  
Análise de Elementos Finitos

Bolsista: Maria Fernanda de Souza Ferreira

Orientador(a): Daniel Fraga Sias

Período a que se refere o relatório: Dezembro de 2015 a Agosto de 2016

### Resumo

A etapa de iniciação científica encerrada pelo presente relatório consistiu em apresentar uma proposta de projeto para o segundo estágio da tubeira do motor foguete L75, efetuar pesquisa e seleção de materiais candidatos à fabricação da tubeira e realizar simulações térmicas e estruturais para cada material utilizando o software comercial ANSYS Workbench. Devido aos altos gradientes de temperatura e pressão envolvidos no problema, a escolha de materiais e o dimensionamento do componente é um caminho crítico para o projeto. Um *design* preliminar para a tubeira foi proposto comparando dois métodos diferentes. A partir do *design* definido foram realizadas análises térmicas e estruturais pelo método dos elementos finitos para cada material selecionado. Foi observado que a distribuição de temperatura no corpo da tubeira é extremamente elevada para todos os materiais concluindo-se que um sistema de refrigeração deve ser projetado. Devido aos altos níveis de temperatura todos os materiais utilizados apresentaram problemas mecânicos mostrando ser necessário aprimorar o projeto do que diz respeito a espessura da tubeira e levar em conta o efeito do sistema de refrigeração nas condições de contorno. Pode-se concluir assim que, o dimensionamento proposto neste trabalho segue uma linha coerente, mas são necessárias melhorias tanto nas condições de contorno adotadas como na solução mecânica apresentada.

## 1 Introdução

Os motores foguetes podem ser classificados em dois grandes grupos dependendo do dispositivo de aceleração, de acordo com [1] os motores podem ser classificados como: Elétricos ou Térmicos. Estas classes podem ainda ser subdividida como mostra a Figura 1.

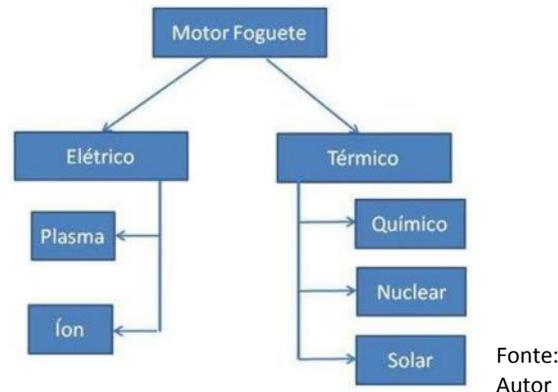


Figura 1: Classificação de motores foguete

O foco deste trabalho está contextualizado na classe de motores térmicos em especial os químicos, nos quais a reação de combustão do propelente normalmente é a combinação de combustível e de oxidante em uma câmara de alta pressão, onde os gases resultantes são aquecidos a elevadas temperaturas para depois serem acelerados e expelidos, através de um bocal convergente/divergente com velocidade supersônica. Este bocal é projetado para que os gases de combustão sejam acelerados gerando empuxo por meio da expansão dos gases. Este bocal tem aplicabilidade em especial na propulsão sólida (MFPS), a propulsão líquida (MFPL) e a propulsão híbrida (MFPH).

Devido a algumas características importantes para o Motor L75 é preciso realizar vários estudos numéricos para garantir a eficiência do motor e assim alcançar os requisitos da missão definida, tais como: empuxo, massa total do motor, impulso específico, comprimento máxima do conjunto motor, máximo diâmetro da secção divergente da tubeira entre outros.

O Motor L75 está sendo projetado pela equipe de especialistas da Divisão de Propulsão Espacial (APE) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) para utilização em estágio superior 3° ou 4° estágio como demonstra a Figura 2. Neste contexto encontramos a necessidade de projetar o segundo estágio da tubeira do Motor L75 o qual deverá ser capaz de resistir essencialmente às cargas térmicas e as pressões obtidas pelo escoamento dos gases de combustão do par propelente.



Fonte:  
Programa  
Cruzeiro  
do Sul  
Wikipedia

Figura 2: Ilustração dos possíveis estágios onde o L75 pode ser inserido

Em propulsão sólida (MFPS) é comum encontrar tubeiras com seção divergente tipo cônica [2], porém também é possível encontrar a utilização de tubeiras parabólicas dependendo da razão de expansão desejada.

Em propulsão líquida (MFPL) tubeiras cônicas não são eficientes, pois em geral desejam-se altos níveis de empuxo, utilizando câmara de combustão com altos níveis de pressão e rápida expansão aos gases de combustão, como mostra a Figura 3.

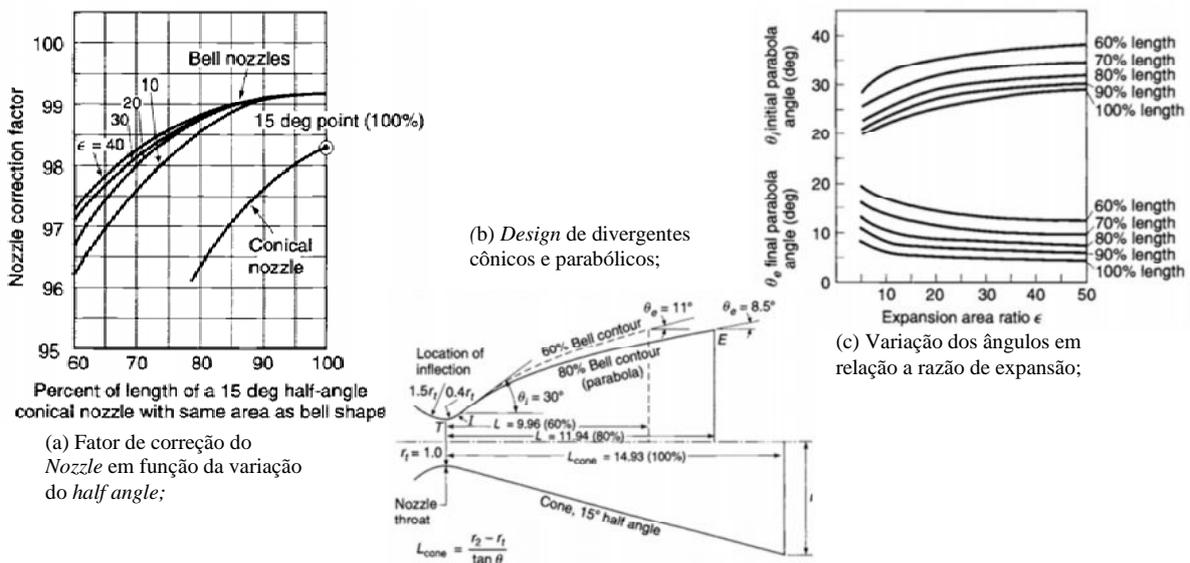


Figura 3: Design de tubeiras [2]

Desta forma, este trabalho visa apresentar uma metodologia para dimensionamento de tubeiras de MFPL e apresentar alguns materiais candidatos para fabricação da tubeira do Motor L75 no contexto do projeto “Dimensionamento Preliminar e Seleção de Materiais Candidatos para Tubeira de Motor Foguete via Análise de Elementos Finitos”, apoiado pelo CNPq. Atualmente o projeto conta com um design preliminar para o segundo estágio da tubeira. Este design foi obtido pelo método das características que

determina o perfil ótimo de acordo com a expansão dos gases de combustão desejada [1-2]. Existem outros métodos de cálculo de perfil de tubeiras o quais são definidos por meio de curvas parabólicas ou senoidais [3]. Porém, em todos ambos os métodos não são avaliadas questões estruturais. Sendo assim, o presente trabalho visa avaliar pelo método dos elementos finitos, as dimensões estruturais (espessura) e o desempenho termo estrutural considerando dois tipos de materiais de fabricação.

## 2 Material e métodos

### 2.1 Dimensionamento de Tubeiras

O dimensionamento de tubeiras de motores foguete depende diretamente da missão que o motor deverá cumprir. De acordo com a missão, é definido o estágio do motor, a tecnologia que será utilizada e parâmetros característicos básicos de seu funcionamento. Dentre estes parâmetros podemos citar: pressão de câmara, temperatura de câmara, velocidade de ejeção dos gases de combustão, vazão mássica dos gases, área da seção crítica (garganta), empuxo e impulso específico.

### 2.2 Parâmetros de desempenho

O empuxo ( $F$ ) produzido por um sistema propulsivo é caracterizado pela ejeção de gases de combustão, a certa velocidade relativa. No caso em que a pressão do fluido na seção de saída do divergente for diferente da pressão atmosférica, deve-se considerar uma perda representada na equação:

$$F = \dot{m}u_e + (p_e - p_{atm})A_e \quad (2.1)$$

onde  $u_e$  é a velocidade de saída dos gases,  $p_e$  e  $p_{atm}$  são, respectivamente, pressão dos gases na seção de saída do divergente, e pressão atmosférica e  $A_e$  a área da seção de saída dos gases. Podendo esta ser simplificada para o caso de tubeira adaptada,  $p_e$  igual  $p_{atm}$ .

$$F = \dot{m}u_e \quad (2.2)$$

Os coeficientes que caracterizam um motor foguete são o coeficiente de empuxo, a velocidade característica, o impulso específico, o coeficiente de fluxo e o rendimento da combustão. O coeficiente de empuxo,  $C_F$ , e o impulso específico,  $I_{sp}$ , são definidos como segue:

$$C_F = \frac{F}{P_c A_t}; \quad I_{sp} = \frac{F}{\dot{m} g_0} \quad (2.3)$$

onde  $g_0$  a aceleração da gravidade num dado instante de tempo  $t$ .

Para a comparação do desempenho relativo a diferentes sistemas de propulsão, utiliza-se a velocidade característica  $c^*$ , definida por:

$$c^* = \frac{P_c A_t}{\dot{m}} \quad (2.4)$$

### 2.2.1 Método da Aproximação Parabólica

Esta formulação foi desenvolvida por [3] onde descreve matematicamente o *design* de tubeias utilizando parábolas. A eq. (2.5) define a parábola que descreve o contorno da tubeira.

$$y(r) = ar^2 + br + c; \quad \frac{dy}{dr} = 2ar + b \quad (2.5)$$

Definindo as condições de contorno,

$$\begin{aligned} y(r_e) = L_t; \quad \left( \frac{dy}{dr} \right)_{r=r_e} &= \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta_e\right) \quad \text{onde } r_e = r_t \sqrt{\varepsilon} \\ y(r_n) = k r_t \sin(\theta_e); \quad \left( \frac{dy}{dr} \right)_{r=r_n} &= \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta_i\right) \quad \text{onde } r_n = r_t (1 + k - k \cos(\theta_i)) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Para o L75 temos os seguintes parâmetros  $r_t = 45,4\text{mm}$ ;  $k = 1.3$ ;  $\varepsilon = 147,0$ ;  $\theta_i = 40^\circ$ ;  $L_t = 1343.9\text{mm}$ . Então obtemos  $r_e = 550,44$ ;  $r_n = 59,24$ .

Logo, a eq. (2.7) descreve a tubeira do L75 pelo método da aproximação parabólica e o ângulo de saída da tubeira ( $\theta_e$ ) é obtido por consequência (2.8).

$$y(r) = 0,00298608 r^2 + 0,837917 r - 22,0802 \quad (2.7)$$

$$\cot(\theta_e) = 2ar_e + b; \quad \theta_e = \tan^{-1}\left(\frac{1}{2ar_e + b}\right) = 13,62^\circ \quad (2.8)$$

### 2.2.2 Método das Características

Existem diferentes tipos de bocais: anel, cônico e o “*Bell Shaped*” ou formato ótimo. As principais perdas no bocal de tubeira cônica são por fricção, gás dinâmica e

termodinâmica. Elas são ocasionadas principalmente pelo fato do fluxo de gás na saída do bocal não ser axial e uniforme. O método das características proporciona um *design* de tubeira com o mesmo ângulo de saída de tubeira cônica, porém com o menor comprimento e menores perdas.

A solução teórica deste problema é baseada nas relações de expansão de gases em condições supersônicas e aceleração do movimento, ao longo de um ângulo obtuso ou da borda de saída. As linhas de corrente podem ser calculadas pelo método das características para se obter linhas paralelas ao eixo do bocal.

Entretanto, bocais de motor foguete devem ser o mais curto possível, esta é a razão pela qual as linhas de corrente para a determinação da parede do bocal é limitada por  $\beta = \beta_m$ . Os resultados destes cálculos são unificados em tabelas e mostrados na Figura 4, onde I – zona de escoamento subsônico; II – zona onde as linhas de corrente e o ângulo do vetor velocidade aumentam (escoamento transônico); III – zona onde a velocidade continua a aumentar, mas o ângulo  $\beta$  diminui e tende a zero (zona de equalização do escoamento); IV – zona de saída.

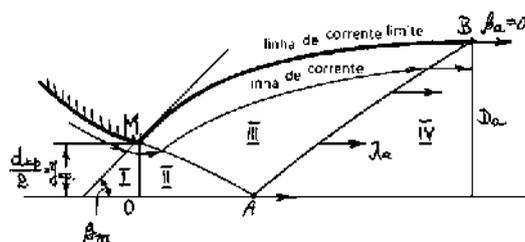


Figura 4: Fluxo supersônico em um bocal de contorno ótimo [1].

No entanto, para motores foguete, bocais com fluxo de saída completamente paralelo não é a melhor solução, eles devem ser com  $\beta_a \neq 0$ , mas com massa mínima ( $M_b$ ).

A escolha do bocal ótimo é um problema complexo, mas é possível fazer algumas recomendações dos dados iniciais:  $D_a$ ,  $d_{kp}$ ,  $n$  e  $2\alpha = 10^\circ$  a  $15^\circ$  para  $P_k/P_a = 500$  a  $1000$ . E, por diversas razões de caráter prático, o ponto M é arredondado por um raio de (0,1 a 0,2) vezes o diâmetro da câmara de acordo com [1].

Usando tabelas, é possível determinar os parâmetros necessários e a partir destes desenha-se o contorno do bocal conforme Figura 5.

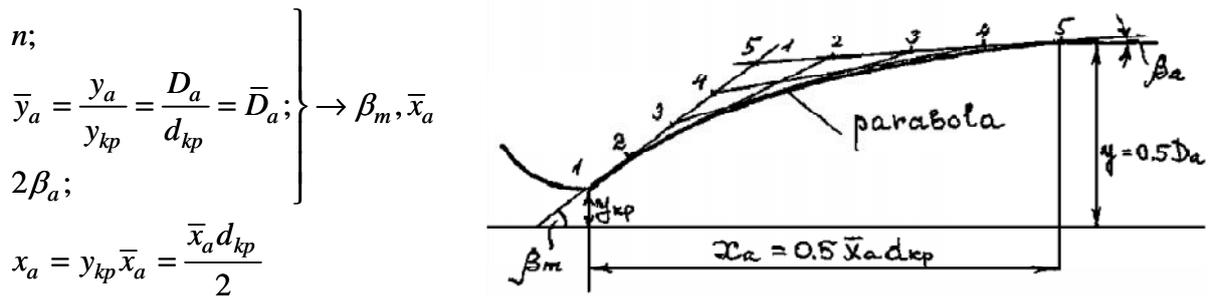


Figura 5: Contorno do bocal supersônico [1].

E, para arredondar o ângulo no ponto M, adota-se a metodologia descrita na Figura 6.

$$\begin{aligned} r &= (0,1 \dots 0,2) d_{kp} \\ \Delta x_1 &= r \sin(\beta_m) \\ \Delta y &= r(1 - \cos(\beta_m)) \\ y_1 &= y_{kp} + \Delta y_1 \end{aligned}$$

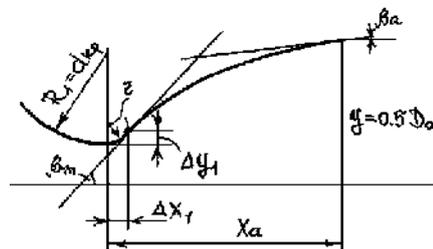


Figura 6: Arredondamento do ângulo no ponto M [1].

### 2.3 Modelagem Numérica

A partir das duas formulações utilizadas anteriormente é possível obter o *design* da tubeira expandida para o motor L75. A Figura 7 apresenta as curvas obtidas por ambas as formulações.

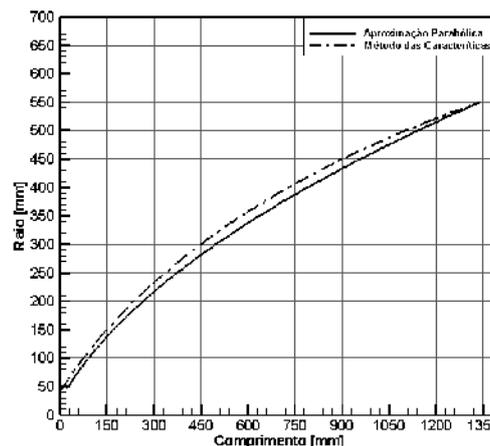


Figura 7: Comparação do perfil da tubeira estendida obtido pelos dois métodos apresentados

É possível observar que as curvas obtidas possuem pouca diferença e ambas encontram-se no ponto de máximo comprimento e máximo raio de saída. Entretanto a curva aproximada por parábola não tem seu início marcado pelo mesmo ponto. De acordo com a teoria do método das características a tubeira é projetada de forma a fornecer o melhor

caminho para a partícula, gerando menores perdas e maior eficiência. Sendo assim, o modelo geométrico que foi adotado para análise de elementos finitos será o modelo obtido pelo método das características

### 2.3.1 Modelo Geométrico e Malha de Elementos Finitos (MEF)

O modelo geométrico (CAD) utilizado para análise, foi obtido a partir de um setor de 20° da tubeira estendida do motor L75. O modelo é composto por: *manifold*, flange e corpo da tubeira. Os materiais que compõe o conjunto a ser analisado são apresentados mais adiante. Para realizar a análise de Elementos Finitos foi gerada uma MEF, Figura 8, com 1.426.500 nós e 960.300 elementos.

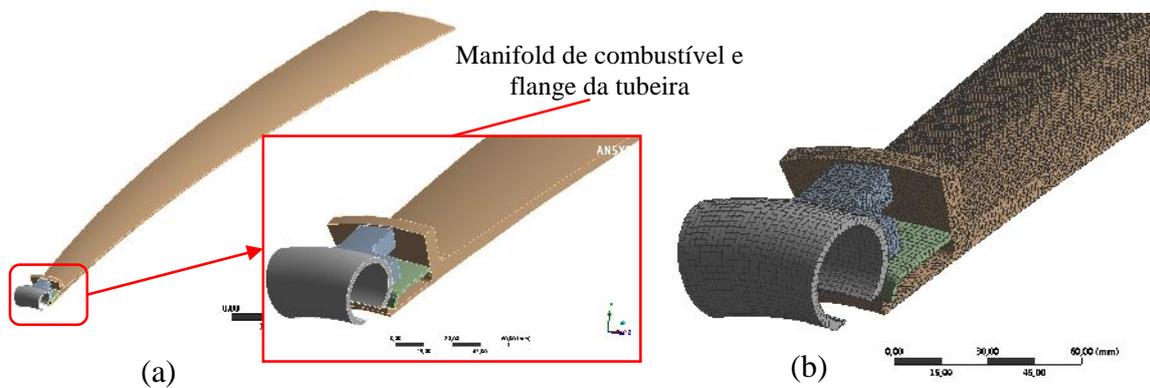


Figura 8: Modelo da tubeira estendida do L75. (a) Modelo CAD; (b) MEF

### 2.3.2 Condições de contorno e carregamentos de pressão e temperatura

Neste estudo são utilizados os perfis de pressão e temperatura obtidos pela análise estequiométrica com o código CEA. Os perfis de pressão e temperatura são impostos sobre a superfície interna da tubeira, como mostra a Figura 9.

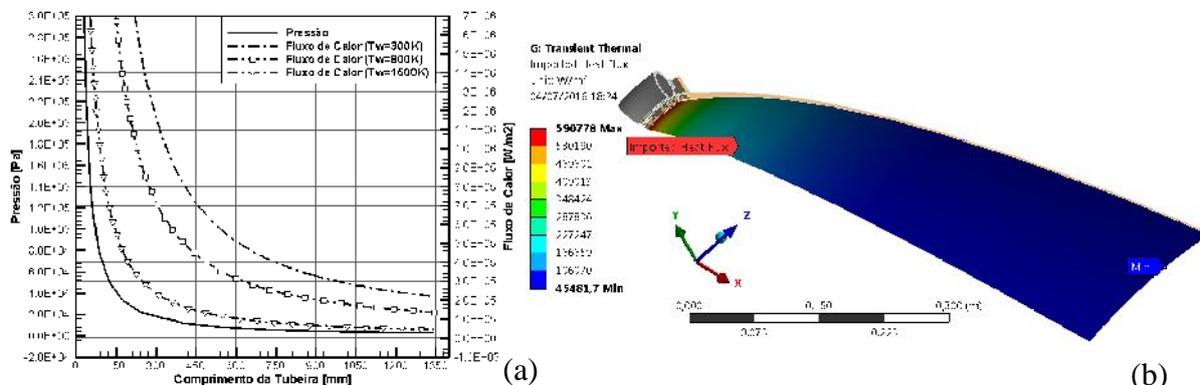


Figura 9: Condições de contorno para a tubeira. (a) Curvas; (b) Fluxo de calor imposto.

### 2.3.3 Propriedades dos Materiais

Na literatura são encontradas muitas tuberias fabricadas em aço inox e ligas de Inconel as quais possuem proteção térmica devido aos altos gradientes térmicos. Este trabalho busca apresentar uma proposta de projeto de tuberia que ofereça a menor massa total possível com a máxima resistência. As propriedades dos materiais são apresentadas na Tabela 1 e foram obtidas a partir da base de dados de materiais disponíveis na Divisão de Propulsão Espacial (APE). Todas as propriedades apresentadas são válidas em uma larga faixa de temperatura.

Tabela 1: Propriedades termofísicas dos materiais (valores médios).

	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	E [GPa]	$\nu$ [MPa]	$\alpha$ [MPa]	k [W/mK]	$\lambda$ [10 <sup>-6</sup> /K]	Cp [J/Kg K]
<b>AISI 316L</b>	8000	164	166 (242 max)	457 (582 max)	19	17	500
<b>Carbono fenólica (70% de fibras)</b>	1510	181	-	1500	6	16	1901
<b>Grafite</b>	2100	14	-	79(175 max)	50	8	1608
<b>Inconel 600</b>	8410	179	186 (285 max)	414 (660 max)	22	16	434

## 3 Resultados

### 3.1 Análise Térmica

Para realizar o estudo termo-estrutural da tuberia do motor L75 foi adotada a condição de contorno térmica apresentada no item 2.3.2. Variaram-se os materiais apresentados na Tabela 1, onde se adotou o aço inox para todas as partes com exceção da tuberia. A Figura 10 apresenta a distribuição de temperatura obtida considerando a liga de Inconel e a Tabela 2 apresenta os resultados em temperatura obtidos para todos os materiais estudados considerando 10 segundos de operação.

Tabela 2: Resultados térmicos.

	$T_{max}$ [K]	
	10 s	SS
<b>AISI 316L</b>	532	1716
<b>Carbono fenólica (70% de fibras)</b>	981	2112
<b>Grafite</b>	1600	1600
<b>Inconel 600</b>	563	1682

SS: Steady-State

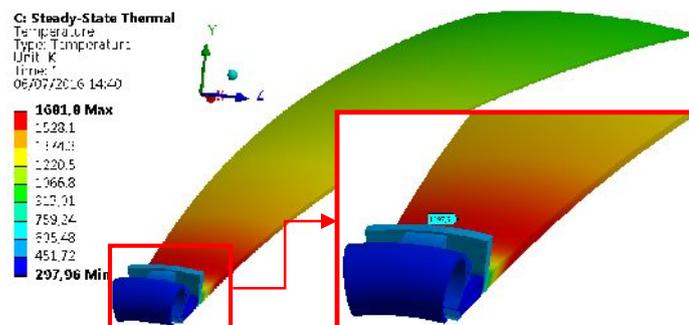


Figura 10: Distribuição de temperatura para o Inconel.

### 3.2 Análise Acoplada

A partir dos resultados térmicos apresentados anteriormente foi realizada a análise estrutural. Aplicou-se a curva de pressão apresentada no item 2.3.2 obtendo-se as distribuições de tensões e deformação.

Tabela 3: Resultados estruturais.

	eq. max [MPa]	eq. max [ $\mu\text{m/m}$ ]
<b>AISI 316L</b>	> 582	11.122
<b>Carbono fenólica (70% de fibras)</b>	> 1500	22.686
<b>Grafite</b>	-	-
<b>Inconel 600</b>	> 660	10.680

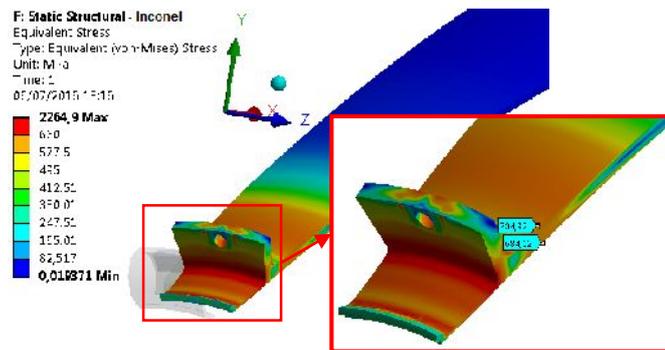


Figura 11: Distribuição de tensões e deformações.

## 4 Conclusões

Podemos concluir a partir deste estudo que os materiais compósitos são uma excelente opção para fabricação da tubeira do motor L75 devido à baixa massa específica resultando em uma redução significativa da massa total. Além disso, acredita-se que filme de refrigeração seja necessário para proteger termicamente a tubeira para longos períodos de operação, pois reduzindo a temperatura dos materiais da tubeira têm-se maior resistência.

Conclui-se a partir do estudo que o projeto mecânico deve ser melhorado, pois se observou que as tensões avaliadas foram superiores a tensão de ruptura em todos os casos. Além do mais, o grafite não tem função mecânica em tração, logo o flange deve ser projetado de outra forma e com outros materiais.

## Referências

- [1] Almeida, D.S. e Kesaev, Kh.V. Teoria e cálculo de motores foguetes a propelente líquido, apostila de estudos, Divisão de Propulsão Espacial, 2012.
- [2] Sutton, G. P. e Biblarz, O. Rocket Propulsion Elements, 7ª edição. John Wiley & Sons, INC., 2001.
- [3] Yoshino, T. Cálculos gerais relativos à tubeiras cônicas e contornadas com aproximação parabólica, Instituto de Aeronáutica e Espaço, Divisão de Propulsão Espacial, RT-012-ETP-PROP,1985.