



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de Lorena – EEL

“LOM3228 - MÉTODOS EXPERIMENTAIS DA FÍSICA I”

Prof. Dr. Durval Rodrigues Junior

Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR)

Escola de Engenharia de Lorena (EEL)

Universidade de São Paulo (USP)

Polo Urbo-Industrial, Gleba AI-6 - Lorena, SP 12600-970

durval@demar.eel.usp.br

www.eel.usp.br – Comunidade – Docentes (Página dos professores)

Rodovia Itajubá-Lorena, Km 74,5 - Caixa Postal 116
CEP 12600-970 - Lorena - SP
Fax (12) 3153-3133
Tel. (Direto) (12) 3159-5007/3153-3209

USP Lorena
www.eel.usp.br

Polo Urbo-Industrial Gleba AI-6 - Caixa Postal 116
CEP 12600-970 - Lorena - SP
Fax (12) 3153-3006
Tel. (PABX) (12) 3159-9900

Materiais Criogênicos

O que acontece com os materiais em Baixas Temperaturas?

- ✓ PROPRIEDADES MECÂNICAS mudam.
- ✓ PROPRIEDADES TÉRMICAS mudam.
- ✓ PROPRIEDADES ELÉTRICAS mudam.
- ✓ PERDEM DUCTILIDADE.
- ✓ GRANDE CONTRAÇÃO TÉRMICA.
- ✓ FADIGA TÉRMICA ACENTUADA.
- ✓ SOLDAS ROMPEM.
- ✓ POLÍMEROS E PLÁSTICOS FICAM FRÁGEIS.
- ✓ NÃO AGUENTAM CHOQUES.

Materiais Criogênicos

Materiais recomendados

AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS DA SÉRIE 300, COMO O 304, 304L, 316, 321, 304LN, 316LN

- ✓ Os aços-inoxidáveis são aqueles que contêm um mínimo de 10,5% de cromo como principal elemento de liga.
- ✓ São aços onde não ocorre oxidação em ambientes normais.
- ✓ Suas características de resistência são obtidas graças à formação de um óxido protetor que impede o contato do metal base com a atmosfera agressiva.
- ✓ Alguns outros elementos como níquel, molibdênio, cobre, titânio, alumínio, silício, nióbio, nitrogênio e selênio podem ser adicionados para a obtenção de características mecânicas particulares.
- ✓ Os aços inoxidáveis são divididos em cinco famílias, de acordo com a microestrutura, estrutura cristalina das fases presentes ou tratamento térmico utilizado:
 - ✓ martensíticos, não indicados para uso em criogenia
 - ✓ ferríticos, não indicados para uso em criogenia
 - ✓ austeníticos, indicados para uso em criogenia
 - ✓ duplex (austenítico e ferrítico), não indicados
 - ✓ endurecíveis por precipitação, não indicados.

Materiais Criogênicos

Materiais recomendados

- ✓ COBRE OFHC (*Oxygen Free High Conductivity*) e cobre deoxidizado
- ✓ BRONZE
- ✓ LIGAS DE ALUMÍNIO: 6061, 6063, 1100 (ricas em Al)
- ✓ TITÂNIO, NIÓBIO, geralmente usados em sistemas supercondutores
- ✓ INVAR (liga de Ni e Fe) usado em arruelas pelo baixo coeficiente de dilatação
- ✓ ÍNDIO (usado em vedações)
- ✓ KAPTON, MYLAR, KEL-F, usados como isolantes elétricos e isolamento multicamadas
- ✓ QUARTZO, usado em janelas óticas
- ✓ FIBRAS DE VIDRO EPÓXI do tipo G-10 e G-11

Materiais Criogênicos

Materiais não Recomendados

- ✓ Aços Martensíticos, sofrem transição dúctil para frágil quando resfriado.
- ✓ Ferro Fundido, também se torna quebradiço.
- ✓ Os aços ao carbono, também se tornam frágeis.
- ✓ Borrachas, Teflon e a maioria dos plásticos, ficam frágeis.
- ✓ Isolamento comum de fios e cabos elétricos, ficam frágeis.

Materiais Criogênicos

Propriedades a 77K e 300K

MATERIAL	Tensão de Ruptura [MPa]		Condutividade Térmica [W/m.K]		RAZÃO	
	77K	300K	77K	300K	77K	300K
Liga de Alumínio 5083-0	415	305	55	120	7,5	2,5
Invar	900	500	6,5	14	138,5	35,7
Aço Inox 304	1600	650	8	15	200	43,3
Fibra de Vidro Epóxi	800	400	0,4	0,8	2000	500

Materiais Criogênicos

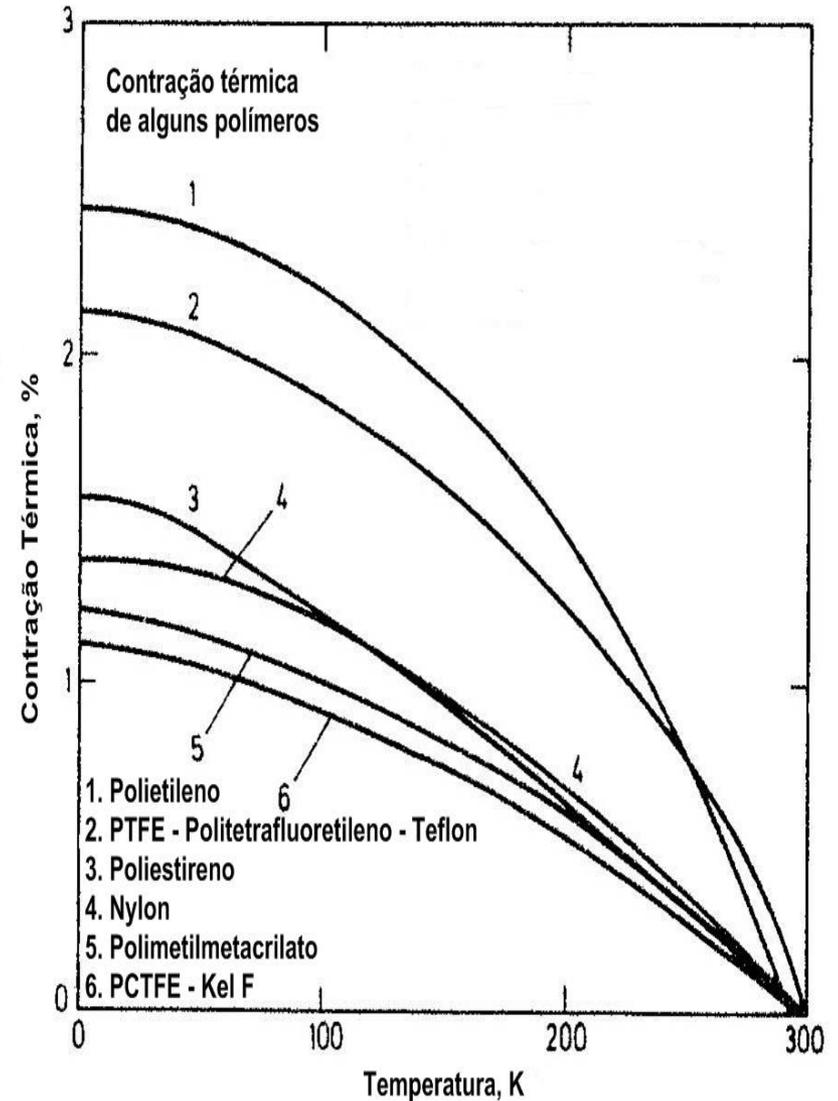
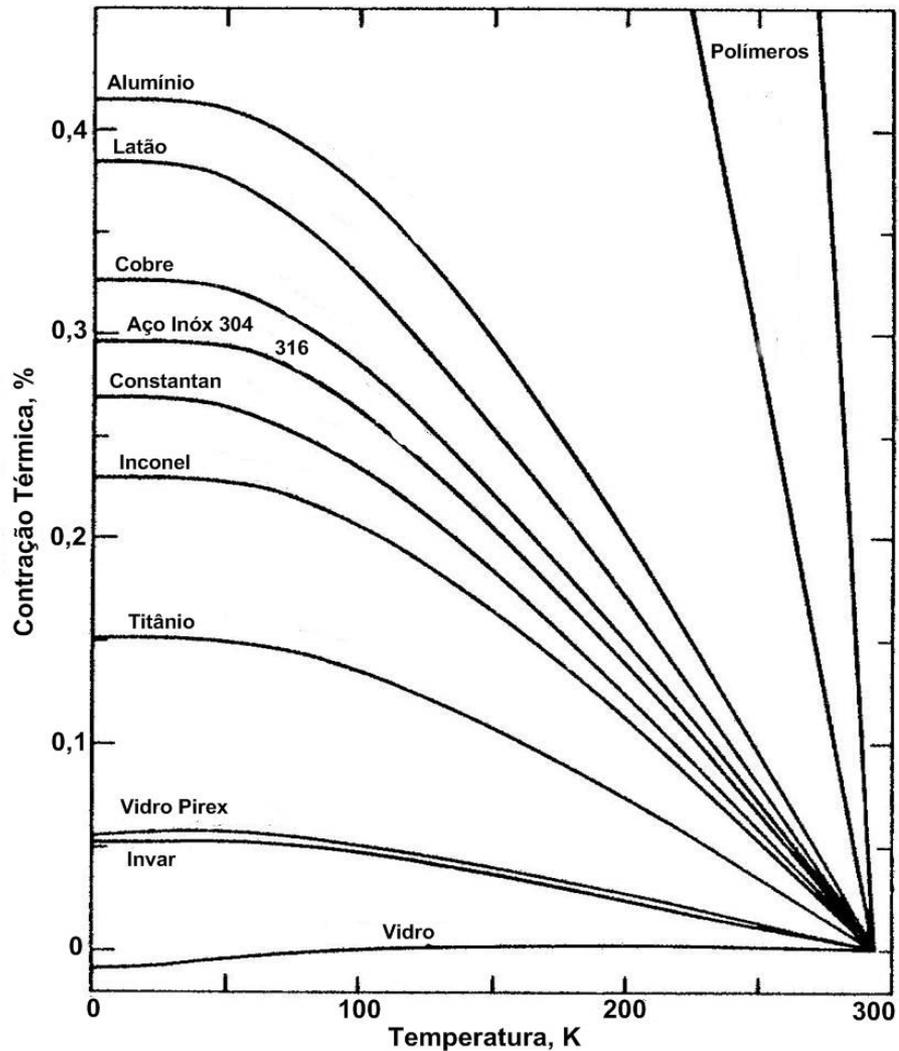
Contração Térmica

Enormes contrações podem ocorrer até as temperaturas criogênicas, significando:

- ✓ Impactos no alinhamento e empacotamento atômico.
- ✓ Desenvolvimento de interferências ou espaços vazios entre materiais diferentes.
- ✓ Grande aumento de tensões e possível falha.
- ✓ Quebra ou alongação de fiações elétricas e de controle.

Materiais Criogênicos

Contração Térmica



Materiais Criogênicos

Contração Térmica

Material	$\Delta L / L$ (300-100K)	$\Delta L / L$ (100-4K)
Aço Inoxidável	296×10^{-5}	35×10^{-5}
Cobre	326×10^{-5}	44×10^{-5}
Alumínio	415×10^{-5}	47×10^{-5}
Ferro	198×10^{-5}	18×10^{-5}
Invar	40×10^{-5}	-
Bronze	340×10^{-5}	57×10^{-5}
Epóxi / fibra de vidro	279×10^{-5}	47×10^{-5}
Titânio	134×10^{-5}	17×10^{-5}

- ✓ Uma barra de Aço Inox de 1m (1000mm) contrai $\Delta L = 1000 \times 0,00296 = 2,96$ mm.
- ✓ Os polímeros podem contrair até 3%, sendo que os metais e os vidros contraem menos que 0,4%.

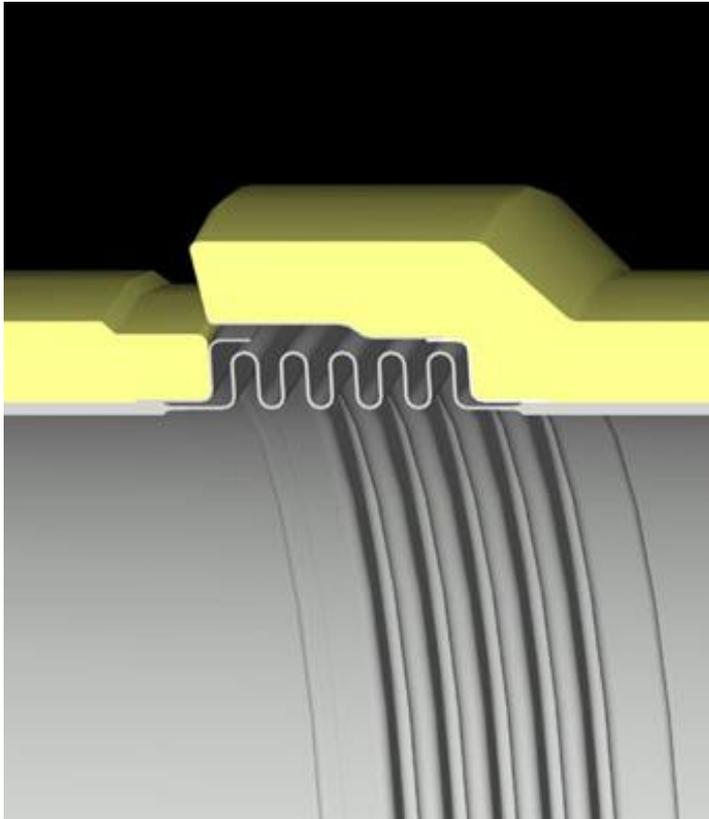
Materiais Criogênicos

Conclusões

- As propriedades dos materiais mudam drasticamente quando resfriados a temperaturas criogênicas. Esta variação deve ser permitida no projeto do sistema.
- As propriedades térmicas e elétricas de materiais variam de uma forma altamente não-linear, quando resfriados a temperaturas criogênicas, dificultando suas estimativas.
- A base física das variações nas propriedades térmicas e elétricas são compreendidas através da mecânica quântica e da física do estado sólido.
- A tendência geral tem demonstrado que materiais específicos devem ser sempre utilizados.

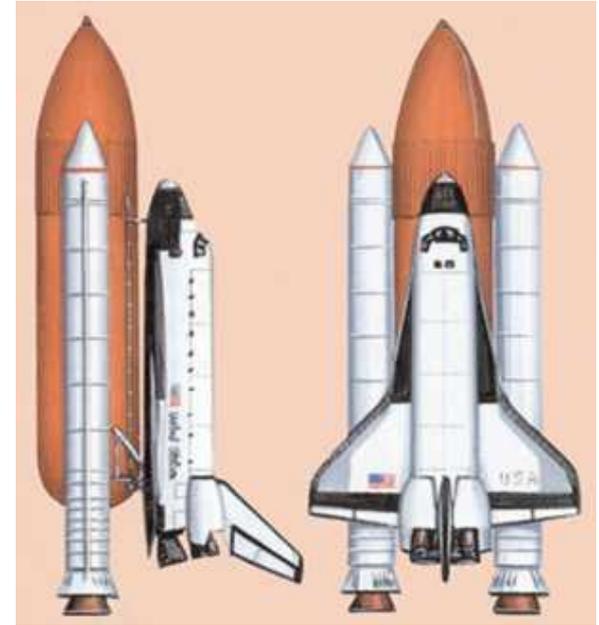
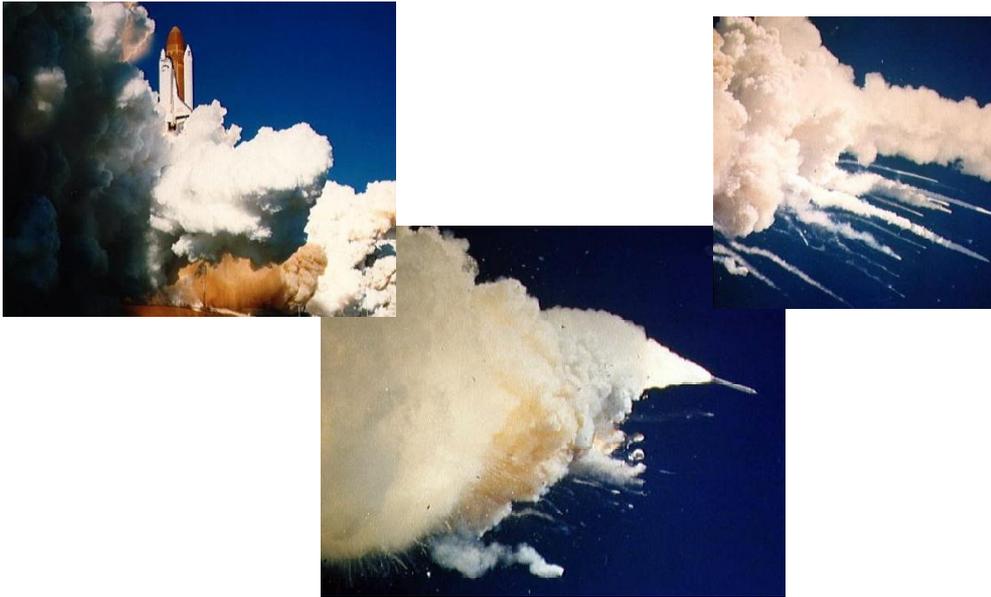
Materiais Criogênicos

Acidente no CERN pelo vazamento de LHe



Materiais Criogênicos

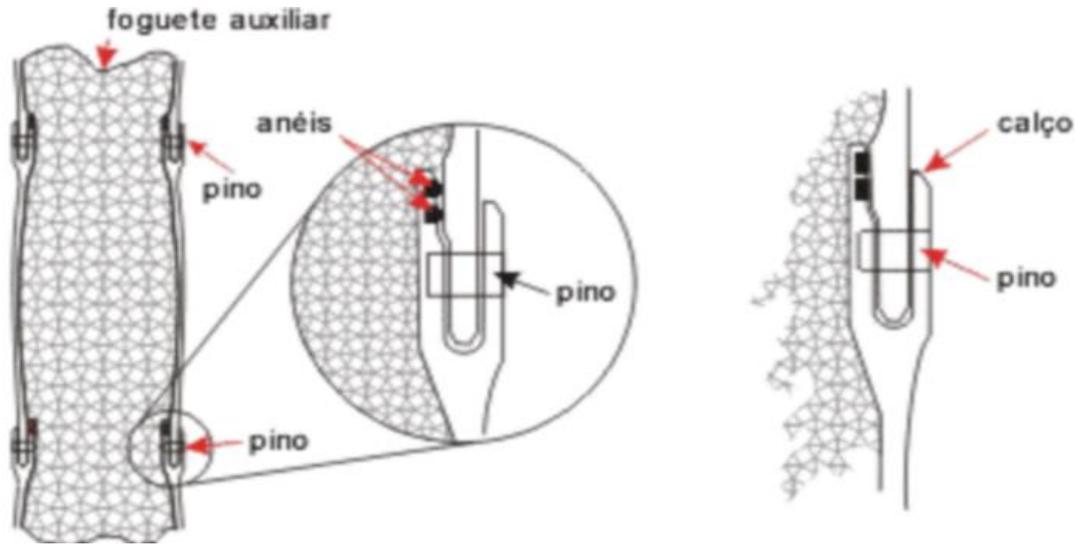
Acidente no *Space Shuttle* - Ruptura de O'ring



- ✓ Na manhã de 28 de Janeiro de 1986, a previsão meteorológica para Cabo Canaveral apontava para uma temperatura de 2,2°C. A nave Challenger preparava-se para iniciar o seu 10º voo e a 25ª missão deste tipo de naves.
- ✓ Sob baixas temperaturas, as juntas não funcionaram como inicialmente se esperava na sua concepção.
- ✓ O ônibus espacial está acoplado a um grande tanque externo de combustível líquido (oxigênio e hidrogênio) e a dois foguetes auxiliares colocados um de cada lado do tanque externo. Os foguetes auxiliares consomem combustível sólido e o tanque externo abastece os motores do ônibus, situados em sua traseira.

Materiais Criogênicos

Acidente no *Space Shuttle* - Ruptura de O'ring



- ✓ Na junção de duas partes há um anel de borracha que faz a vedação. A enorme pressão no interior do foguete fazia com que a parede sofresse uma pequena deformação, ocasionando um deslocamento do anel.
- ✓ Assim, para manter a vedação e impedir o vazamento de gases, a borracha deveria ter grande elasticidade para, em frações de segundo, fechar a passagem. Para remediar o problema, os engenheiros colocaram calços para manter as juntas retas.
- ✓ Mas, a cada vez que os foguetes eram utilizados, deformações adicionais apareciam, provocando, às vezes, pequenos vazamentos. Havia, portanto, a necessidade de resolver o problema.
- ✓ No entanto, apesar dos avisos dos engenheiros, os chefes da NASA decidiram lançar o Challenger.

■ **Agradecimentos: Ao Prof. MSc. Johnson Ordoñez, IFGW, UNICAMP.**