



# 6<sup>o</sup> SeP P&D

Seminário de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em  
Veículos Espaciais e Tecnologias Associadas

Workshop: Tendências Futuras para Veículos Lançadores



# Caracterização e termodinâmica de materiais para MFPL

Gilberto Carvalho Coelho  
DANIEL SOARES DE ALMEIDA

08 e 09 de agosto de 2012  
São José dos Campos - SP

Apoio





# 6<sup>o</sup> SeP P&D

Seminário de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em Veículos Espaciais e Tecnologias Associadas

Workshop: Tendências Futuras para Veículos Lançadores

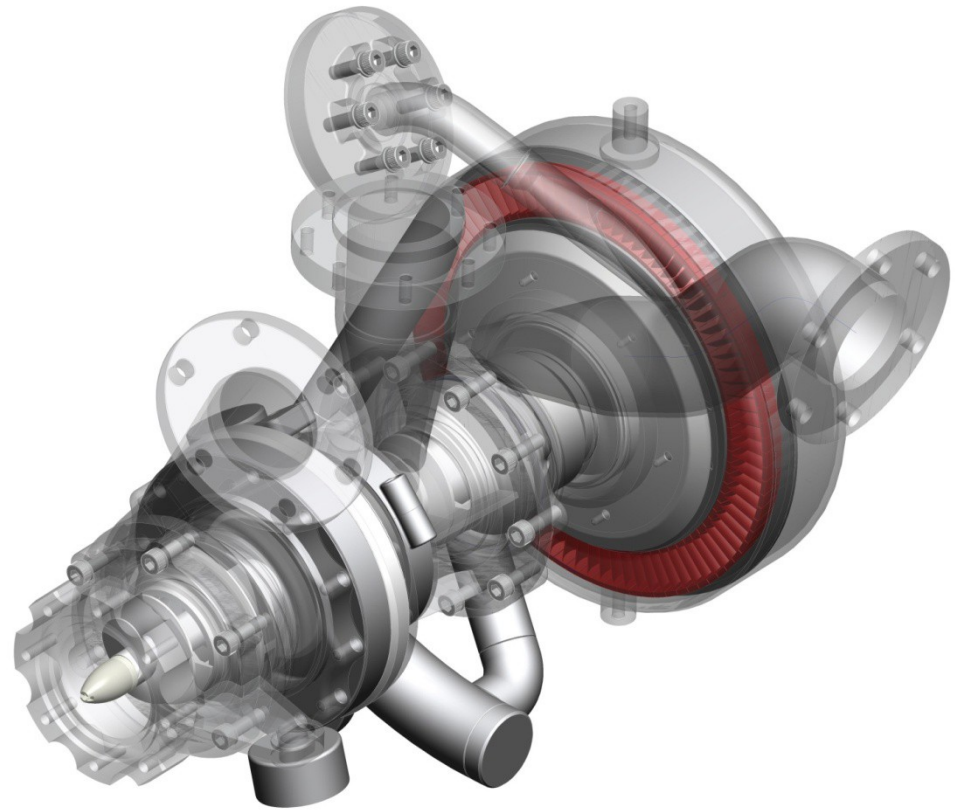
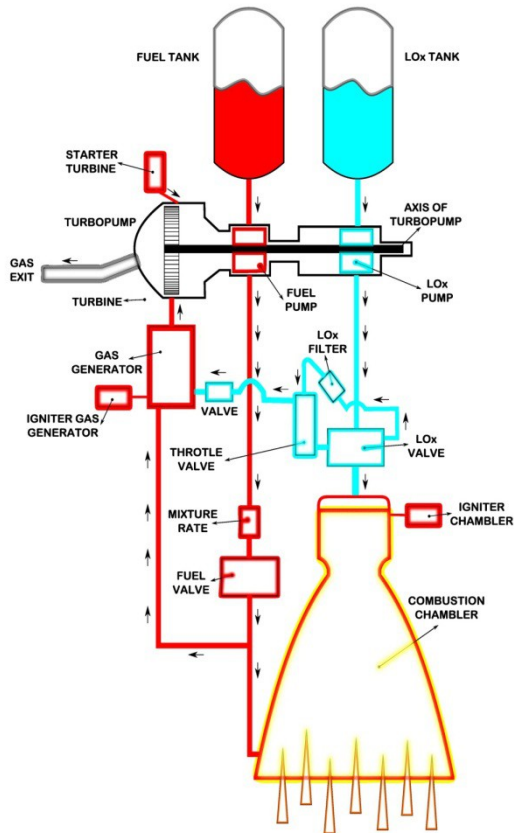


## SUMÁRIO:

- 1- Objetivo/justificativa/aplicação em veículos espaciais
- 2- Custo total/fonte de financiamento
- 3- Resultados obtidos
- 4- Perspectivas futuras / desafios a serem vencidos
- 5- Agradecimentos



## Motor Foguete a Propelente Líquido

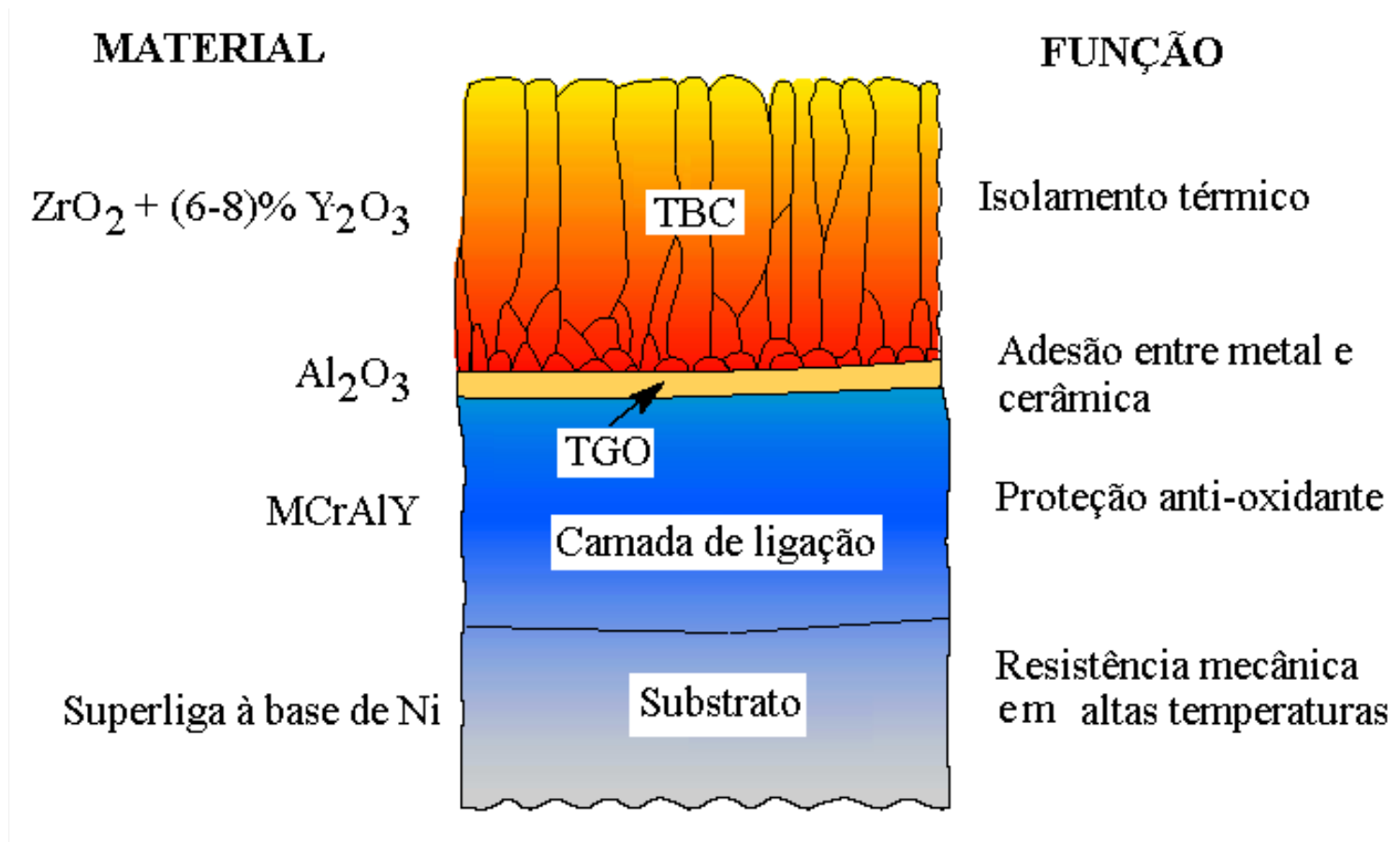


Princípio de funcionamento

Turbobomba sistema de alimentação



## Materiais para aplicações em altas temperaturas





# 6<sup>o</sup> SeP P&D

Seminário de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em Veículos Espaciais e Tecnologias Associadas

Workshop: Tendências Futuras para Veículos Lançadores



## Objetivo/justificativa/aplicação em veículos espaciais

- **Validar bancos de dados termodinâmicos** comparando características microestruturais (fases presentes, suas composições e quantidades) medidas experimentalmente com valores calculados.
- **Sistemas termodinâmicos:**
  - superligas à base de níquel;
  - camada de ligação do sistema MCrAlY
  - revestimentos cerâmicos.
- Aplicação: **seleção de ligas e revestimentos** utilizados na fabricação de turbinas de MFPL.



# 6<sup>o</sup> SeP P&D

Seminário de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em Veículos Espaciais e Tecnologias Associadas

Workshop: Tendências Futuras para Veículos Lançadores



Cronograma de execução (2008-2010):

**Projeto concluído**

Custo total de financiamento:

**R\$ 182.236,00 (Ação 6704)**

Sinergismo projeto Capes Pró-Engenharias (Rede Superligas, 2007-2013):

**R\$ 468.820,05**

Sinergismo projeto Fapesp (MAR-M247 (Ta/Nb), 2010-2012):

**R\$ 107.598,00 + US\$ 103.700,00**



# 6<sup>o</sup> SeP P&D

Seminário de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em Veículos Espaciais e Tecnologias Associadas

Workshop: Tendências Futuras para Veículos Lançadores

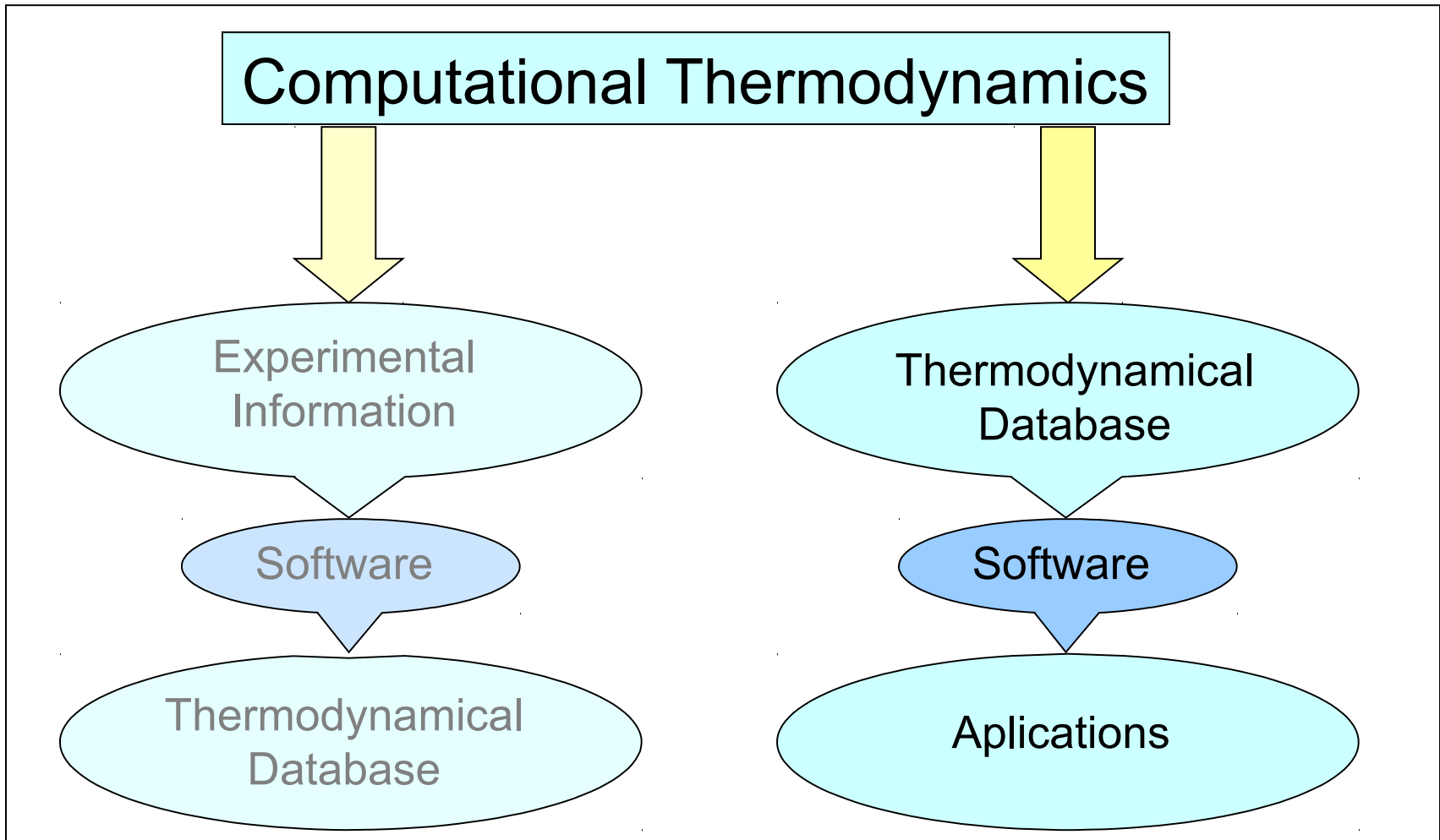


## Resultados obtidos:

- Validação de bancos de dados termodinâmicos através da comparação de características microestruturais;
- Duas teses de mestrado defendidas:
  - **Caracterização microestrutural voltada à termodinâmica de revestimentos como forma de barreira térmica para aplicação em turbinas**, Nara Miranda Guimarães, Dissertação de mestrado em Física e Química dos Materiais Aeroespaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2011.
  - **Simulação termodinâmica e caracterização da superliga a base de níquel Inconel 713LC**, Álvaro Guilherme Junqueira dos Santos, Dissertação (Mestre em Ciências – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de Lorena – Universidade de São Paulo, 2012.
- 16 artigos publicados em congressos, um com destaque no 19<sup>o</sup> Congresso SAE Brasil, 2010.



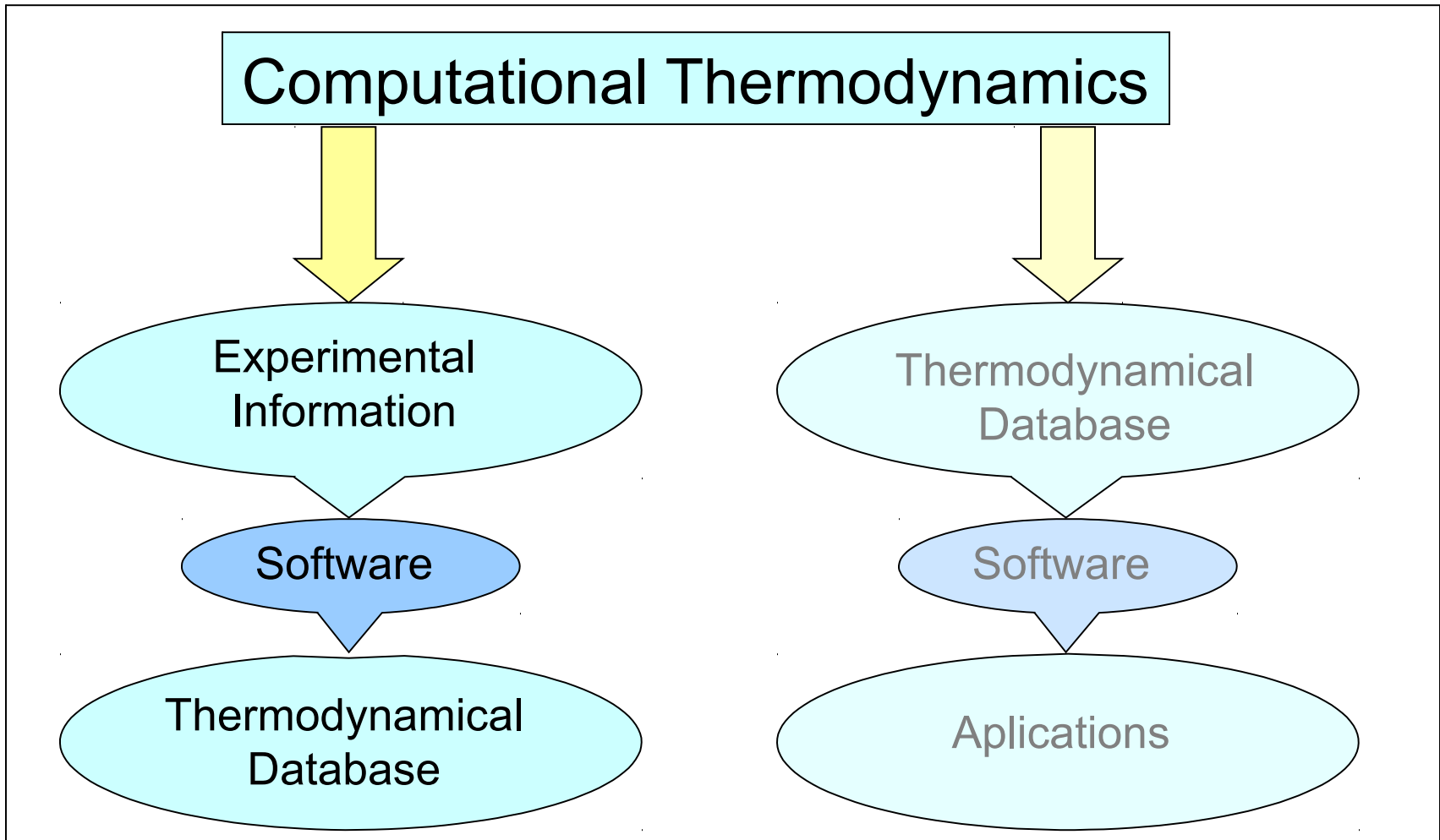
## CALPHAD (CALculation of PHase Diagram)







## CALPHAD (CALculation of PHase Diagram)





# 6<sup>o</sup> SeP P&D

Seminário de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em  
Veículos Espaciais e Tecnologias Associadas

Workshop: Tendências Futuras para Veículos Lançadores



# Substrato Superligas de níquel Base de dados disponível



## Superligas de níquel – Inconel 713LC

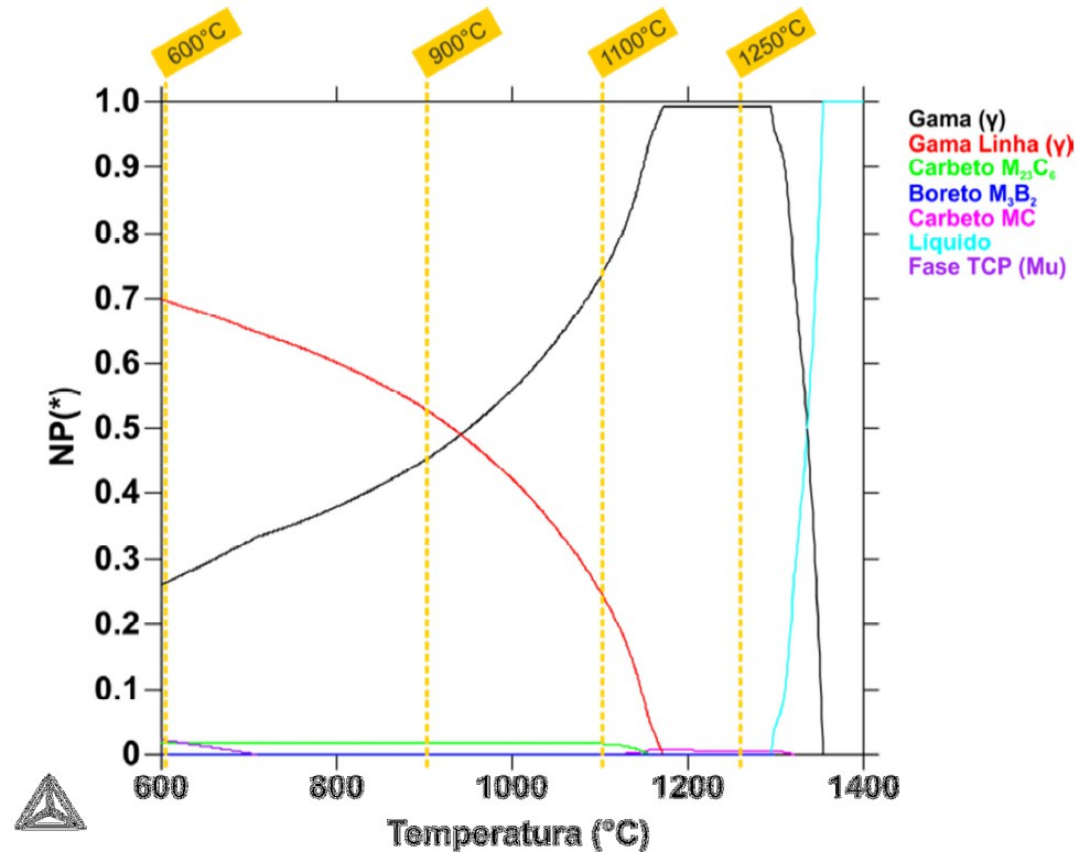
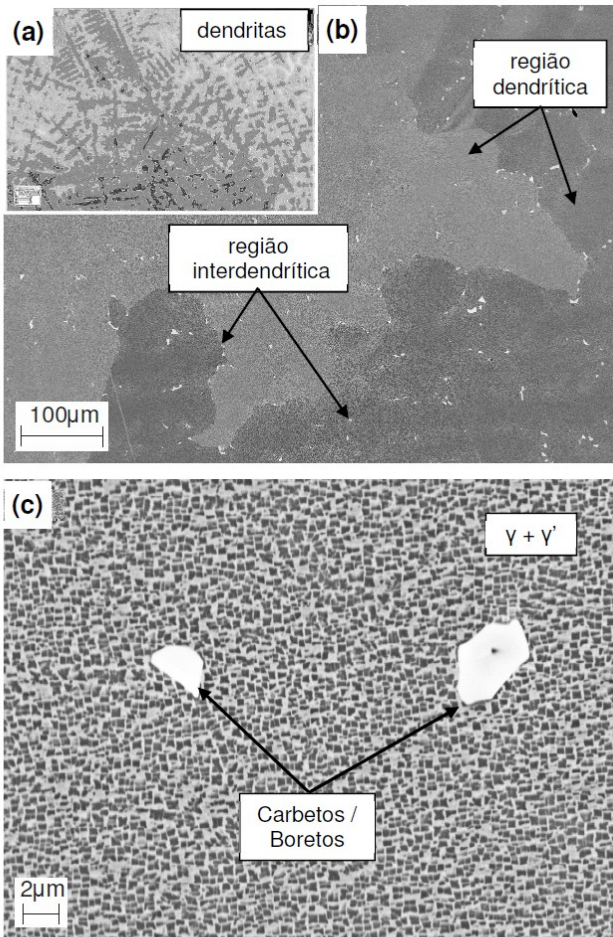


Figura 34 – Simulação termodinâmica das fases presentes (NP\*) versus temperatura, para a superliga Inconel 713LC. As linhas tracejadas em laranja representam as temperaturas selecionadas neste estudo.

Figura 28 – Micrografia de uma amostra no estado bruto de fusão



## Superligas de níquel – Inconel 713LC

Nº Pico	Transformação	Taxas de Aquecimento		
		5°C/min		Thermocalc Calculado
		Bruta de Fusão	600 °C / 2000h	
1	Início da solubilização de $\gamma'$	1034°C	807°C	-
2	Término da solubilização de $\gamma'$	1180°C	1170°C	1170°C
4	Dissolução do eutético binário ( $\gamma + MC$ )	1323°C	1320°C	1320°C
5	Fusão de $\gamma$	1359°C	1353°C	1354°C
6	Fusão do carbeto MC	1457°C	1465°C	-

**600°C / 2000h**

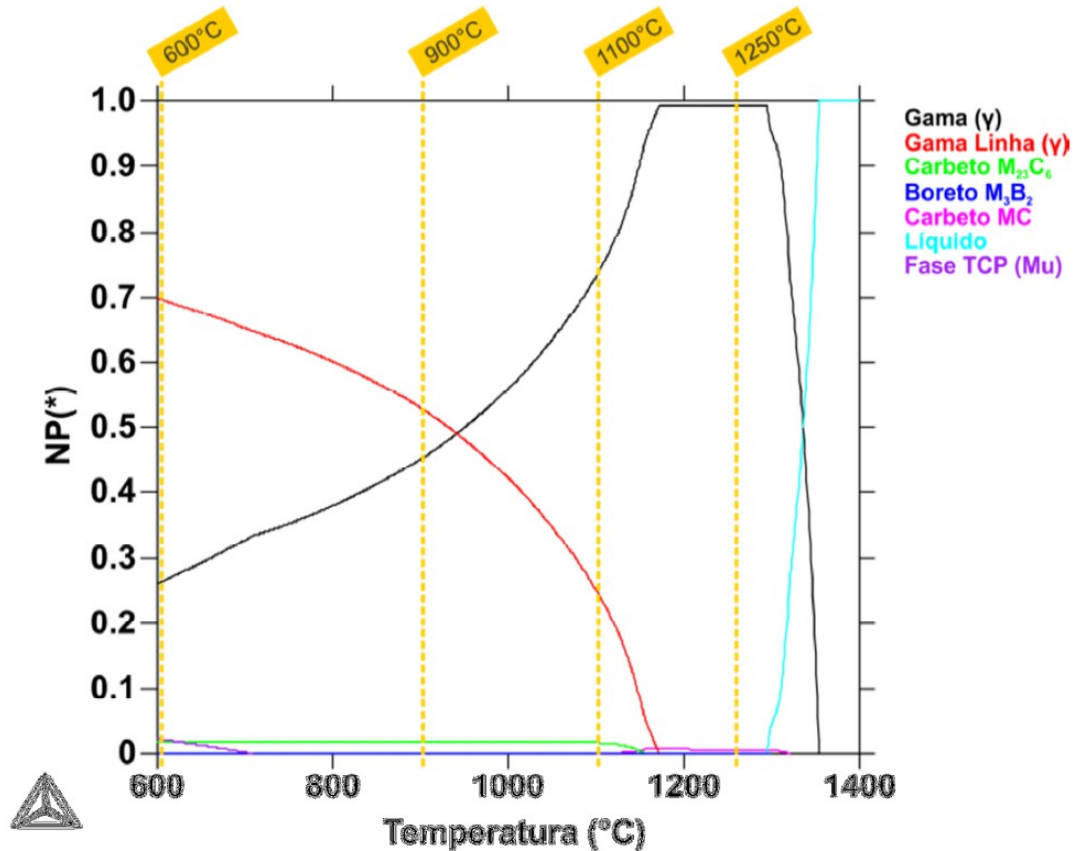
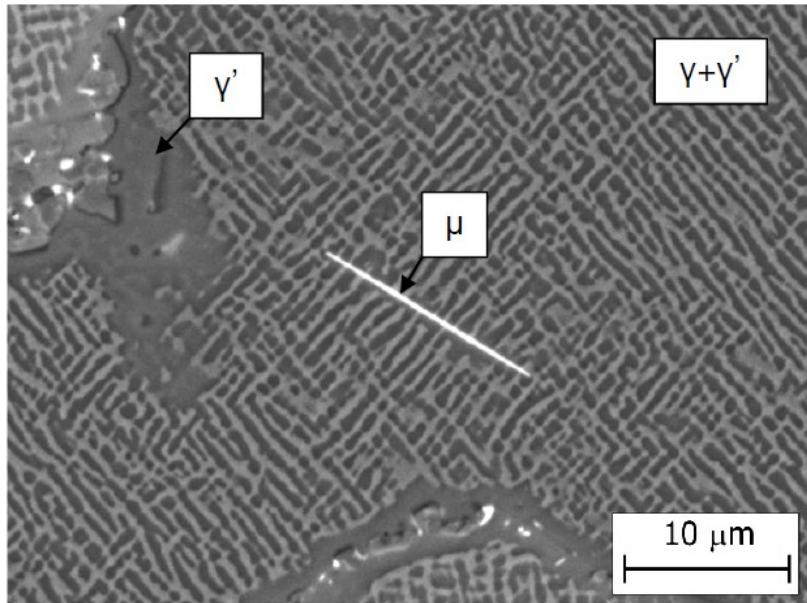


Figura 34 – Simulação termodinâmica das fases presentes (NP\*) versus temperatura, para a superliga Inconel 713LC. As linhas tracejadas em laranja representam as temperaturas selecionadas neste estudo.



## Superligas de níquel – Inconel 713LC



900°C / 2000h

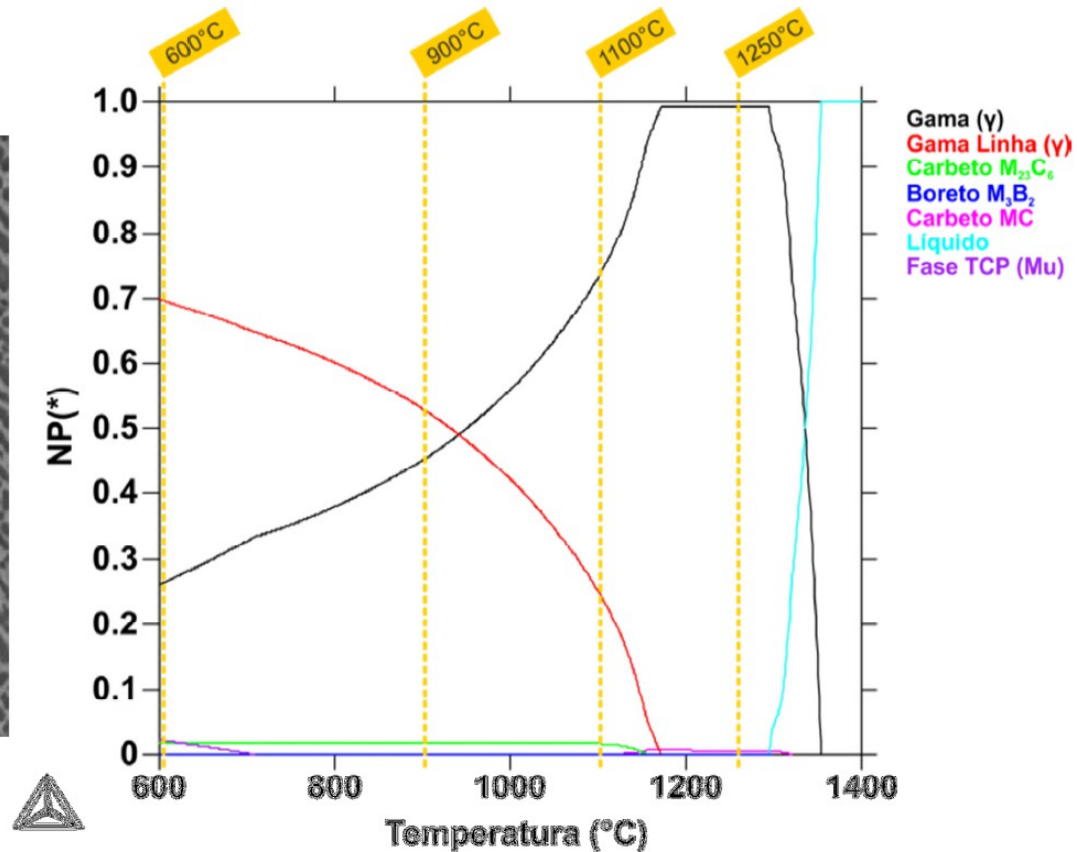


Figura 34 – Simulação termodinâmica das fases presentes (NP\*) versus temperatura, para a superliga Inconel 713LC. As linhas tracejadas em laranja representam as temperaturas selecionadas neste estudo.



## Superligas de níquel – Inconel 713LC

Nº Pico	Transformação	Taxas de Aquecimento		
		5°C/min		Thermocalc
		Bruta de Fusão	900°C / 2000h	Calculado
1	Início da solubilização de $\gamma'$	1034 °C	1014 °C	-
2	Término da solubilização de $\gamma'$	1180 °C	1168 °C	1170 °C
3	Dissolução do Carbeto $M_{23}C_6/M_6C$	-	1210 °C	1153 °C
4	Dissolução do eutético binário ( $\gamma + MC$ )	1323 °C	1321 °C	1320 °C
5	Fusão de $\gamma$	1359 °C	1354 °C	1354 °C
6	Fusão do carbeto MC	1457 °C	1454 °C	-

**900°C / 2000h**

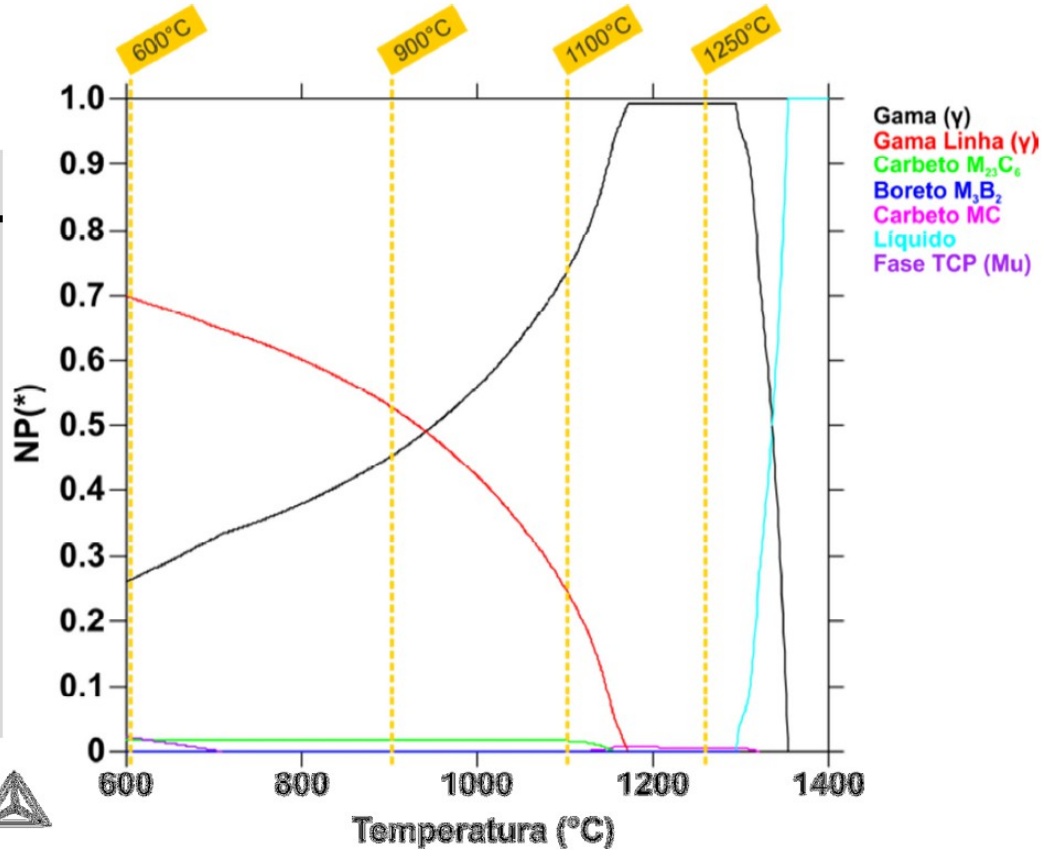
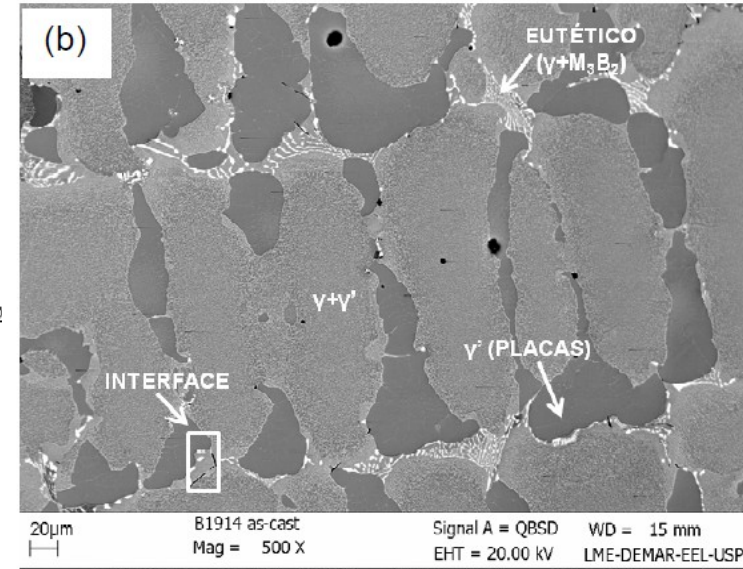
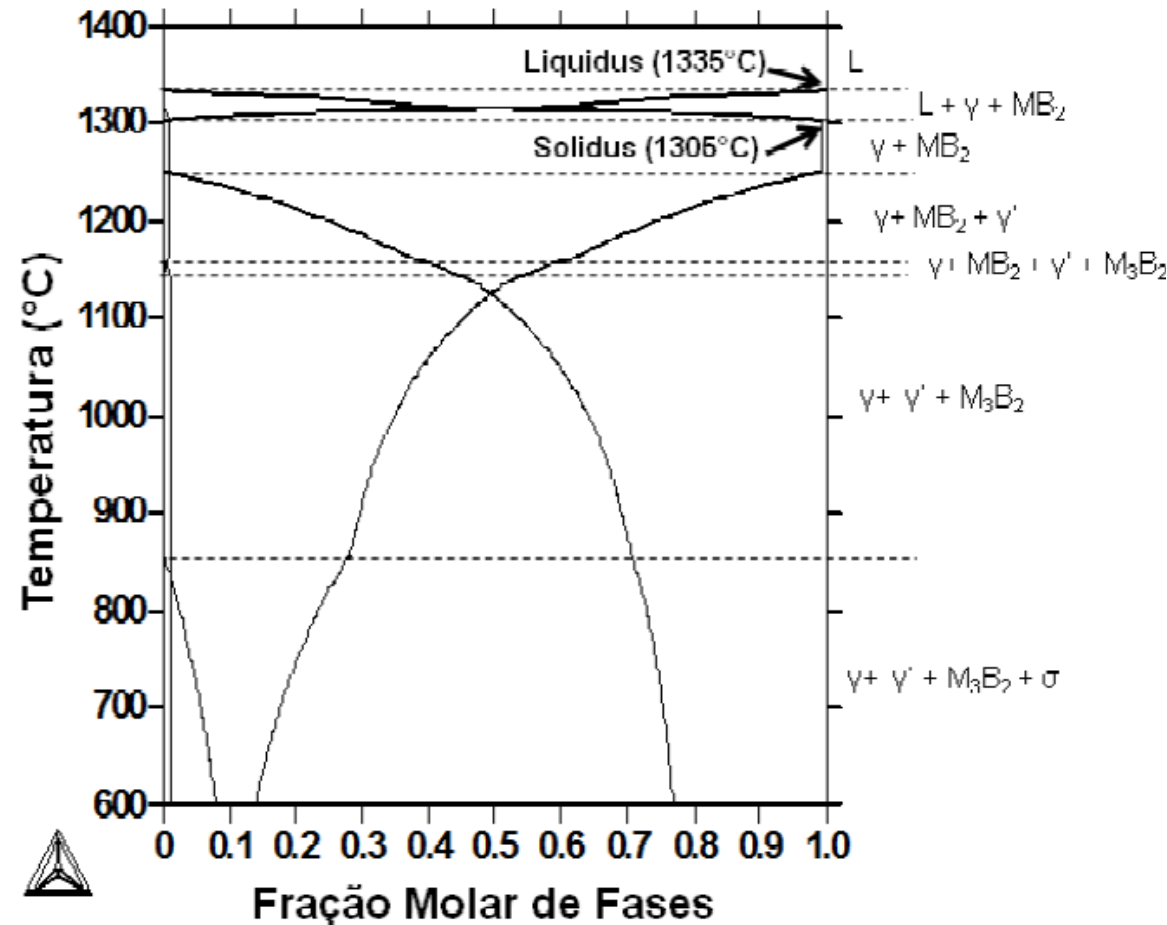


Figura 34 – Simulação termodinâmica das fases presentes (NP\*) versus temperatura, para a superliga Inconel 713LC. As linhas tracejadas em laranja representam as temperaturas selecionadas neste estudo.



## Superligas de níquel – B1914



**Estrutura bruta de fusão**



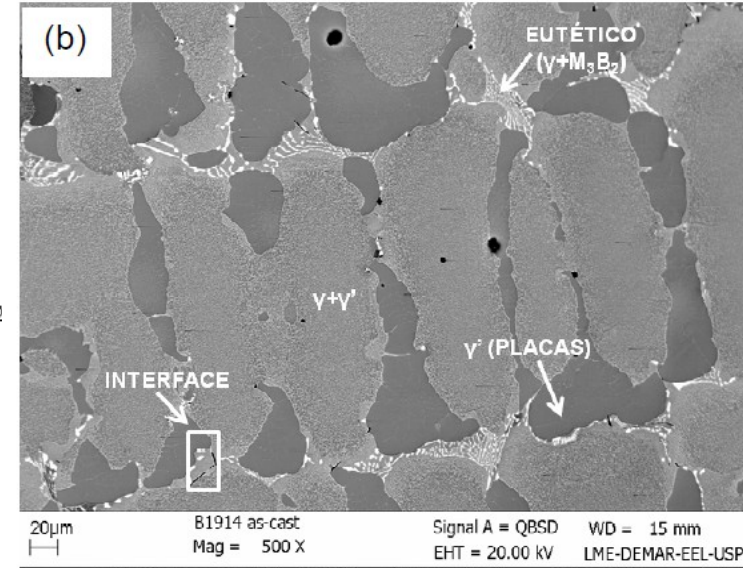
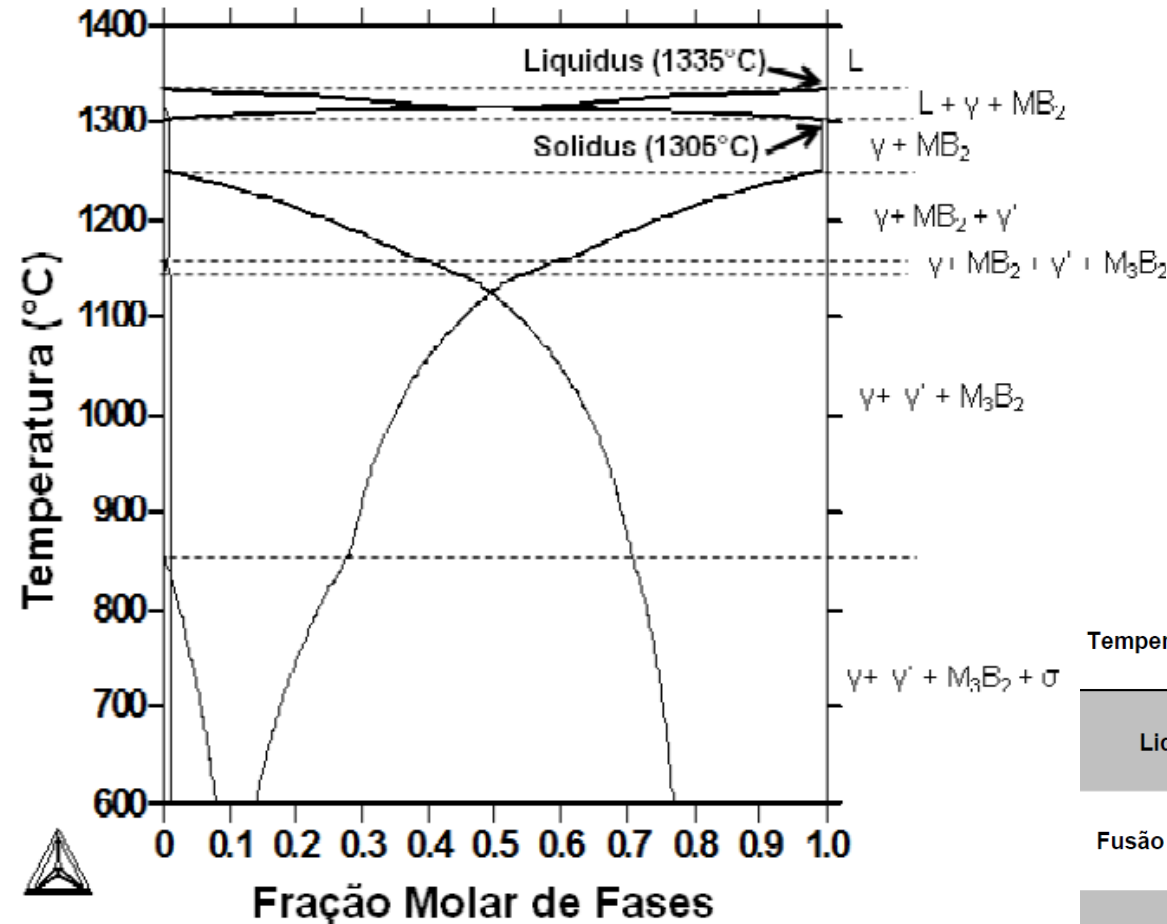
# 6<sup>o</sup> SeP P&D

Seminário de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em Veículos Espaciais e Tecnologias Associadas

Workshop: Tendências Futuras para Veículos Lançadores



## Superligas de níquel – B1914



### Estrutura bruta de fusão

Temperaturas (°C)	Medidas	Scheil
Liquidus	1325	1335
Fusão incipiente	1200	1183
Precipitação de ( $\gamma'$ )	1260	1251





# 6<sup>o</sup> SeP P&D

Seminário de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em  
Veículos Espaciais e Tecnologias Associadas

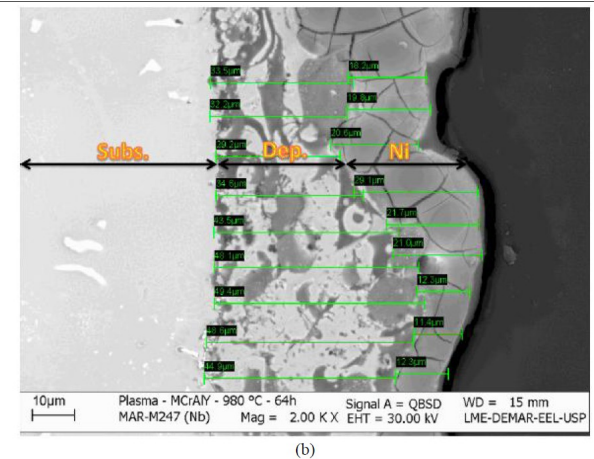
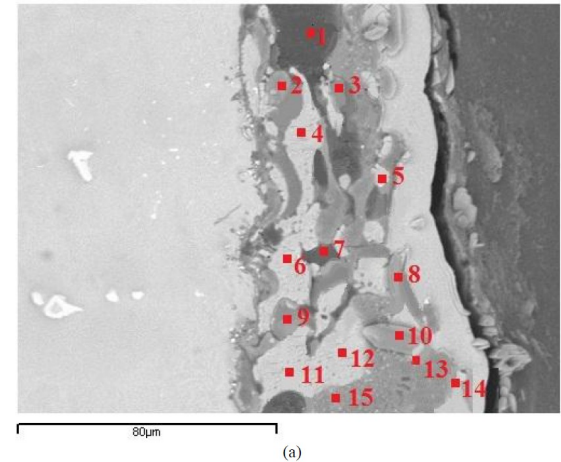
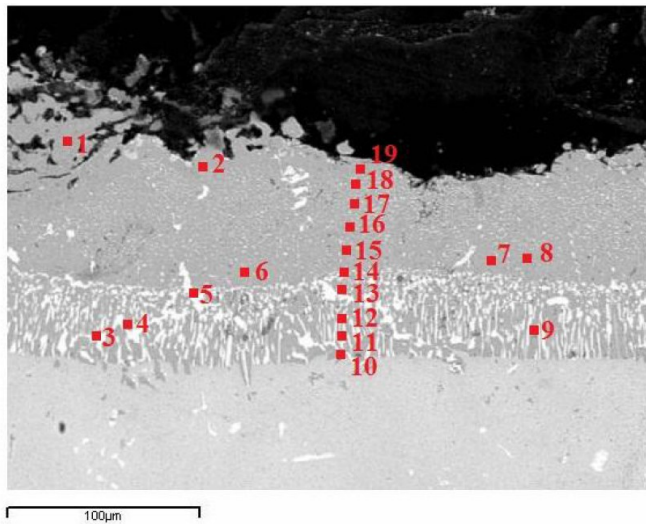
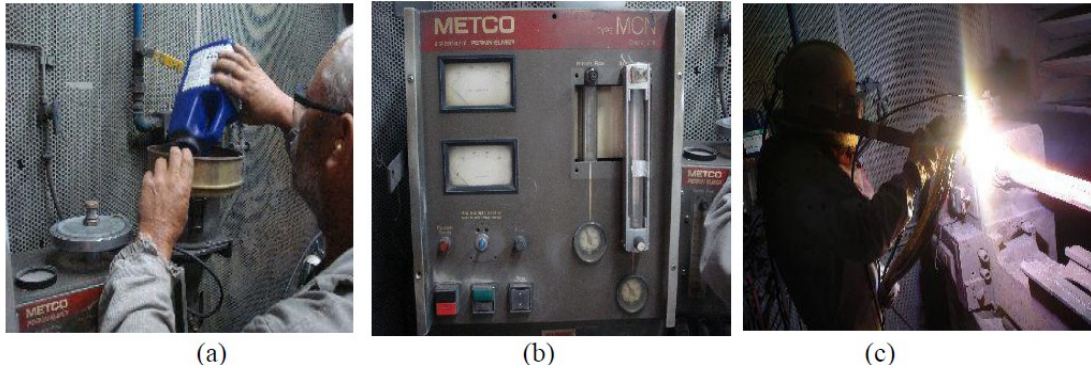
Workshop: Tendências Futuras para Veículos Lançadores



Camada de ligação  
MCrAlY (NiCrAlY)  
Base de dados disponível?



## Camada de ligação – MCrAlY depositada sobre MAR-M247 (Ta/Nb)



**Figura 22:** Micrografia (MEV-ERE) da amostra MAR M247 (Ta) com NiCrAlY aluminizada e oxidação a 1200°C/2h com pontos analisados via EDS

**Figura 19:** Micrografias (MEV-ERE) da amostra MAR M247 (Nb) com NiCrAlY e TT 980°C/64h. (a) Pontos analisados via EDS (b) Espessura da camada depositada.



# 6<sup>o</sup> SeP P&D

Seminário de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em  
Veículos Espaciais e Tecnologias Associadas

Workshop: Tendências Futuras para Veículos Lançadores



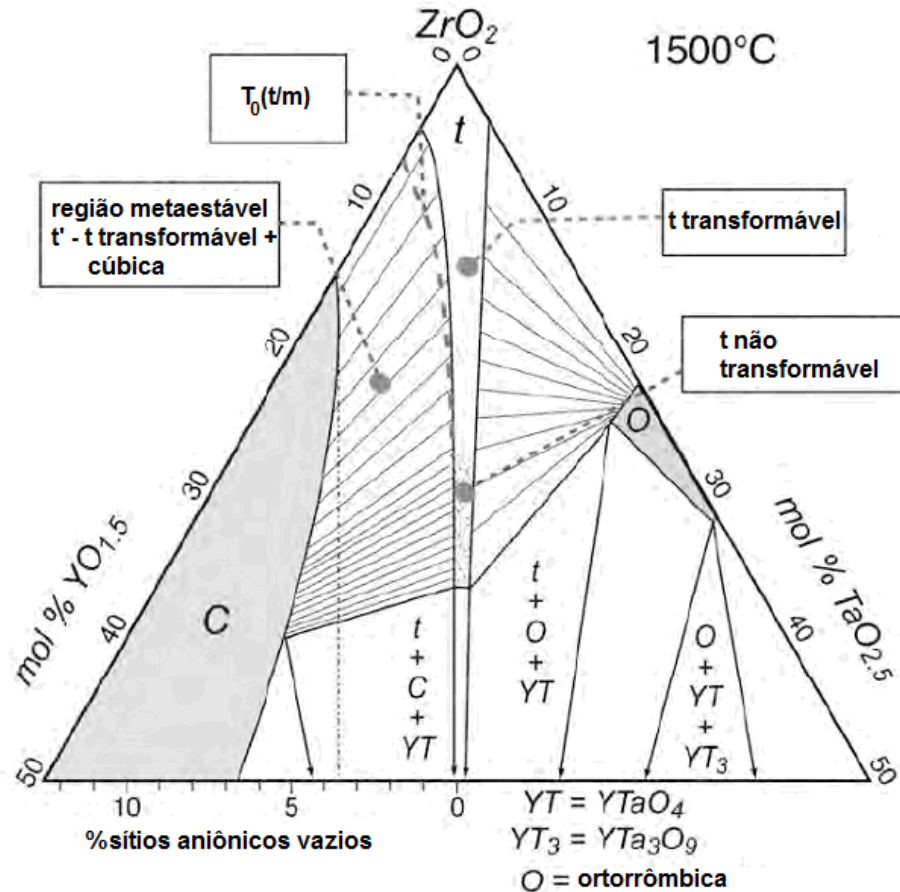
## Thermal Barrier Coating (TBC)

$ZrO_2-Y_2O_3-Nb_2O_5$

Base de dados incipiente ( $ZrO_2-Y_2O_3$ )



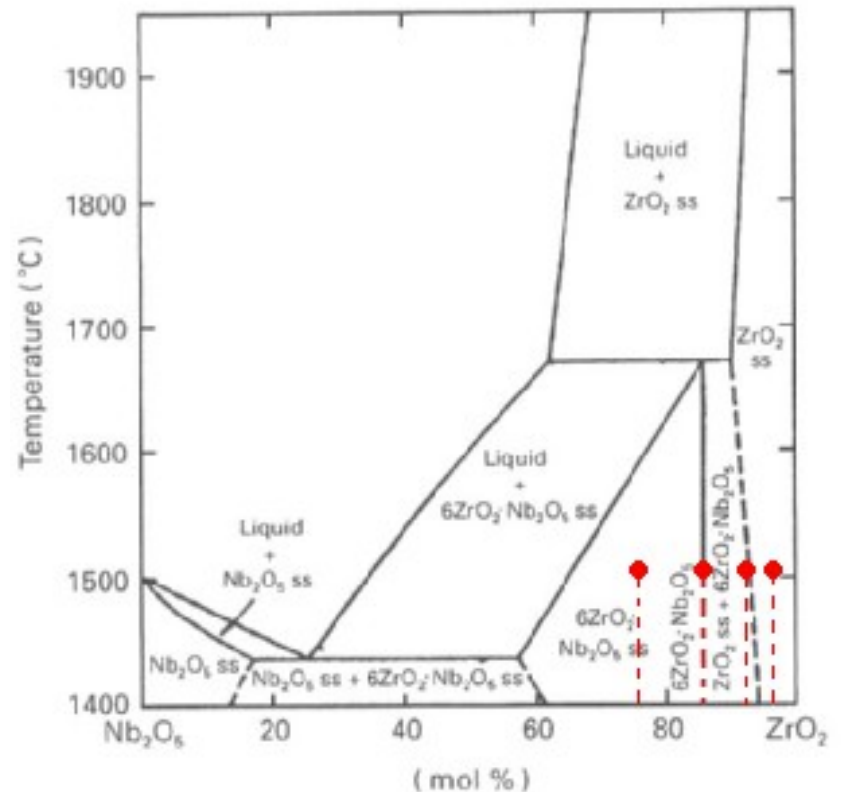
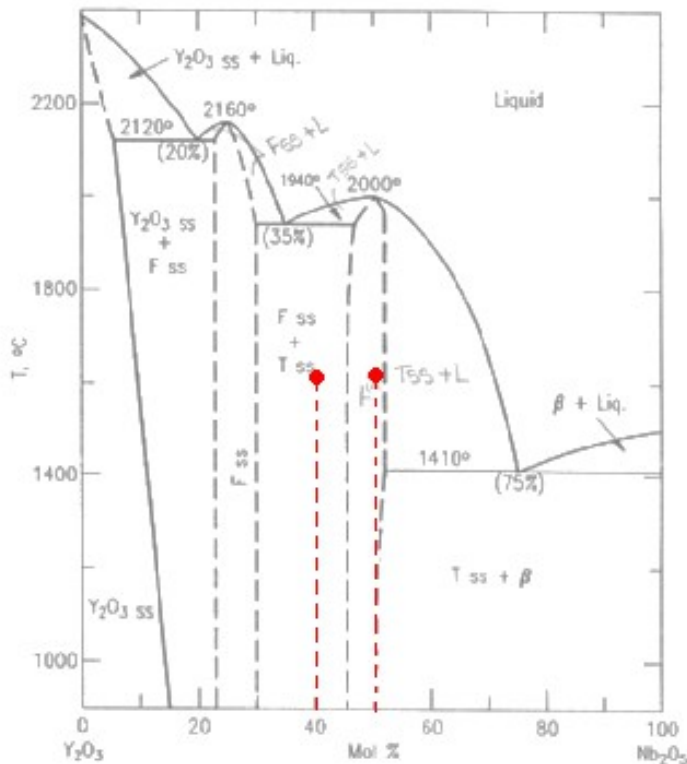
## Estudo do sistema ternário $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $Nb_2O_5$





## Estudo do sistema ternário $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $Nb_2O_5$

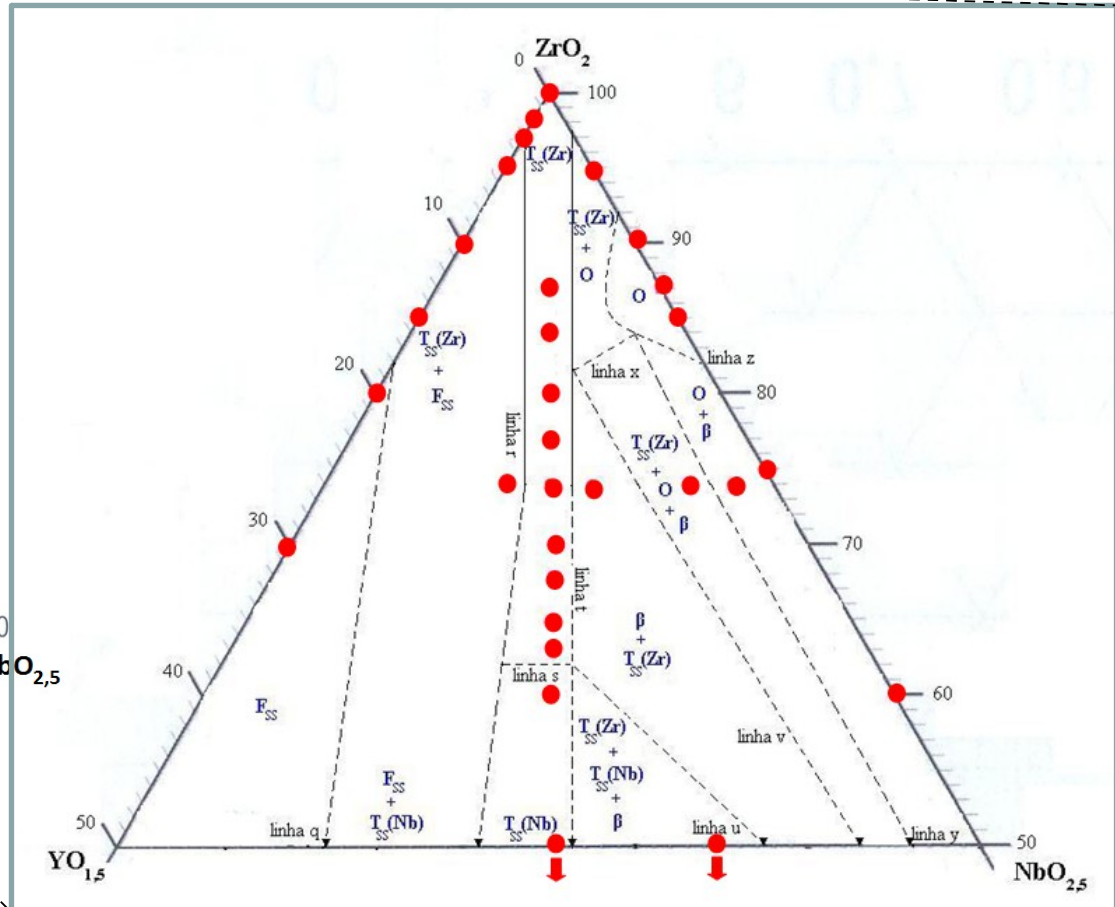
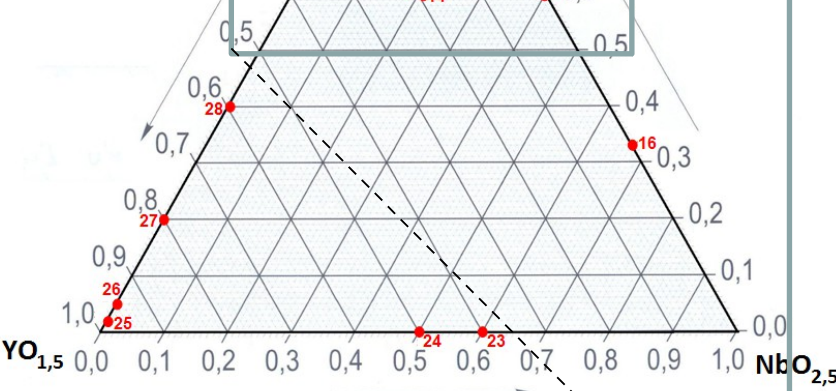
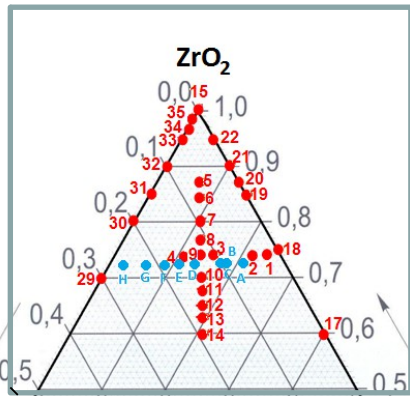
Sinterização 1500°C-1h + 1200°C-60h / DRX / DTA / MEV





## Estudo do sistema ternário $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $Nb_2O_5$

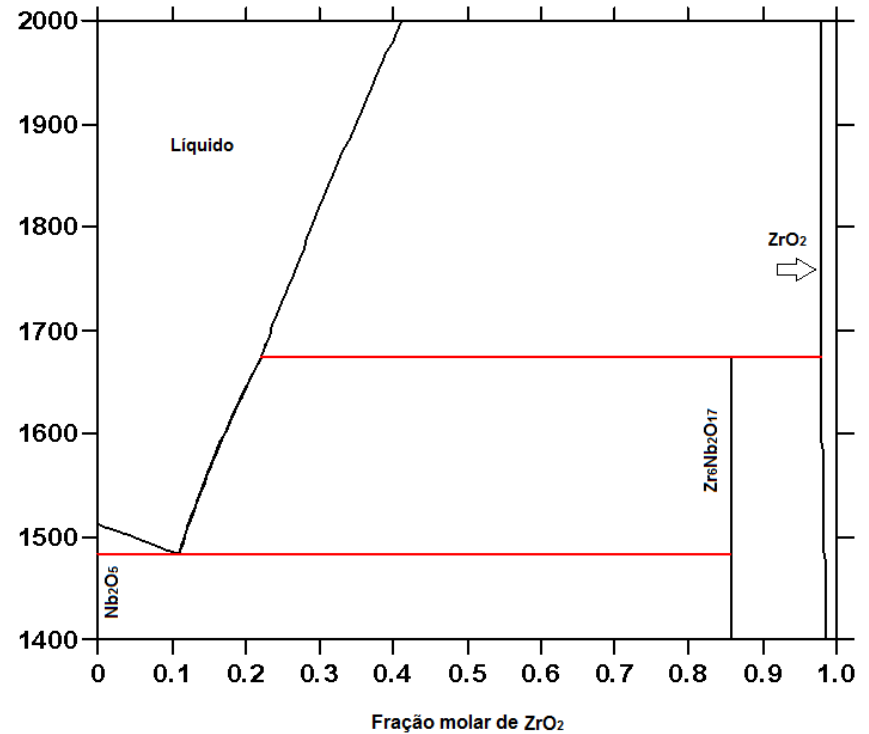
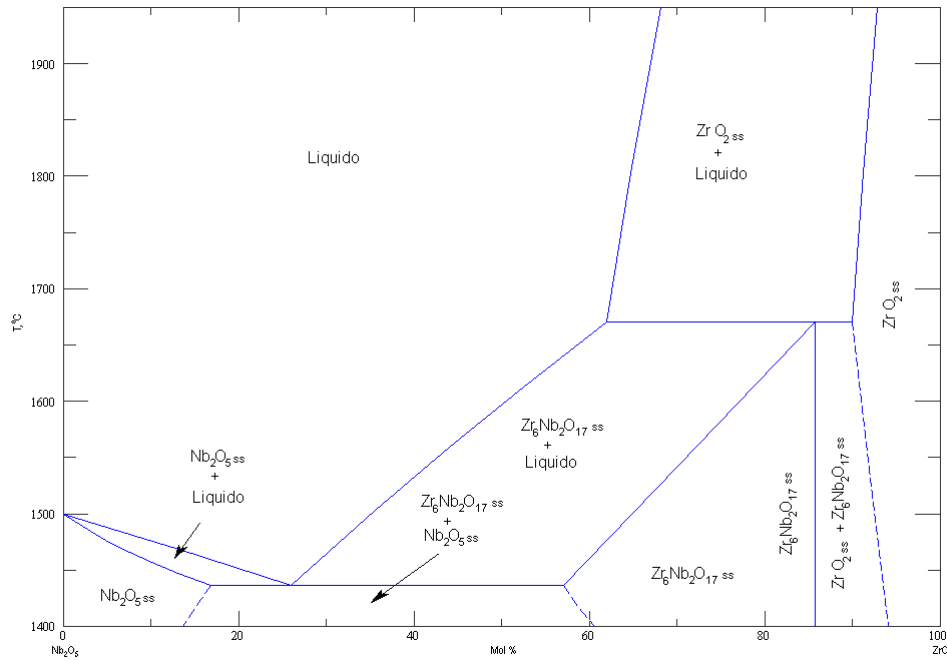
Sinterização  $1500^\circ\text{C}$ -1h +  $1200^\circ\text{C}$ -60h / DRX / DTA / MEV





## Estudo do sistema ternário ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

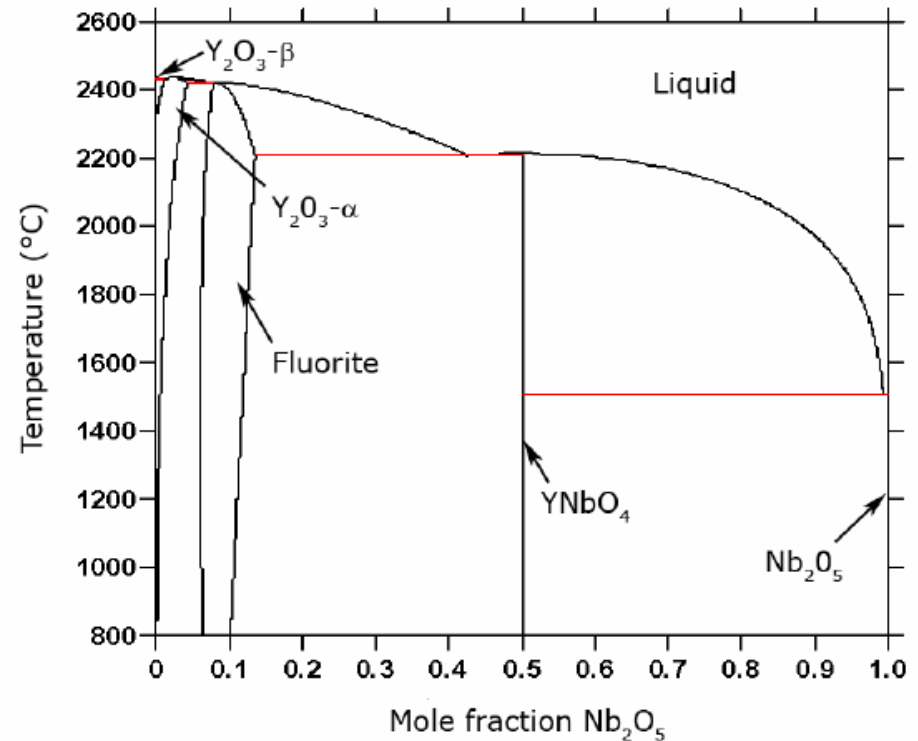
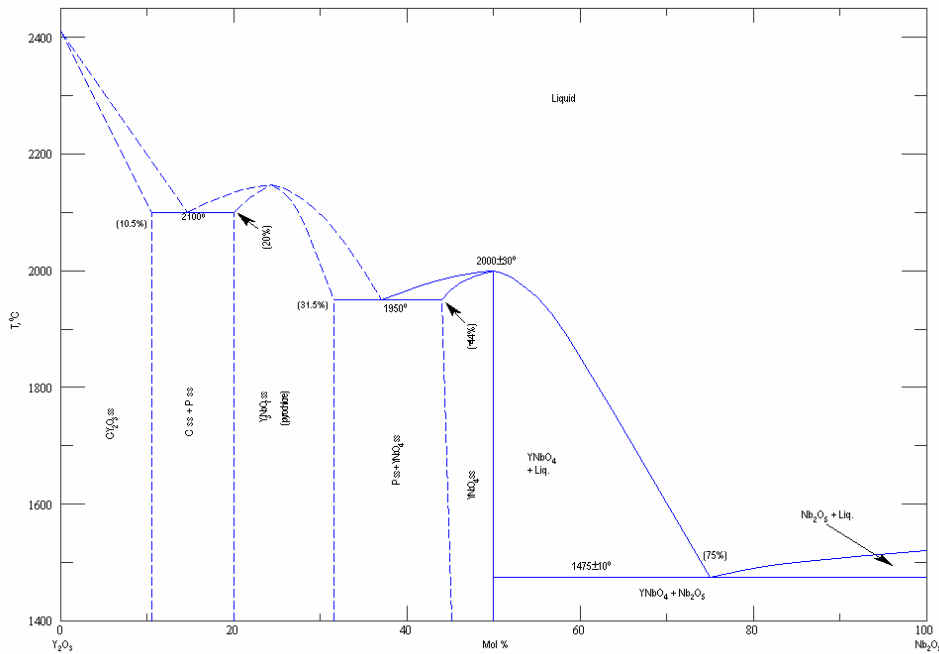
### Sistema binário Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-ZrO<sub>2</sub>





## Estudo do sistema ternário $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $Nb_2O_5$

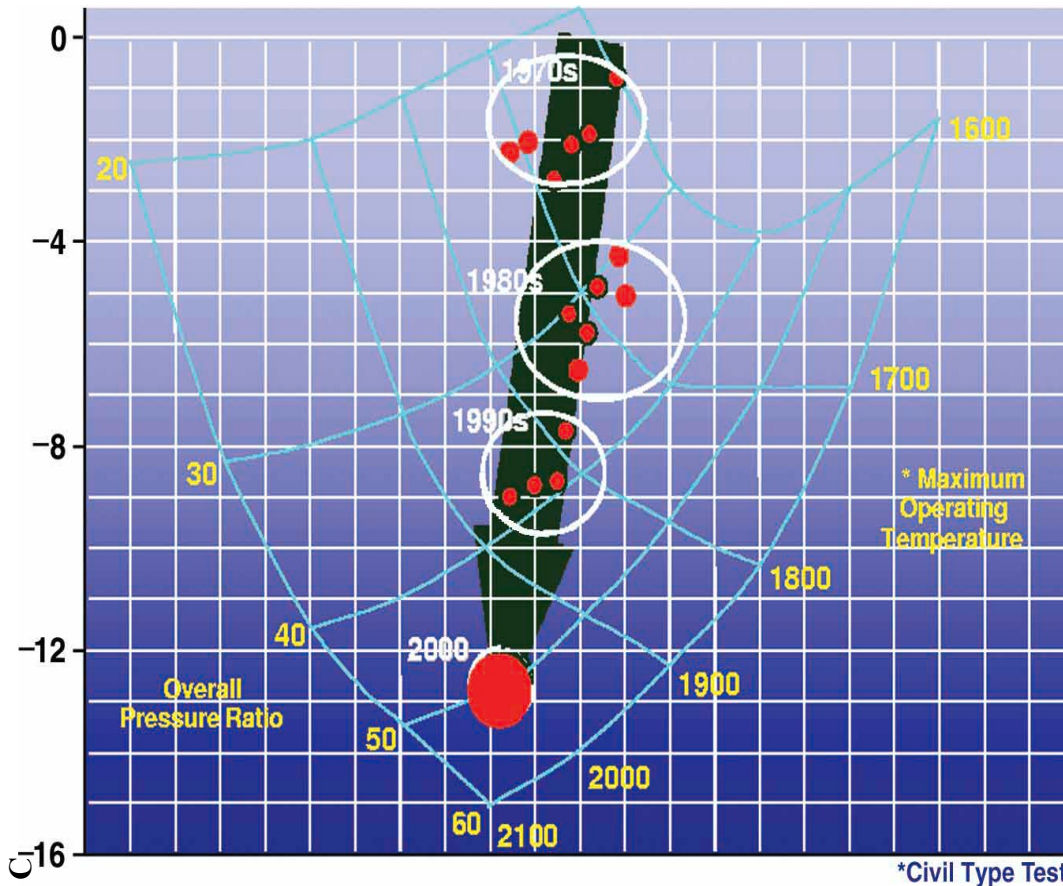
### Sistema binário $Y_2O_3$ - $Nb_2O_5$





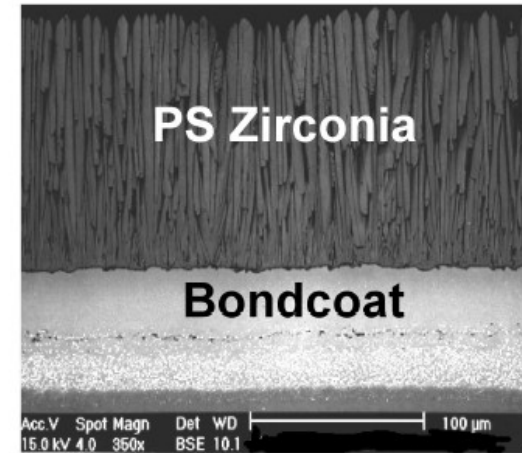
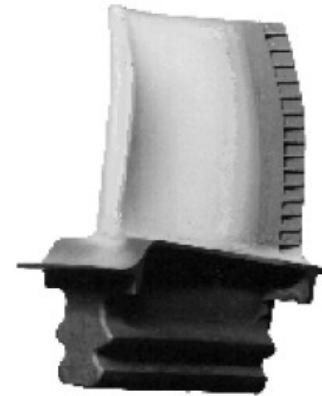
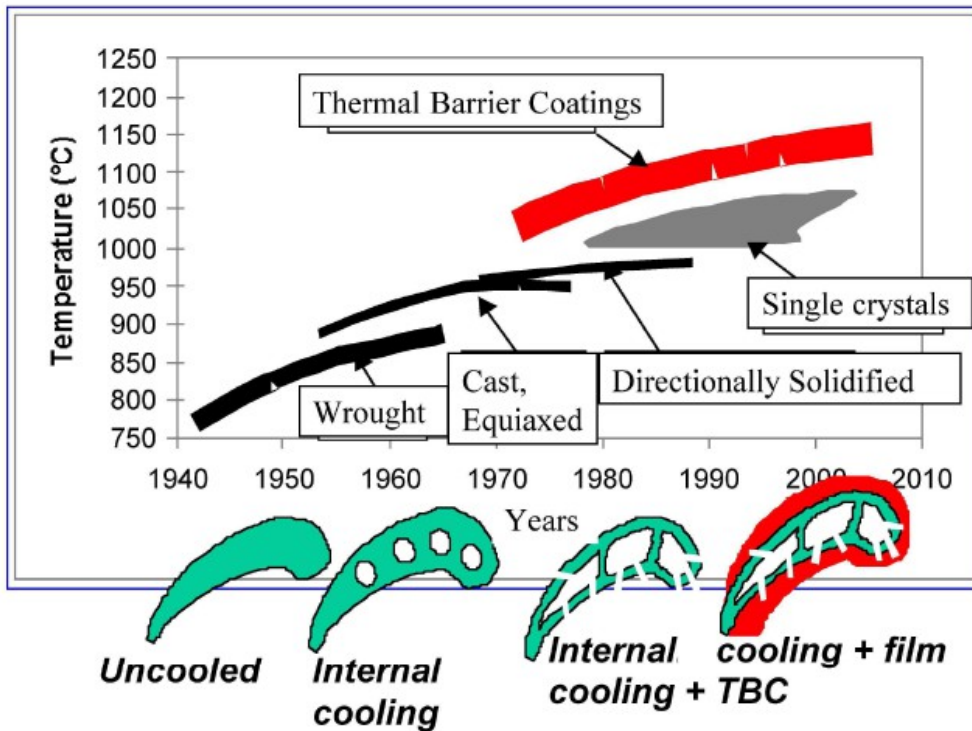


## Perspectivas futuras / desafios a serem vencidos



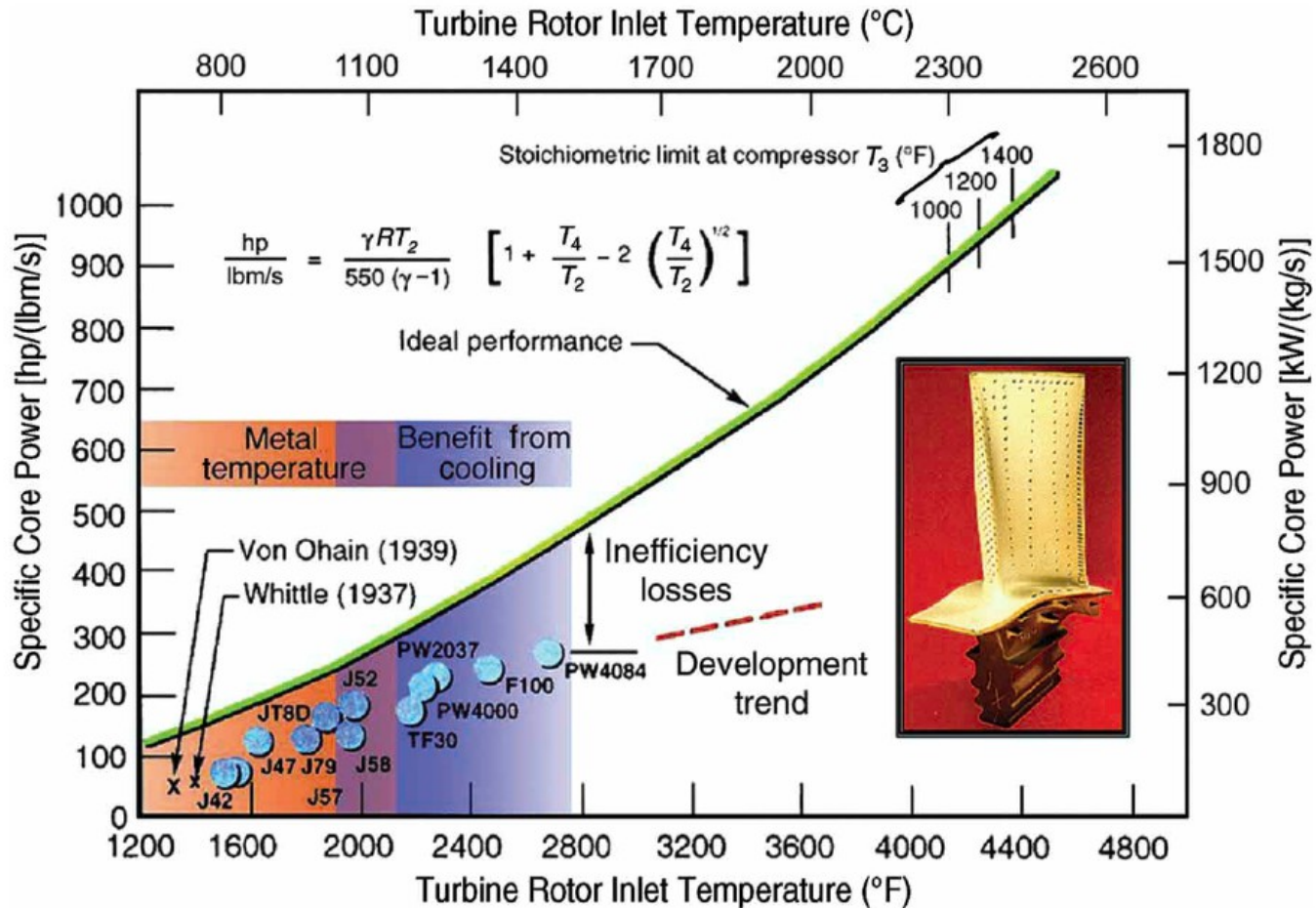


## Perspectivas futuras / desafios a serem vencidos





## Perspectivas futuras / desafios a serem vencidos





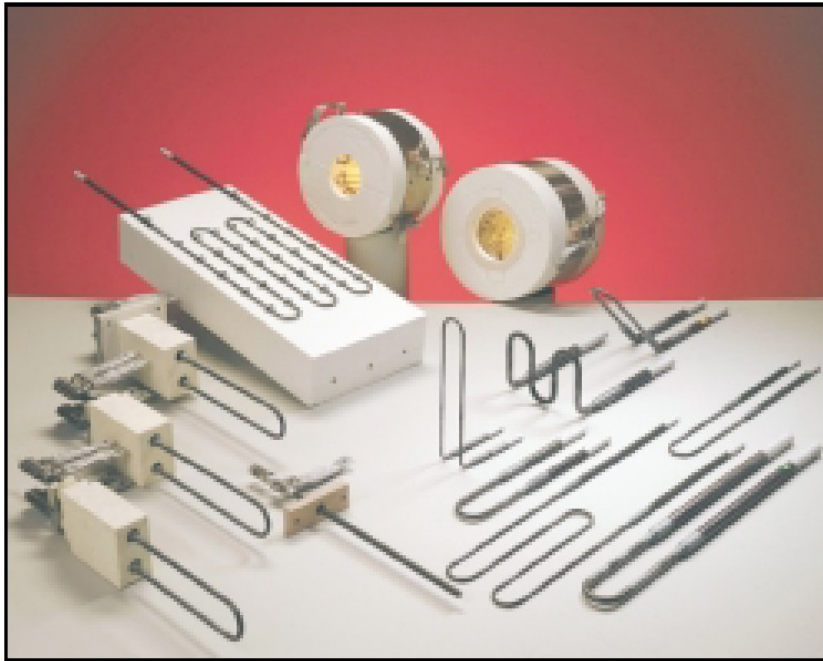
# 6<sup>o</sup> SeP P&D

Seminário de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em Veículos Espaciais e Tecnologias Associadas

Workshop: Tendências Futuras para Veículos Lançadores

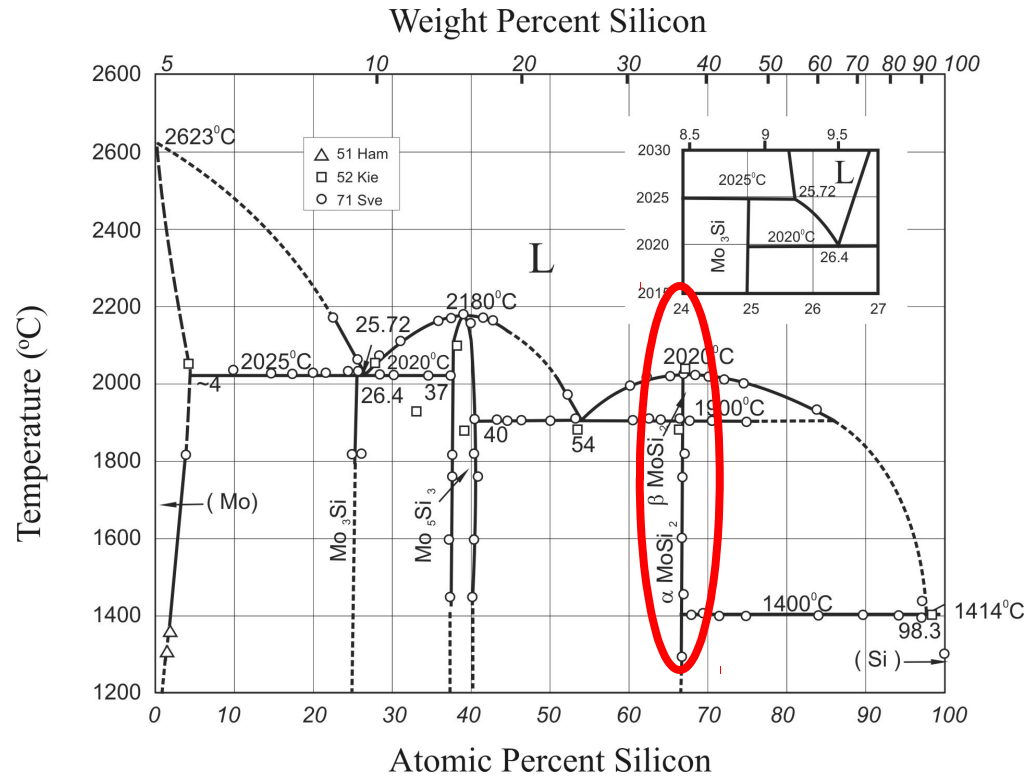


## Perspectivas futuras / desafios a serem vencidos



From the brochure “Kanthal Super”

[www.kanthal.com](http://www.kanthal.com)

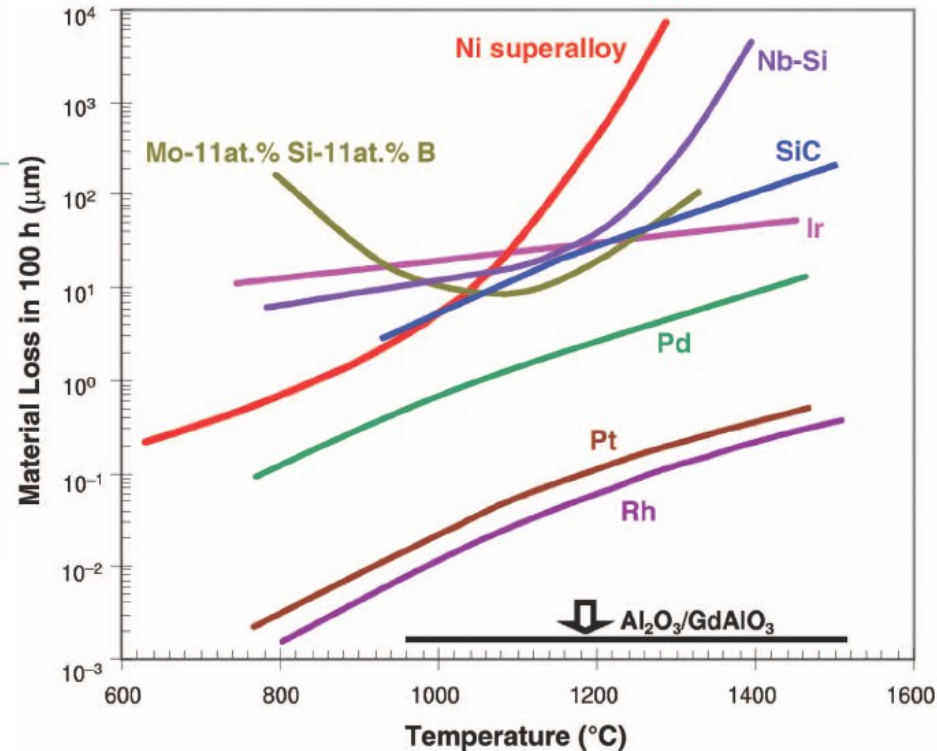
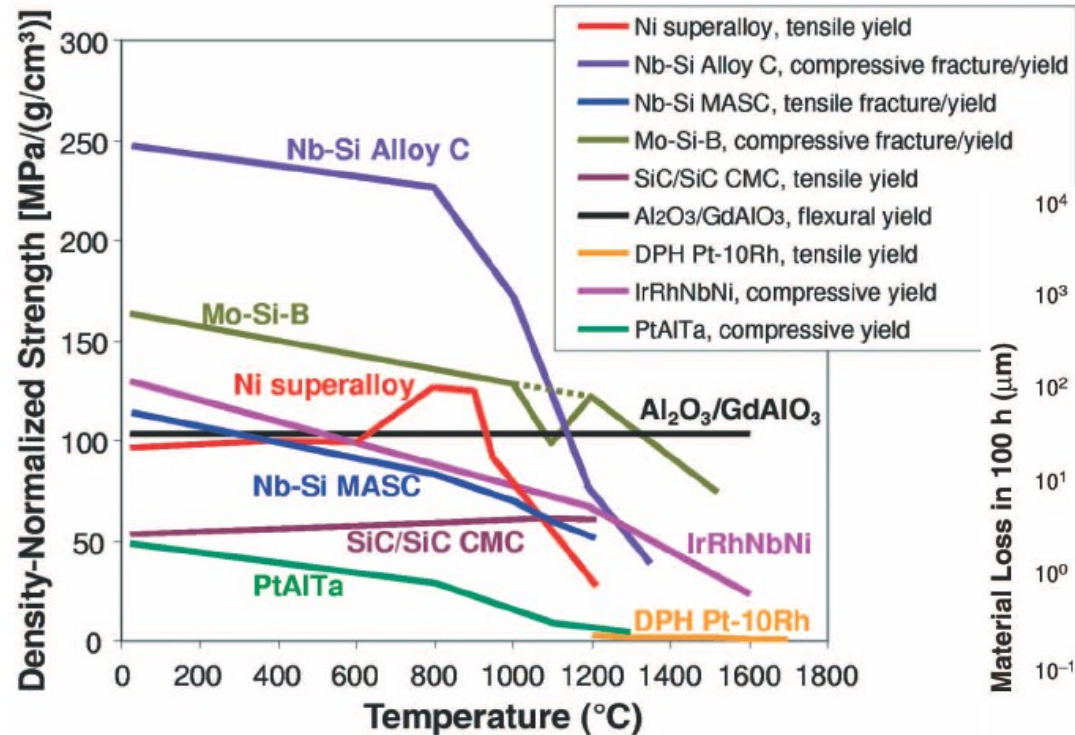


Accepted Mo–Si system

A.B. Gokhale, G.J. Abbaschian, *J. Phase Equilib.* 12(4) (1991) 493-498

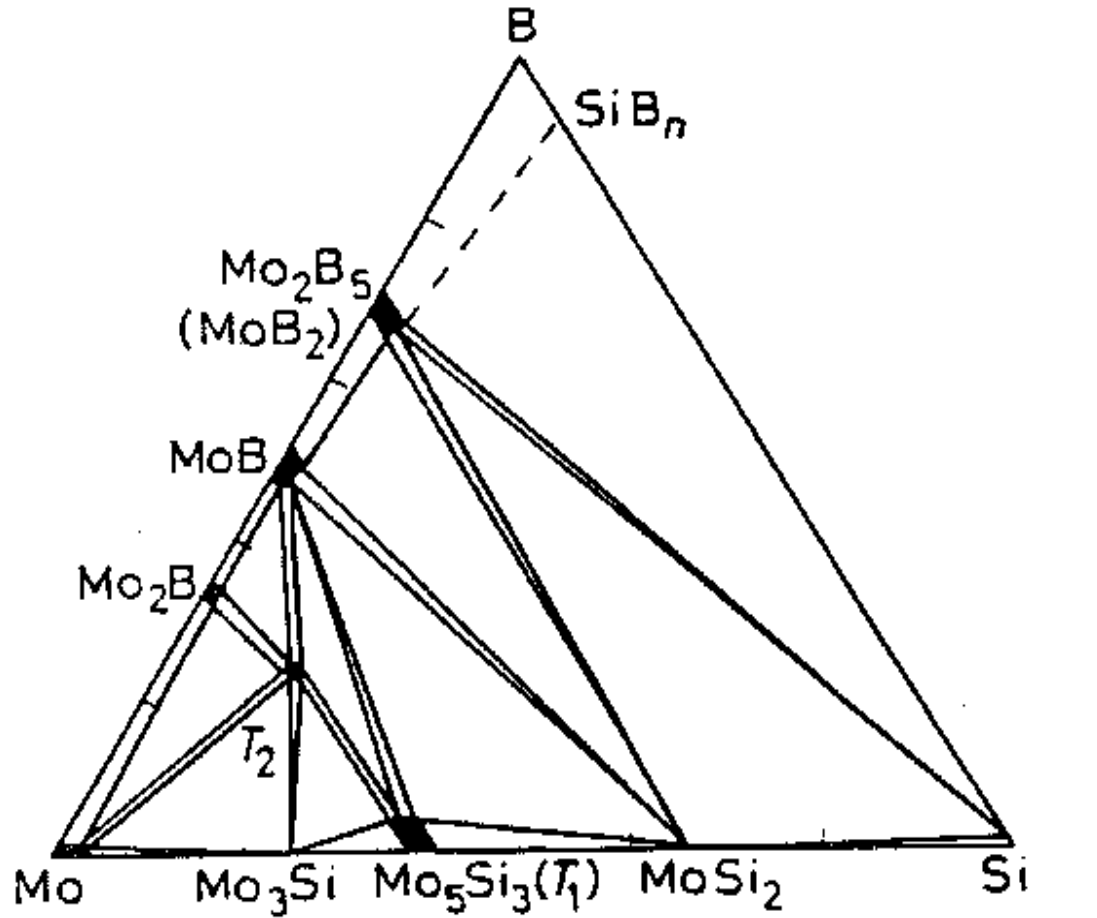


## Perspectivas futuras / desafios a serem vencidos





## Perspectivas futuras / desafios a serem vencidos



Isothermal Section at 1600°C.

H. Nowotny et al., *Monatsh. Chem.* 88 (1957) 180-192.



# 6<sup>o</sup> SeP P&D

Seminário de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em Veículos Espaciais e Tecnologias Associadas

Workshop: Tendências Futuras para Veículos Lançadores



## Agradecimentos

- Laboratórios da AMR – CTA
- EEL-USP
- Laboratório do INPE em Cachoeira Paulista
- AEB



# 6<sup>o</sup> SeP P&D

Seminário de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em Veículos Espaciais e Tecnologias Associadas

Workshop: Tendências Futuras para Veículos Lançadores



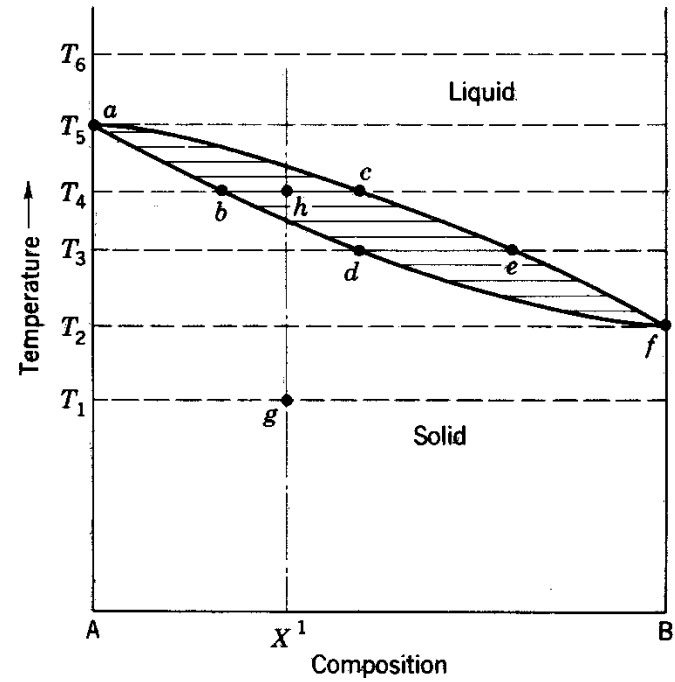




# 6<sup>o</sup> SeP P&D

Seminário de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em Veículos Espaciais e Tecnologias Associadas

Workshop: Tendências Futuras para Veículos Lançadores

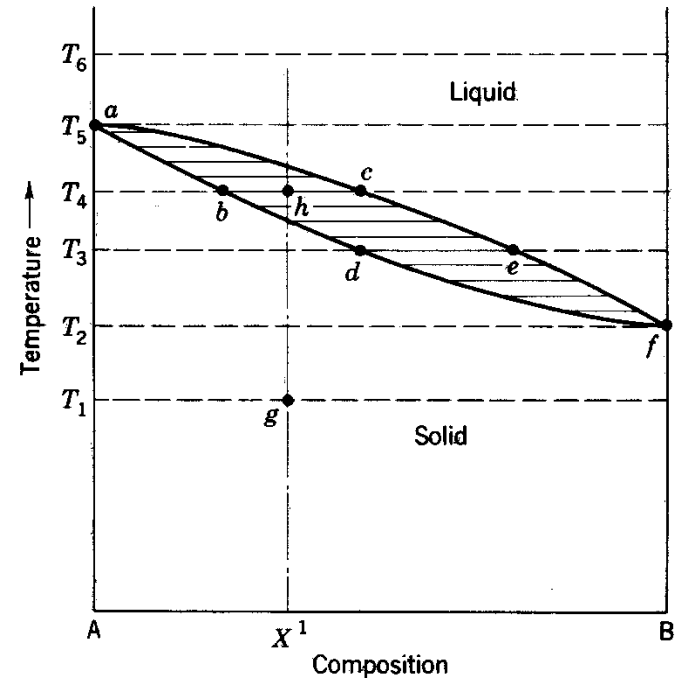
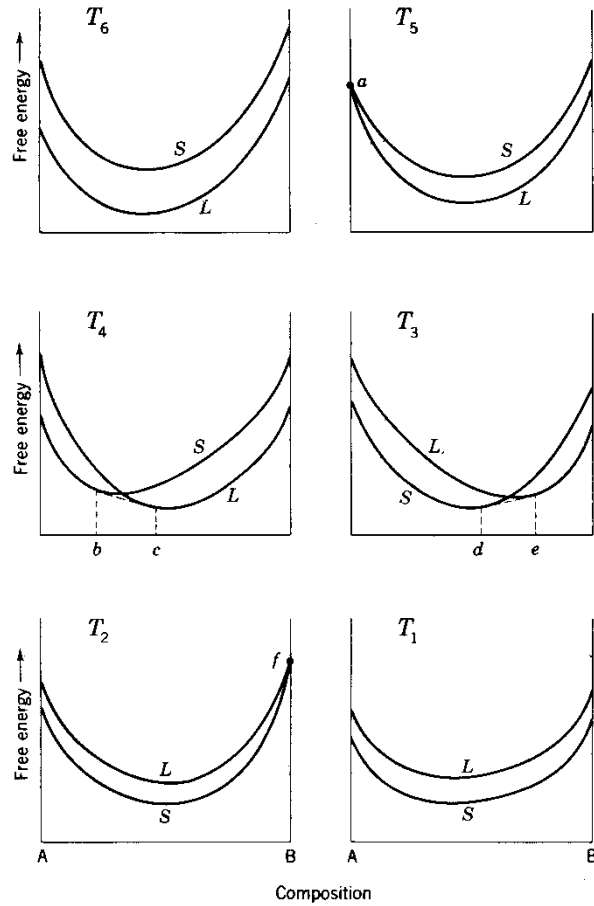




# 6<sup>o</sup> SeP P&D

Seminário de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em Veículos Espaciais e Tecnologias Associadas

Workshop: Tendências Futuras para Veículos Lançadores





# 6<sup>o</sup> SeP P&D

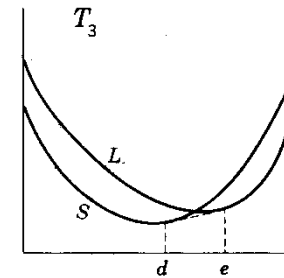
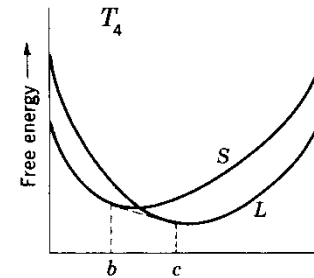
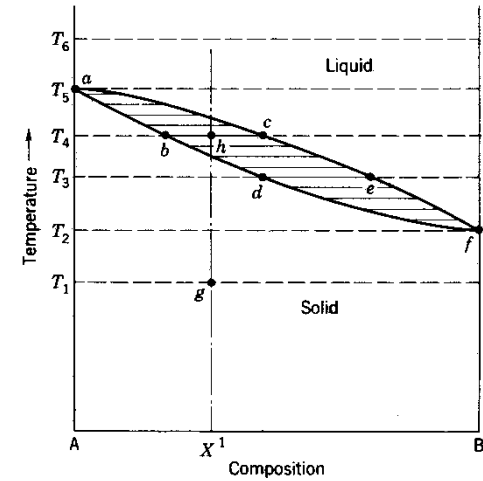
Seminário de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento em Veículos Espaciais e Tecnologias Associadas

Workshop: Tendências Futuras para Veículos Lançadores



- Dependência da Composição

$$G_{\phi} - HSER = \text{ref}G + \text{id}G_{\phi} + \text{EG}_{\phi}$$





- Dependência da Composição

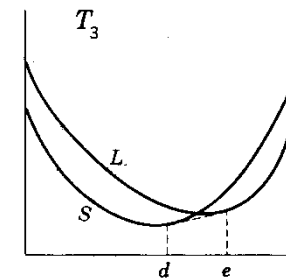
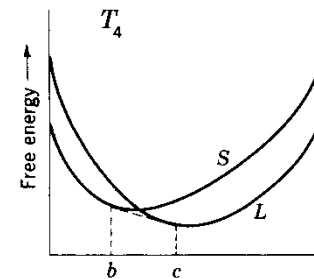
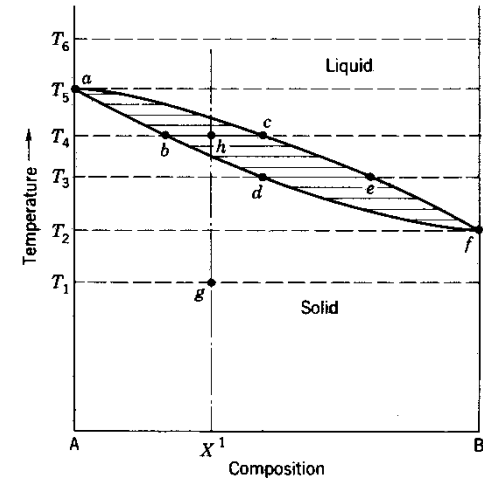
$$G\phi - \text{HSER} = \text{ref}G + \text{id}G\phi + \text{EG}\phi$$

$$\text{ref}G = [\text{°Giref1} (T) - \text{HiSER} (298,15\text{K})] \cdot$$

$x_i +$

$$+ [\text{°Gjref2} (T) - \text{HjSER} (298,15\text{K})]$$

$\cdot x_j$





- Dependência da Composição

$$G\phi - HSER = \text{ref}G + \text{id}G\phi + \text{EG}\phi$$

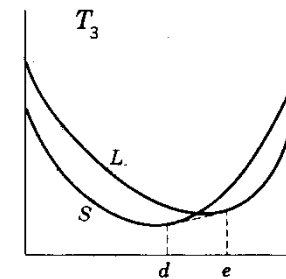
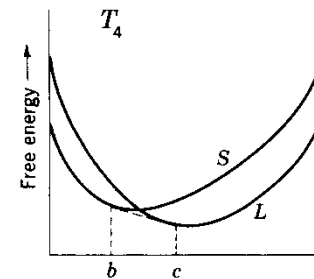
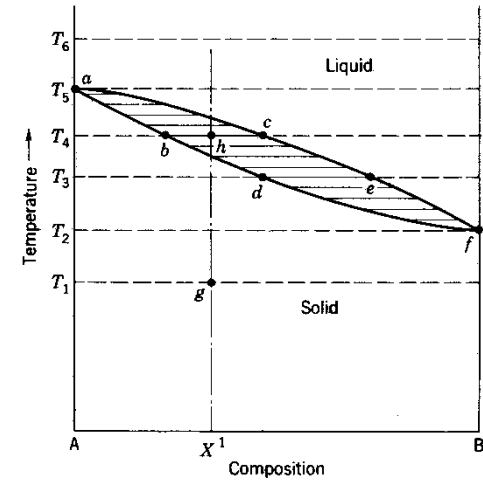
$$\text{ref}G = [\text{°Giref1} (T) - H_{iSER} (298,15K)] \cdot$$

$x_i +$

$$+ [\text{°Gjref2} (T) - H_{jSER} (298,15K)]$$

$\cdot x_j$

$$\text{id}G\phi = R \cdot T \cdot [x_i \cdot \ln(x_i) + x_j \cdot \ln(x_j)]$$





- Dependência da Composição

$$G\phi - HSER = \text{ref}G + \text{id}G\phi + \text{EG}\phi$$

$$\text{ref}G = [\text{°Giref1} (T) - \text{HiSER} (298,15\text{K})] \cdot$$

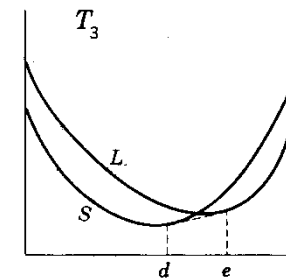
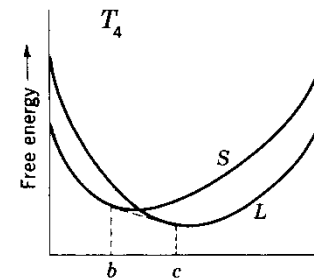
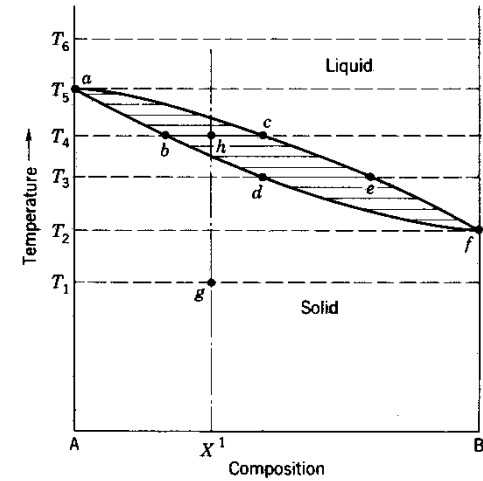
$x_i +$

$$+ [\text{°Gjref2} (T) - \text{HjSER} (298,15\text{K})]$$

$\cdot x_j$

$$\text{id}G\phi = R \cdot T \cdot [x_i \cdot \ln(x_i) + x_j \cdot \ln(x_j)]$$

$$\text{EG}\phi = x_i \cdot x_j \cdot [L_0 + L_1 \cdot (x_i - x_j) + \dots]$$





- Dependência da Composição

$$G_{\phi} - H_{SER} = \text{ref}G + \text{id}G_{\phi} + \text{EG}_{\phi}$$

$$\text{ref}G = [{}^{\circ}G_{\text{iref1}}(T) - H_{\text{iSER}}(298,15\text{K})] \cdot x_i +$$

$$+ [{}^{\circ}G_{\text{jref2}}(T) - H_{\text{jSER}}(298,15\text{K})]$$

$\cdot x_j$

$$\text{id}G_{\phi} = R \cdot T \cdot [x_i \cdot \ln(x_i) + x_j \cdot \ln(x_j)]$$

$$\text{EG}_{\phi} = x_i \cdot x_j \cdot [L_0 + L_1 \cdot (x_i - x_j) + \dots]$$

- Dependência da Temperatura

$${}^{\circ}G_i - H_{\text{iSER}} = A + B \cdot T + C \cdot T \cdot \ln(T) + \dots$$

