Simulação numérica de escoamento reativo, transferência de calor e termoelasticidade em motor-foguete

Financiador: AEB

Execução: grupo CFD/UFPR

Jul/2007 – Jun/2009

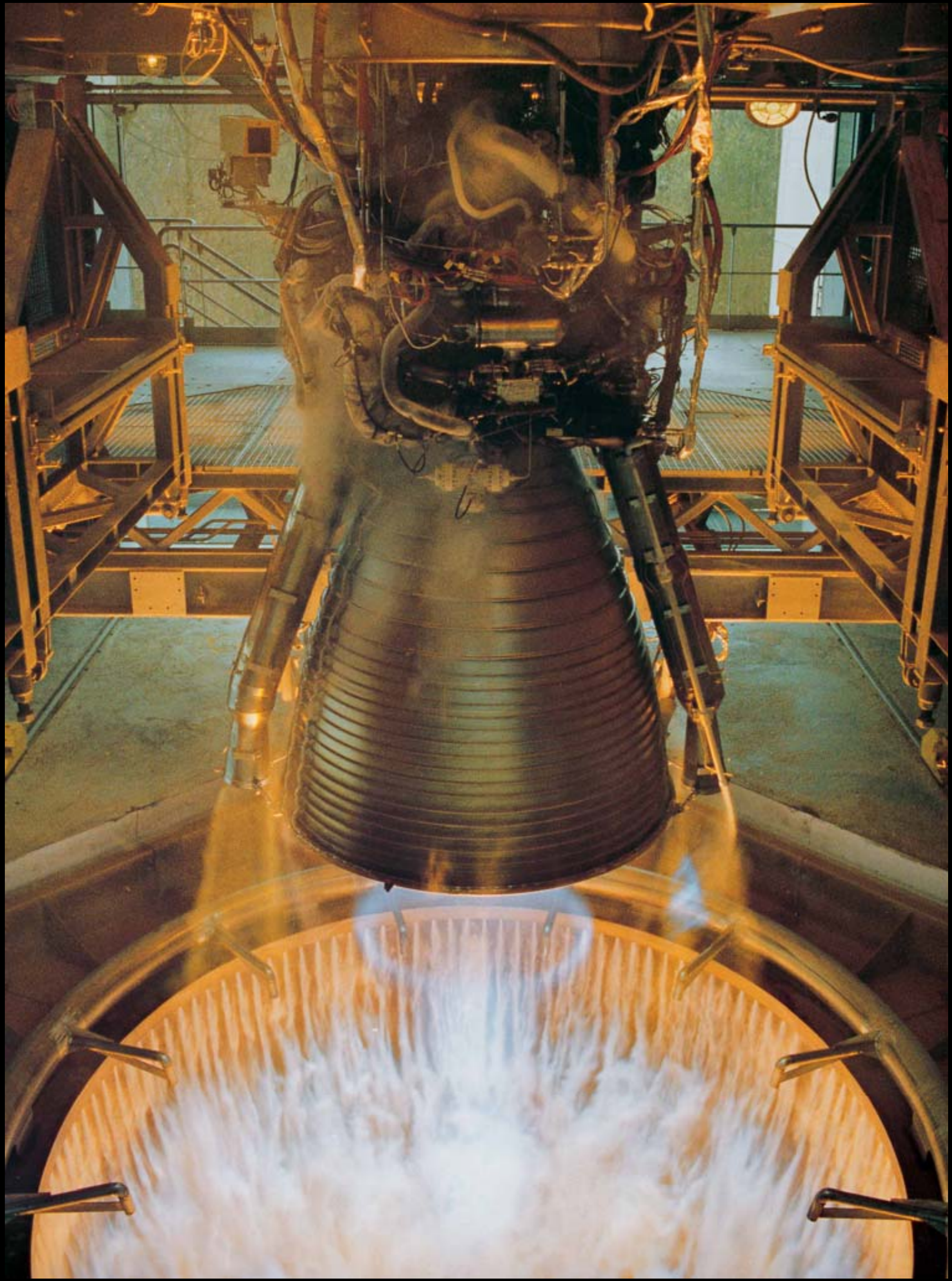
Objetivo principal

Implementar códigos computacionais para obter:

- Empuxo do motor-foguete
- Temperatura máxima da parede

Considerações:

- Motor-foguete a propelente líquido
- Propelente H_2/O_2
- Refrigeração regenerativa ou radiativa

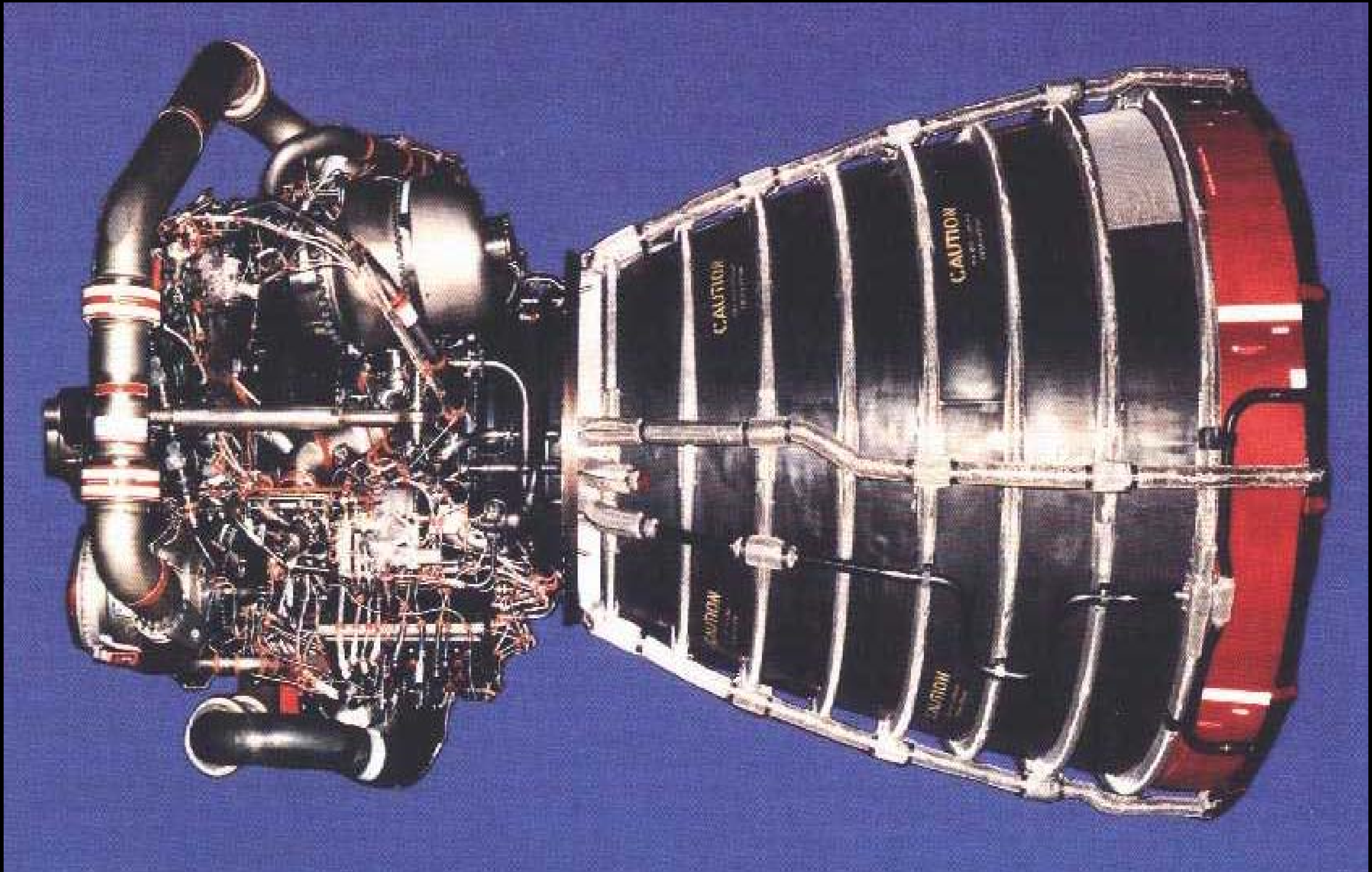


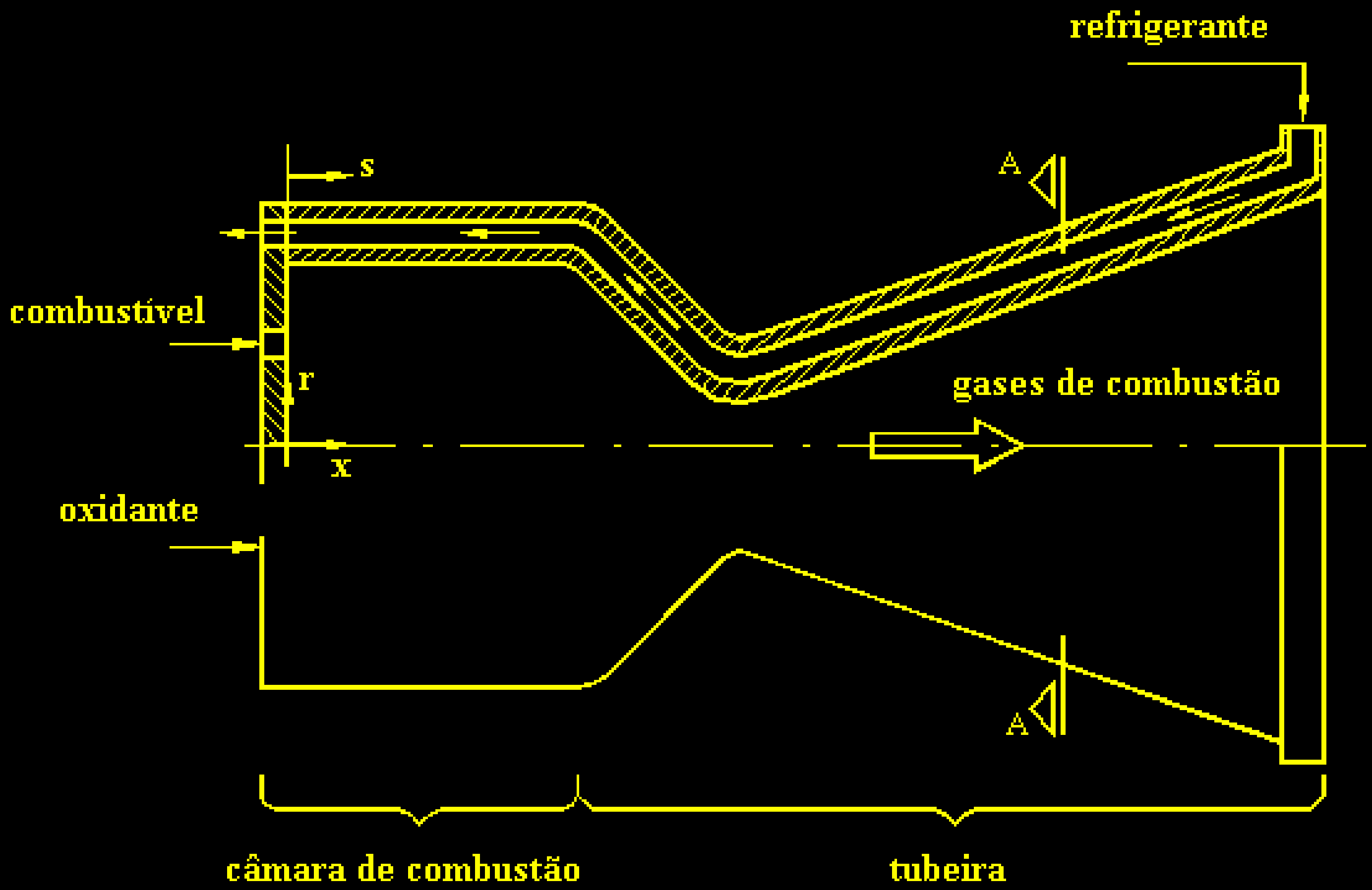
Motor-foguete

Vulcain do

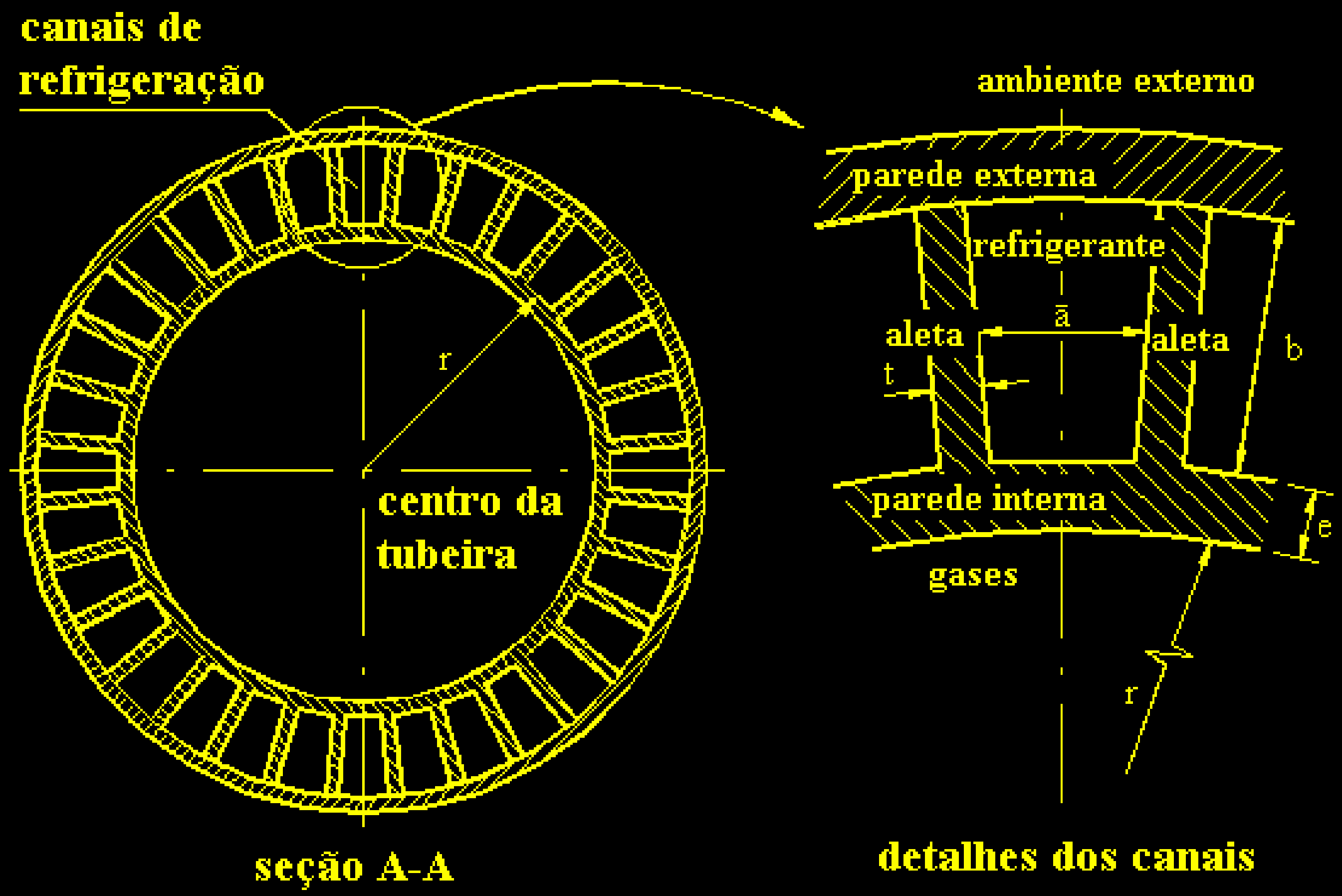
Ariane V

Motor-foguete SSME do Space Shuttle





Esquema de motor-foguete bipropelente com refrigeração regenerativa



Detalhes dos canais de refrigeração

Motor Vulcain (Ariane V)

- F (nível do mar) = 103 tf
- T_w-max = 750 K
- T_o = 3.500 K
- P_o = 100 atm
- q"max = 60 MW/m^2
- Canais = 360
- Altura = 9,5 a 12 mm
- Largura = 1,3 a 2,6 mm

Metas

1: Escoamento laminar 2D não-reativo (tubeira)

2: Escoamento laminar 2D reativo (tubeira)

3: Acoplar refrigeração regenerativa e radiativa 1D

4: Condução e termoelasticidade 2D na parede

Modelos físicos para escoamento na tubeira

1: Gás com propriedades constantes

2: Gás com propriedades variáveis

3: Gases congelados

4: Gases em equilíbrio químico local

5: Gases com taxa finita de reação

Escoamento reativo 2D laminar

$$C^{\phi}\left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)+\frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial y}(r\rho v\phi)\right]=\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma^{\phi}\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial y}\left(r\Gamma^{\phi}\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)+P^{\phi}+S^{\phi}$$

Equação	ϕ	C^{ϕ}	Γ^{ϕ}	P^{ϕ}	S^{ϕ}
Massa	1	1	0	0	0
QML-x	u	1	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x}$	$\frac{1}{3}\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial x}\right)-\frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\mu}{r}\frac{\partial}{\partial y}(rv)\right]$
QML-y	v	1	μ	$-\frac{\partial p}{\partial y}$	$\frac{1}{3r}\frac{\partial}{\partial y}\left(r\mu\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)-\frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)-\frac{4}{3}f\frac{u}{r^2}v-\frac{2}{3r}fv\frac{\partial\mu}{\partial y}$
Energia	T	c_p	k	$\frac{\partial p}{\partial t}-uP^{u}-vP^{v}$	$2\mu\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+f\left(\frac{v}{r}\right)^2\right]+\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2-\frac{2}{3}\mu\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+f\frac{v}{r}\right)^2+S_{eq/tf}$
Espécies	Y_i	1	0	0	$\dot{w}_i$

Escoamento reativo 2D laminar

Equilíbrio químico local

$$S_{eq/tf} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\sum_{i=1}^{N_e} \rho\, h_i\, Y_i\, u\right) - \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial y}\left(\sum_{i=1}^{N_e} r\, \rho\, h_i\, Y_i\, v\right)$$

Taxa finita: $$S_{eq/tf} = -\sum_{i=1}^{N_e} h_i\, \dot{w}_i$$

$$p = \sum_{i=1}^{N_e} p_i$$

$$c_p = \sum_{i=1}^{N_e} Y_i (c_p)_i$$

$$R = \sum_{i=1}^{N_e} Y_i\, R_i$$

$$p = \rho\, R\, T$$

Modelos químicos para H_2/O_2

9 equilíbrio e 6 taxa finita

Modelo	Número de reações	Número de espécies	Espécies envolvidas
0	0	3	H_2O, O_2, H_2
1	1	3	H_2O, O_2, H_2
2	2	4	H_2O, O_2, H_2, OH
3	4	6	H_2O, O_2, H_2, OH, O, H
4	4	6	H_2O, O_2, H_2, OH, O, H
5	8	6	H_2O, O_2, H_2, OH, O, H
7	8	6	H_2O, O_2, H_2, OH, O, H
10	6	8	H_2O, O_2, H_2, OH, O, H, HO_2, H_2O_2
9	18	8	H_2O, O_2, H_2, OH, O, H, HO_2, H_2O_2

Condições de contorno

parede impermeável (y variável)

$u = v = 0$ (não escorregamento)

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$$

$T = T_{wall}$ (T prescrito)

ou

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \text{ (adiabático)}$$

parede da tubeira
(contorno norte)

entrada da tubeira
(contorno oeste)

entrada subsônica (x = cte)

$v = 0$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \text{ (extrapolação linear)}$$

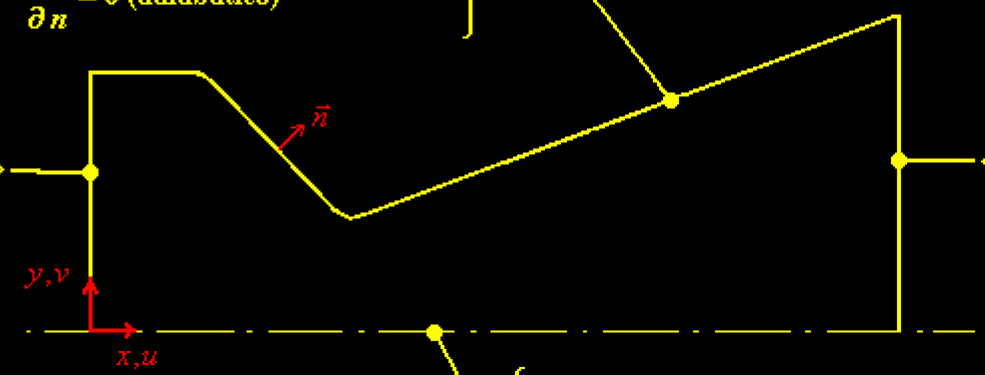
$T = T(T_0, \gamma_0, M)$

$p = p(p_0, \gamma_0, M)$

saída da tubeira
(contorno leste)

saída supersônica (x = cte)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0$$



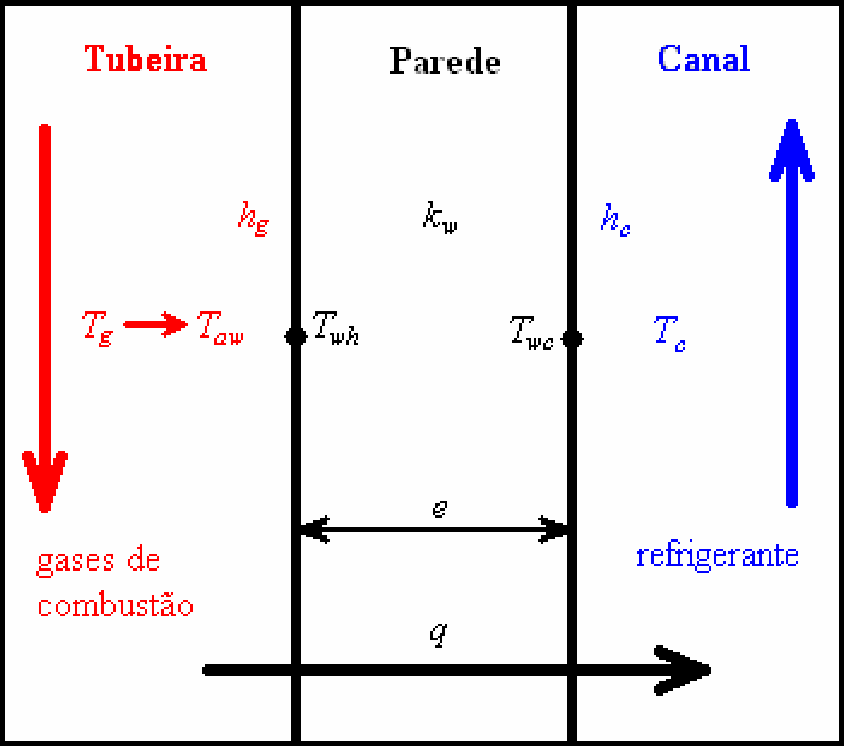
$$\rho = \frac{p}{RT}$$

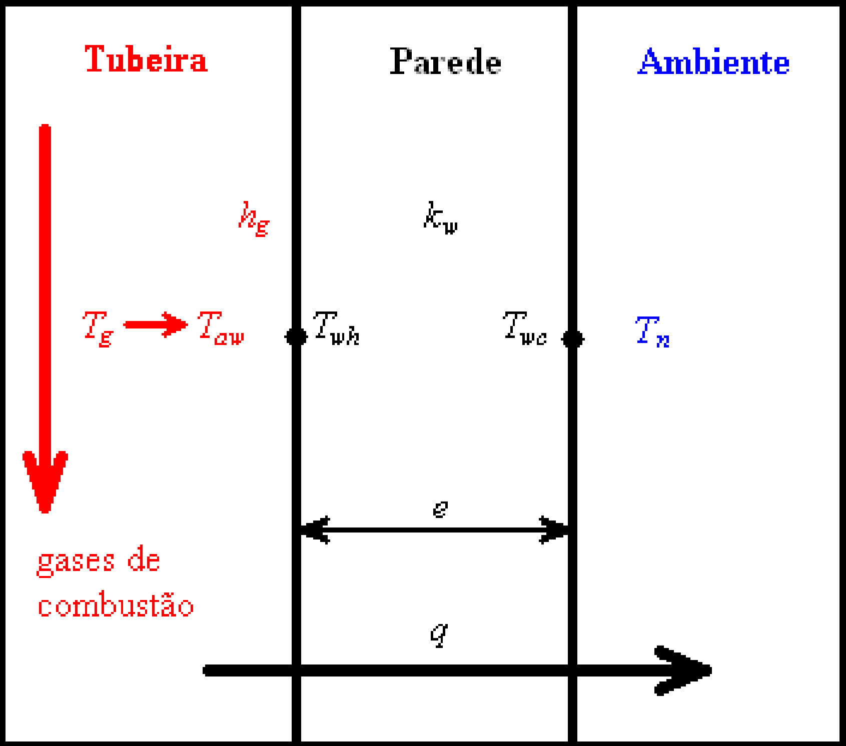
linha de simetria
(contorno sul)

linha de simetria (y = 0)

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

$v = 0$ (impermeável)


Tubeira
Parede
Canal
h_g
k_w
h_c
$T_g \rightarrow T_{aw}$
T_{wh}
T_{wc}
T_c
e
gases de
combustão
refrigerante
q


Tubeira
Parede
Ambiente
h_g
k_w
$T_g \rightarrow T_{aw}$
T_{wh}
T_{wc}
T_n
e
gases de
combustão
q

Escoamento 1D nos canais

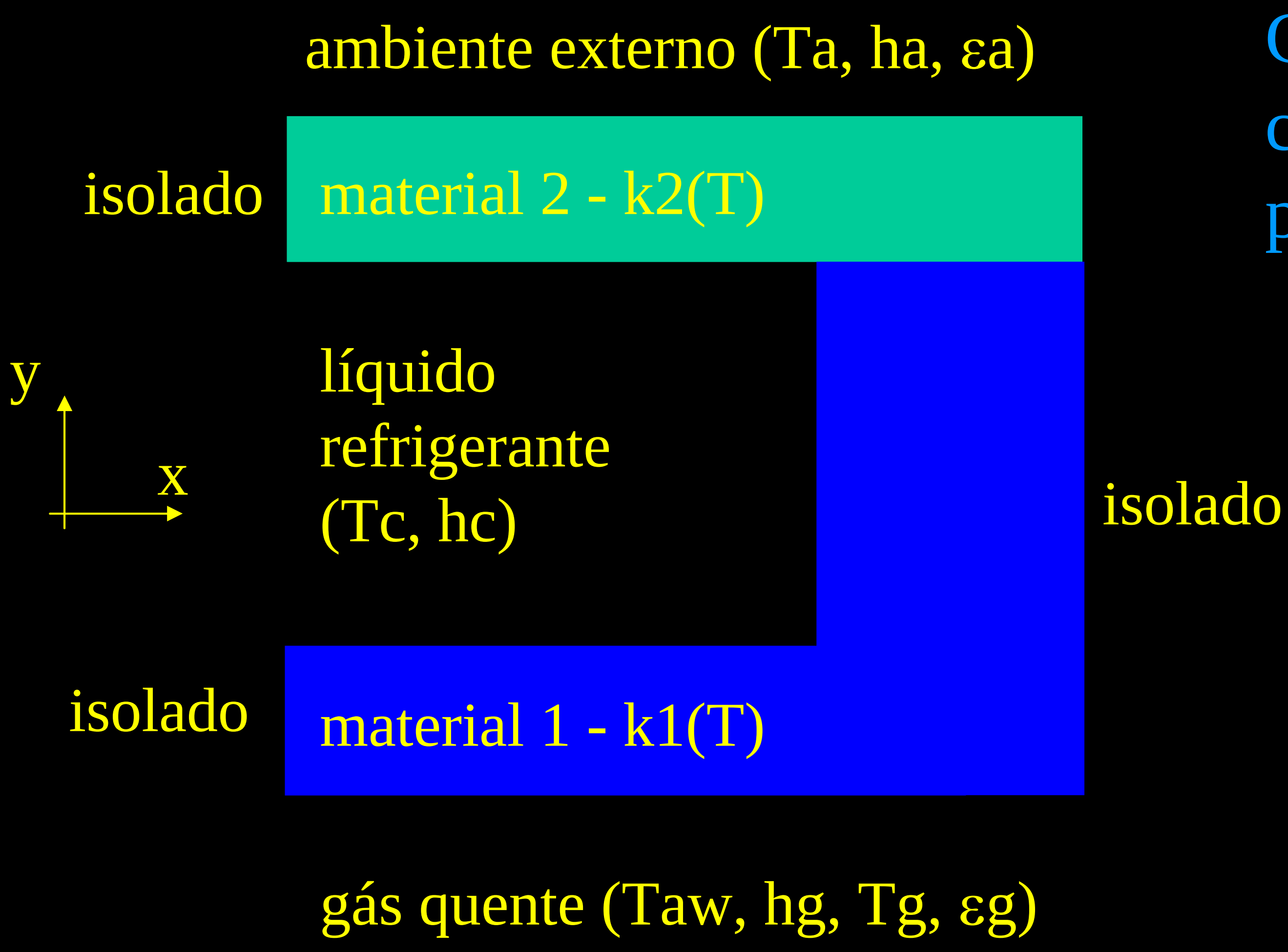
$$\frac{d}{d\,s}\left(\rho_c\,u_c\,S_c\right)=0$$

$$\frac{d}{d\,s}\left(\rho_c\,u_c\,S_c\,u_c\right)=-S_c\,\frac{d\,p_c}{d\,s}+F_c'$$

$$\left(c_p\right)_c\frac{d}{d\,s}\left(\rho_c\,u_c\,S_c\,T_c\right)=\beta\,T_c\,u_c\,S_c\,\frac{d\,p_c}{d\,s}+q_c'$$

$$F_c'=-\frac{\pi}{8}\,f_c\,\rho_c\,u_c\left|u_c\right|D_c \qquad q_c'=\left|u_c\,F_c'\right|+S_{wc}'\,h_c\left(T_{wc}-T_c\right)$$

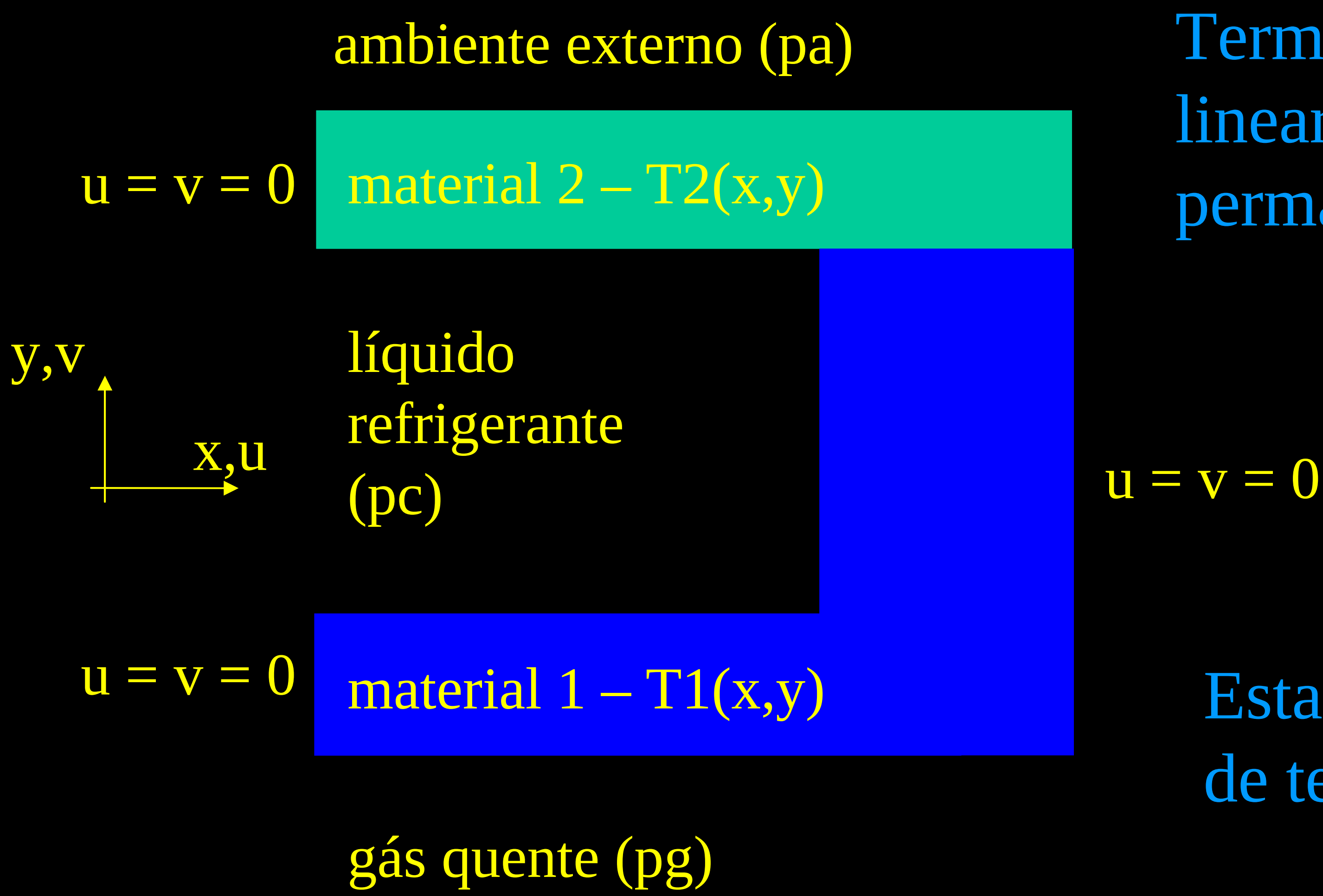
Problema térmico - transversal



Condução de calor 2D plana permanente

$T(x,y) = ?$

Problema termoelástico – transversal; u,v,σ,ε:x,y?



Termoelasticidade linear 2D plana permanente

Estado plano de tensões

Modelo matemático - transversal

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) = 0$$

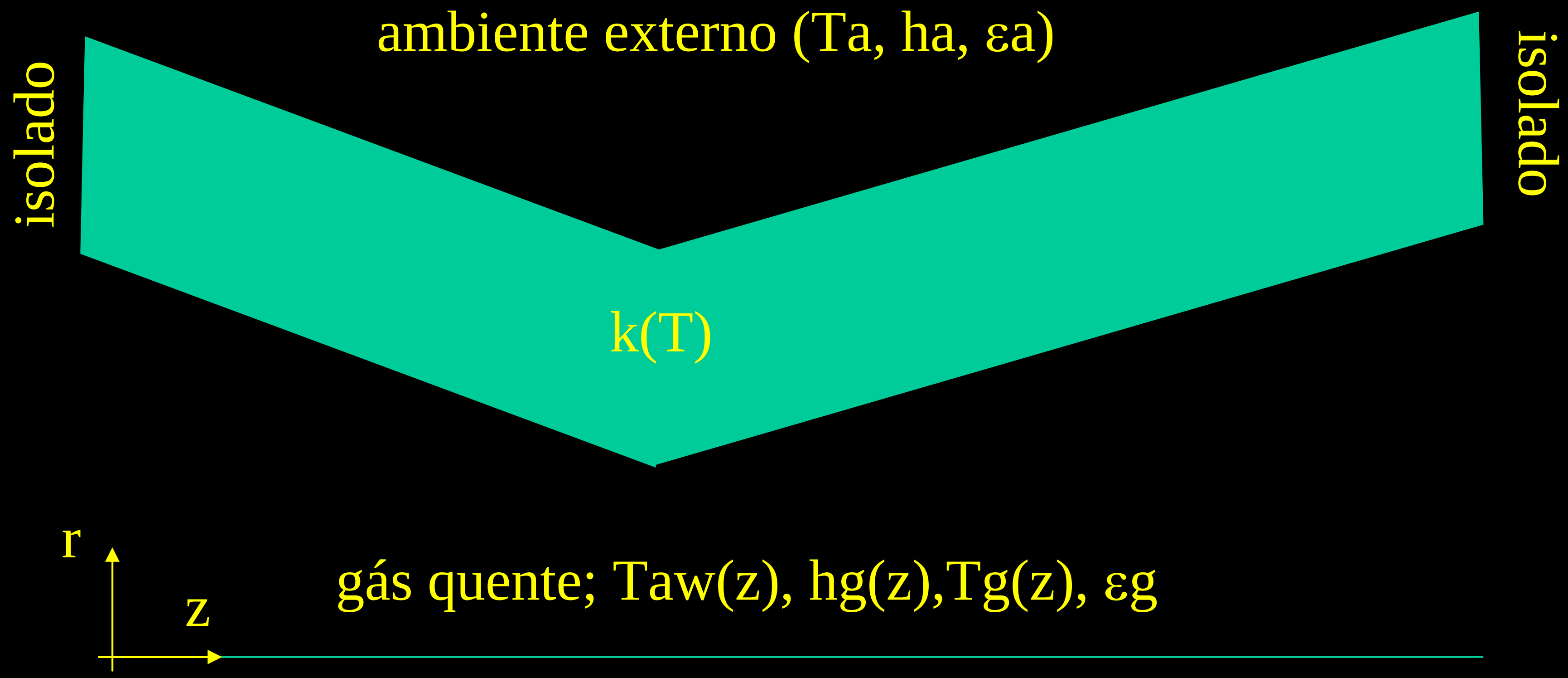
$$\frac{(1+\lambda)}{(1-\lambda)}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 2\alpha\frac{(1+\lambda)}{(1-\lambda)}\frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\frac{(1+\lambda)}{(1-\lambda)}\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 2\alpha\frac{(1+\lambda)}{(1-\lambda)}\frac{\partial T}{\partial y}$$

Problema térmico - longitudinal

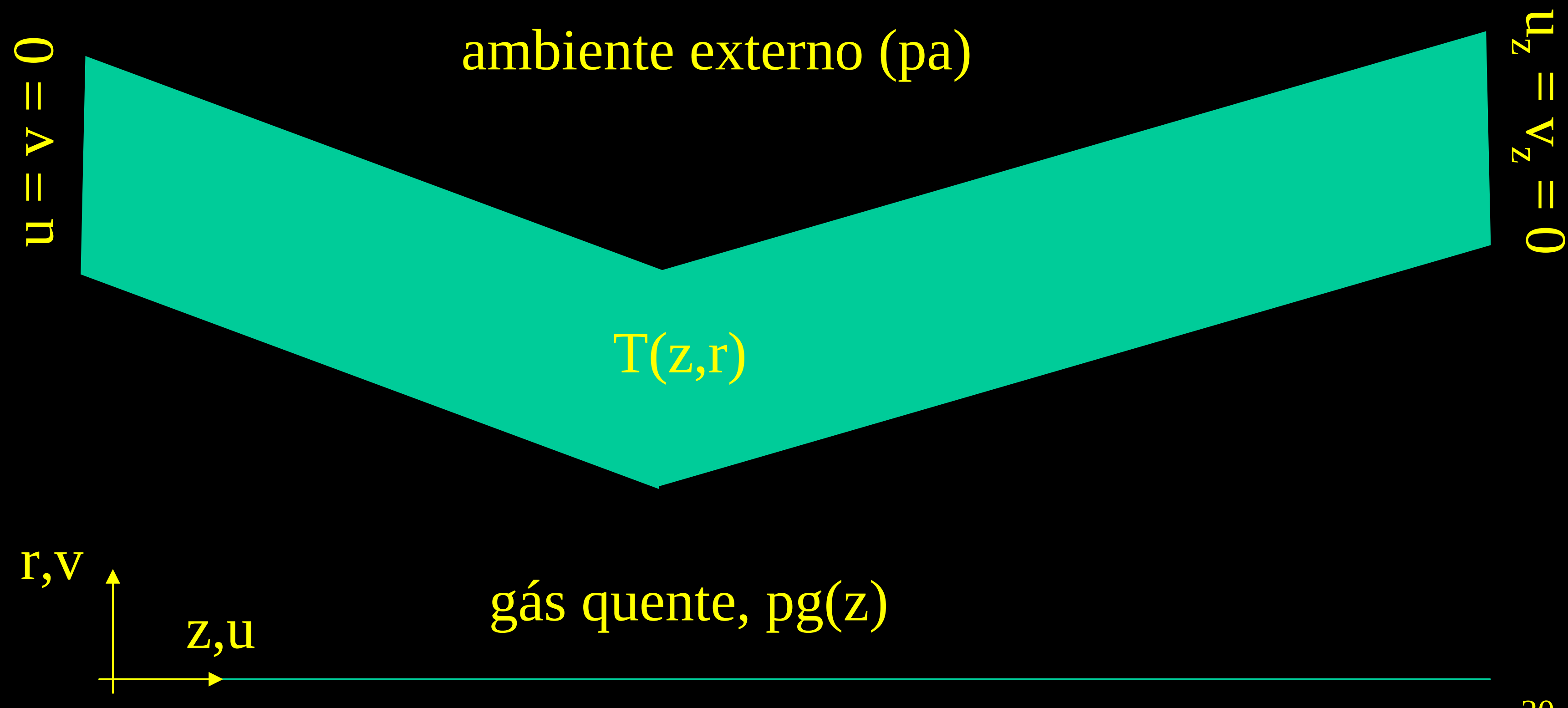
Condução de calor 2D axissimétrica permanente

$$T(z,r) = ?$$



Problema termoelástico – longitudinal; u,v,σ,ε:z,r?

Termoelasticidade linear 2D axissimétrica permanente



Metodologia geral

- Método dos Volumes Finitos
- Aproximações númericas de segunda ordem
- Arranjo co-localizado de variáveis
- Formulação para qualquer regime de velocidades
- Malhas estruturadas cartesianas e não-ortogonais
- Estimativa do erro numérico com GCI
- Linguagem Fortran 90/95/2003
- *Solvers* G-S, ADI e MSI com *multigrid*

Principais resultados esperados

- 3 códigos
- 4 artigos
- 4 relatórios técnicos

Equipe atual

Leandro A. Novak, D
Cosmo D.Santiago, D
Neil F. Carvalho, D

Fabiana F. Giacomini, M
Eduardo M. Germer, M

Carlos H. Marchi (UFPR)
Luciano K. Araki (UFPR)
Ricardo C. Almeida (UFPR)
Márcio A. V. Pinto (UEPG)
A. Fábio C. Silva (UFSC)
J. Nivaldo Hinckel (INPE)

2 M
3 D
6 P
total = 11