



ESCOLA
POLITÉCNICA
DA USP

Materiais poliméricos de alto desempenho para aplicações na Indústria em geral

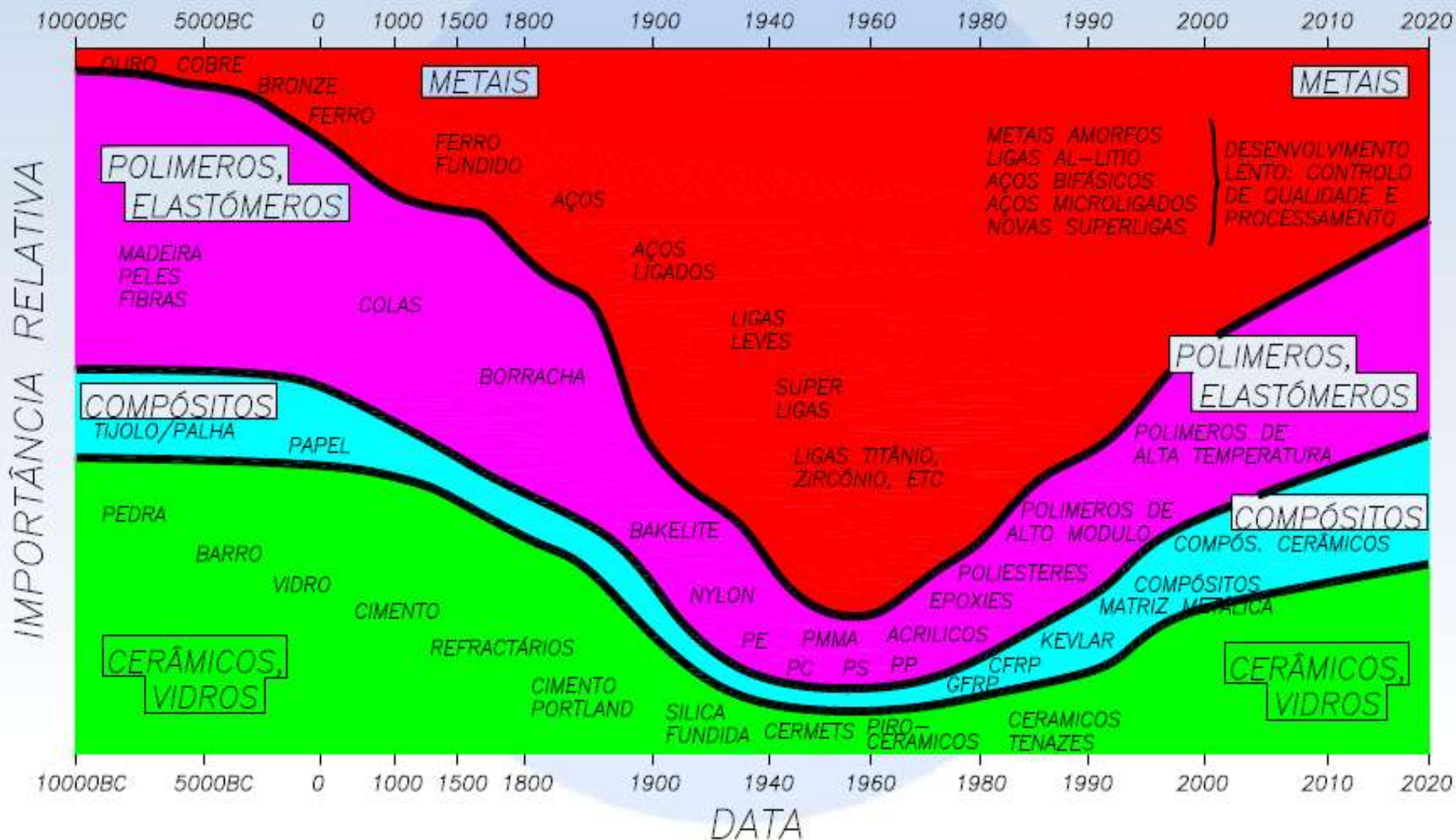
Prof. Dr. Hélio Wiebeck

Marcus Vinicius Seixas

Novembro 2012



Evolução da utilização dos materiais

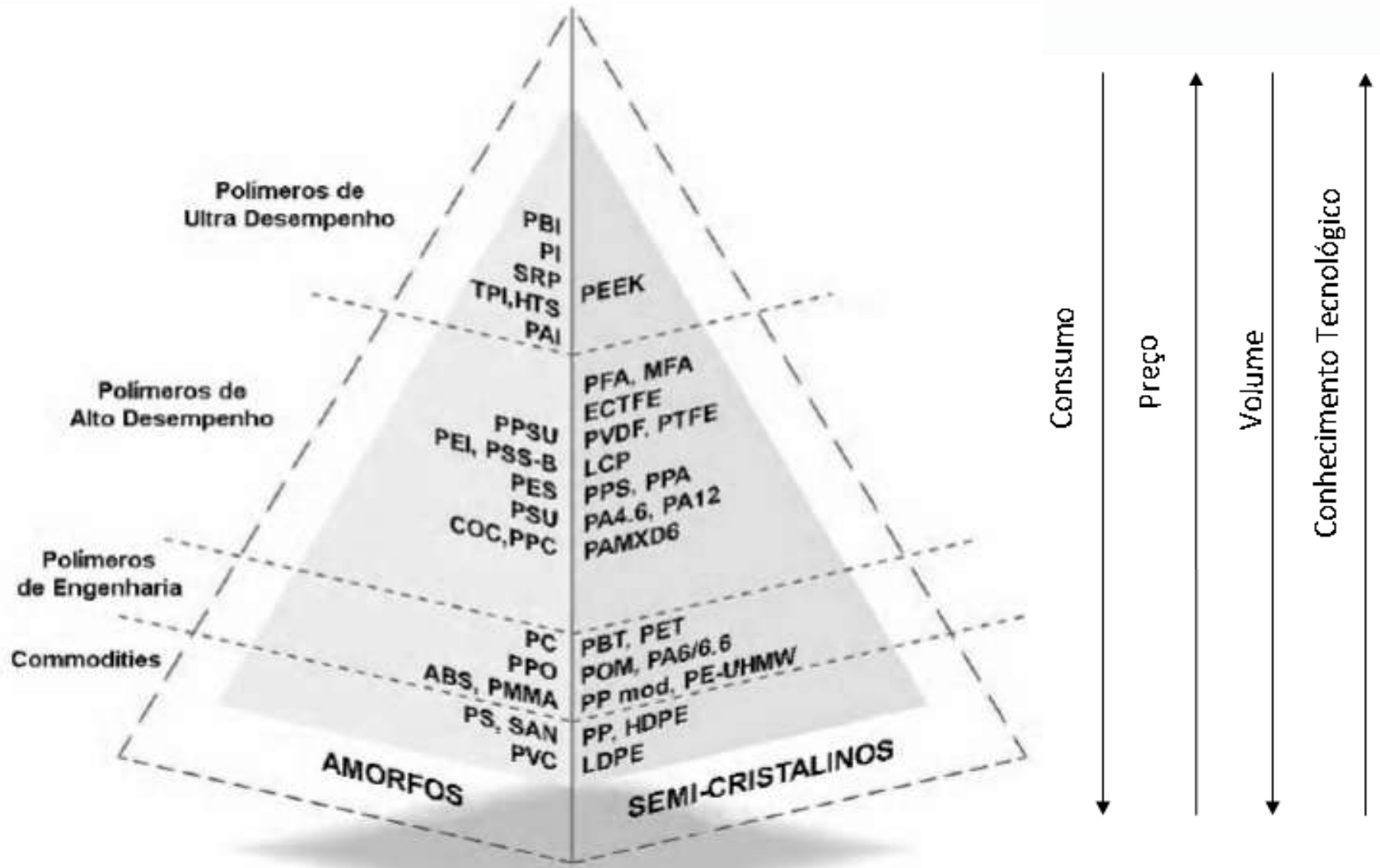


Com o desenvolvimento de novos materiais, o mercado tem a oferecer:

- **Polímeros de Engenharia:** Policarbonato, Blendas de Polisulfona, Polietileno Tereftalato, Polibutileno Tereftalato, Polióxido de Fenileno, Poliacetal, Poliamida 6.6, Polietileno de Ultra-alta Densidade, Polimetilmetacrilato e outros.
- **Polímeros de Alto Desempenho:** Poliimidas, Polisulfonas, Polietirimida, Polietersulfona, Polietér-eter-cetona, Poliacrilato, Fluorpolímeros, Polímero de Cristal Líquido, Polisulfeto de Fenileno, Poliftalamida, Poliamida 12.6, Náilon de Alta Temperatura, Policetona e outros.



Classificação dos polímeros quanto a performance



Propriedades dos Polímeros

		Commodities		Polímeros de Engenharia		Polímeros de Alto Desempenho		Polímeros de Ultra Desempenho	
	Unidade	PVC	PP	PC	PET	PTFE	PEI	PEEK	PI
Densidade	g/cm ³	1,40-1,45	0,91	1,2	1,37	2,18	1,27	1,32	1,35
Resistência à tensão	MPa	50	35	60	55	25	105	95	120
Alongamento até a ruptura	%	2-40	> 50	> 50	> 50	300	> 50	25	9
Módulo de elasticidade	MPa	2500-3500	1300	2400	2500	700	3200	3000	4000
Constante dielétrica	er	3,3 – 3,6	2,25	3	3,2	2,1	3,15	3,2	3,1
Força dielétrica	Kv/mm	15-20	> 40	27	60	48	33	20	20
Absortividade de água	w(H ₂ O) %	0,7 –0,4	0,1	0,2	0,2	0,01	2,6	0,1	0,3

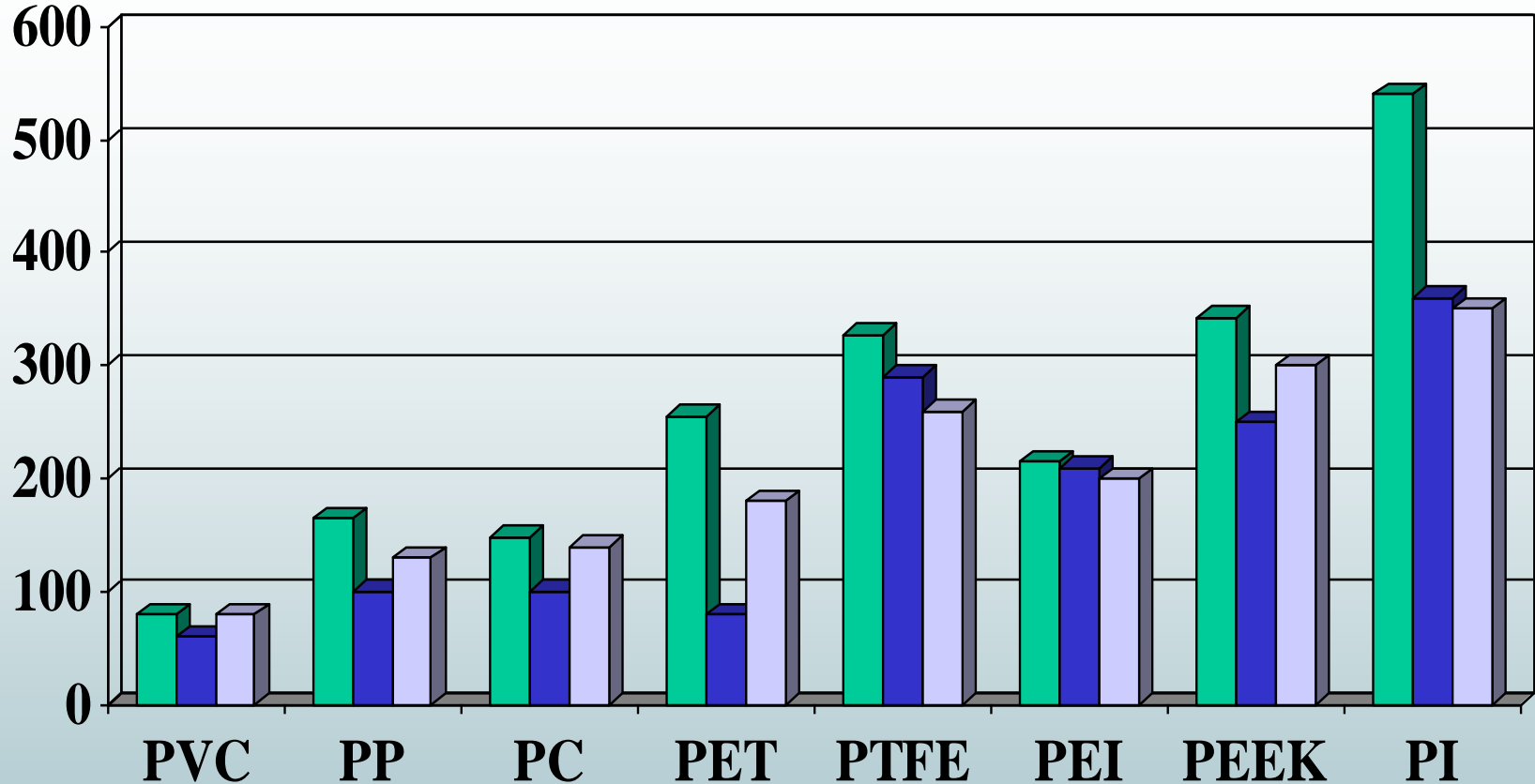


Propriedades dos Polímeros

	Unidade	Commodities		Polímeros de Engenharia		Polímeros de Alto Desempenho		Polímeros de Ultra Desempenho	
		PVC	PP	PC	PET	PTFE	PEI	PEEK	PI
Temperatura de fusão cristalina	°C	80	165	148	255	327	215	343	540
Temperatura de distorção	°C	-	65	135	95	55	180	140	368
Temperatura de trabalho em curto tempo	°C	80	130	140	180	260	200	300	350
Temperatura de trabalho para longo tempo	°C	60	100	100	80	290	210	250	360
Condutividade térmica (23°C)	W/(k.m)	0,14 -0,28	0,21	0,19	0,24	0,25	0,22	0,25	0,22
Calor específico (23°C)	J/(g.K)	0,8 -0,9	1,7	1,2	1,1	1	-	0,32	1,04
Coefficiente de dilatação térmica (23°C)	10 ⁻⁵ /K	10	11	6,5	7,5	12	5,6	4,7	4,9



Resistência a temperatura para diferentes classes de Polímeros



■ Temperatura de fusão cristalina

■ Temperatura de trabalho para longo tempo

■ Temperatura de trabalho em curto tempo

Transparência

Classe	Polímero	Classificação
Polímeros de uso geral	PEBD/PEBDL	Translúcido
	PEAD	Translúcido a Opaco
	PP	Translúcido
	PVC	Transparente
	PSGP	Transparente
	SAN	Transparente
	ABS	Opaco
	EVA	Translúcido
	PMMA	Transparente
	PET	Transparente a Opaco
	PSAI	Transparente a Opaco
Polímeros de engenharia	PC	Transparente
	PA 6	Translúcido
	PA 6:6	Translúcido
	POM	Opaco
	PPO	Opaco
	PBT	Opaco
	COC	Transparente
	PVDF	Transparente a Opaco
Polímeros de engenharia especiais	PPS	Opaco
	PSU	Transparente
	LCP	Opaco
	PAI	Opaco
	PEEK	Opaco
	PTFE	Opaco



Polímeros de Alto Desempenho

Semi-cristalinos:

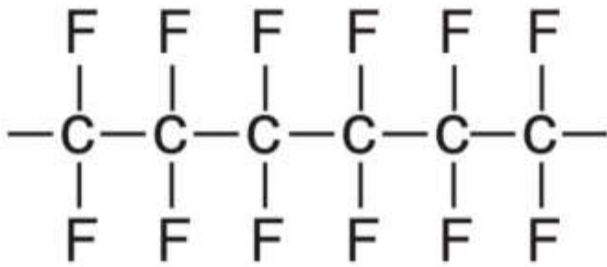
- Fluoreto de Polivinilideno - PVDF
- Poli(tetrafluoro-etileno) - PTFE
- Copolímero de Etileno-clorotrifluoretileno - ECTFE
- Perflúoralcoxi - PFA
- Poli(sulfeto de fenileno) – PPS
- Poli(eter-eter-cetona) – PEEK

Amorfos:

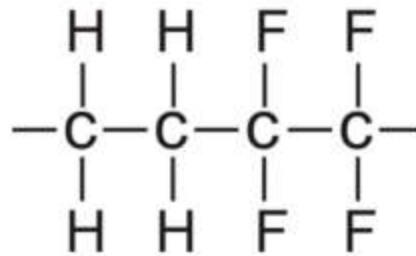
- Poli(fenileno-sulfona) - PPSU
- Polisulfona – PSU
- Poli(éter-imida) – PEI
- Poli(eter-sulfona) - PES



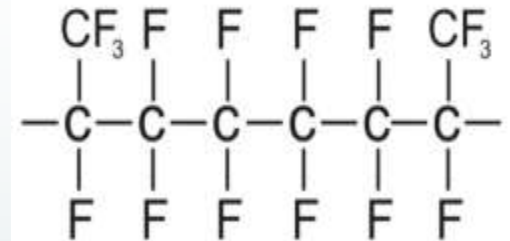
Polímeros Fluorados



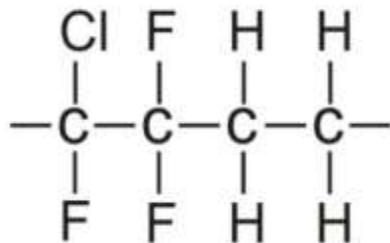
Polytetrafluoroethylene
(PTFE)



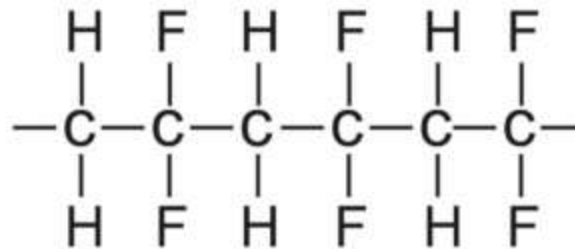
Ethylene-tetrafluoroethylene
(ETFE)



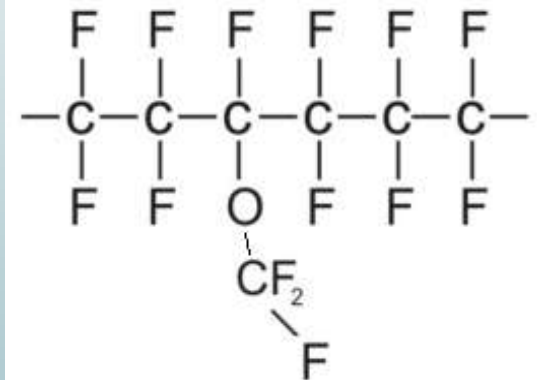
Perfluoroethylenepropylene
(FEP)



Ethylene-chlorotrifluoroethylene
(ECTFE)



Polyvinylidene fluoride
(PVDF)



Perfluoroalkoxy
(PFA)

Propriedades do Polímero Fluorado

anti-aderente



isolante
elétrico



baixo coeficiente de fricção



baixa absorção
de umidade



estabilidade
criogênica



resistência à
propagação de
chama



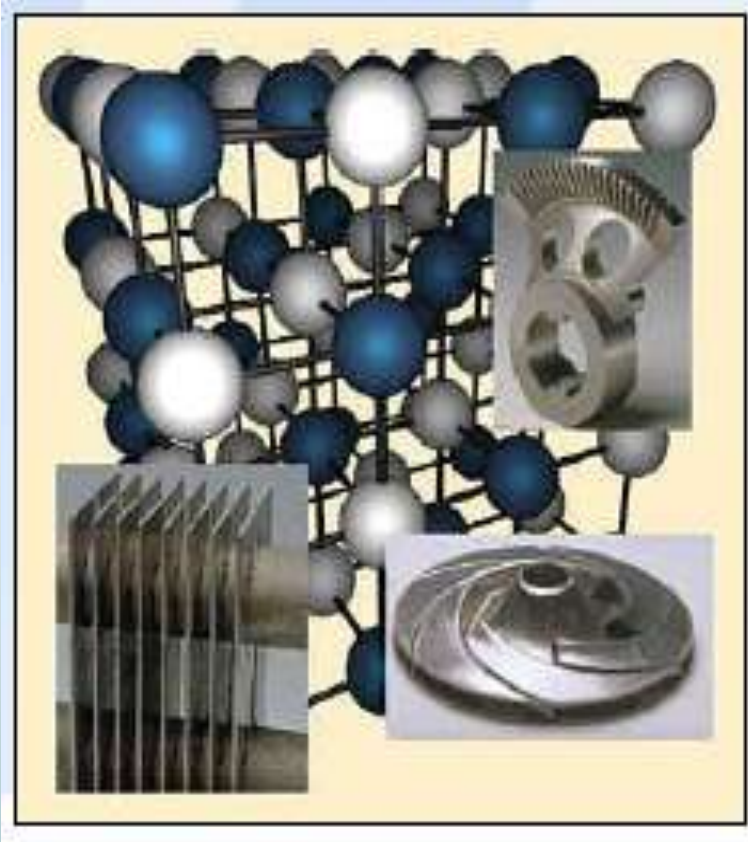
resistência
química



Propriedades dos Fluoropolímeros

Propriedades	Unid.	PTFE	FEP	PFA	ETFE	ECTFE	PVDF
Densidade	g/cm ³	2,18	2,15	2,15	1,70	1,70	1,76
Absorção de água	%	0	0,4	0,03	0,1	0,01	0,03
Coefficiente de expansão térmica	1/K	12	9	7	9	5	9
Temperatura de fusão	°C	327	275	305	270	<246	175
Temperatura vítrea	°C				110	-76	
Temperatura de distorção ao calor	°C	49	51	48	74	78	90
Temperatura contínua de serviço	°C	260	205	260	150	150	150
Temperatura de fragilidade	°C	-200	-100	-200	-100	-100	-60
Modulo de Yong	MPa	420	360	700	850	6 700	1 500
Modulo flexão	MPa	630	660	660	1 400	<2 500	1 400
Resistência flexão	MPa	NB	18	15	28	50	55
Tensão de resistência à quebra	MPa	28	21	28	45	56	36
Elongação a quebra	%	200	300	300	200	<250	37
Resistência ao impacto	J/m	160	NB	NB	NB	NB	200
Permissividade Rel. (1MHZ)	1	2,1	2	2,1	2,6	2,6	8
Fator de dissipação 10 ⁴	1	3	8	20	5	24	1 800

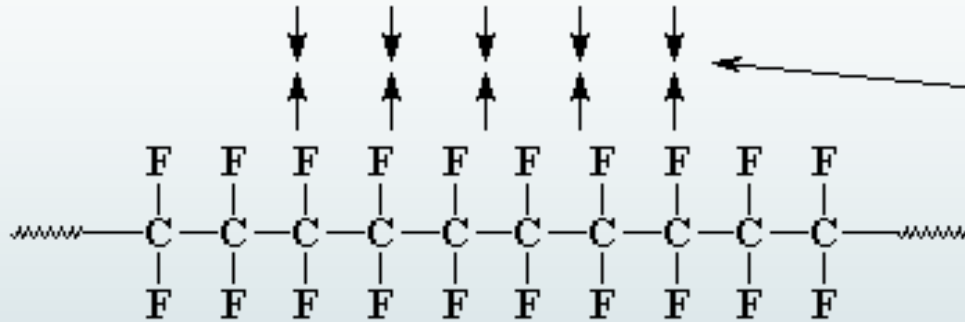
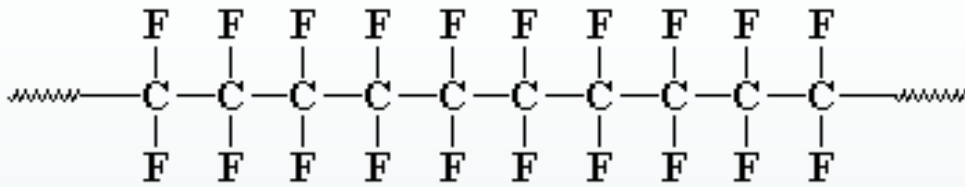
Propriedades dos Polímeros Fluorados



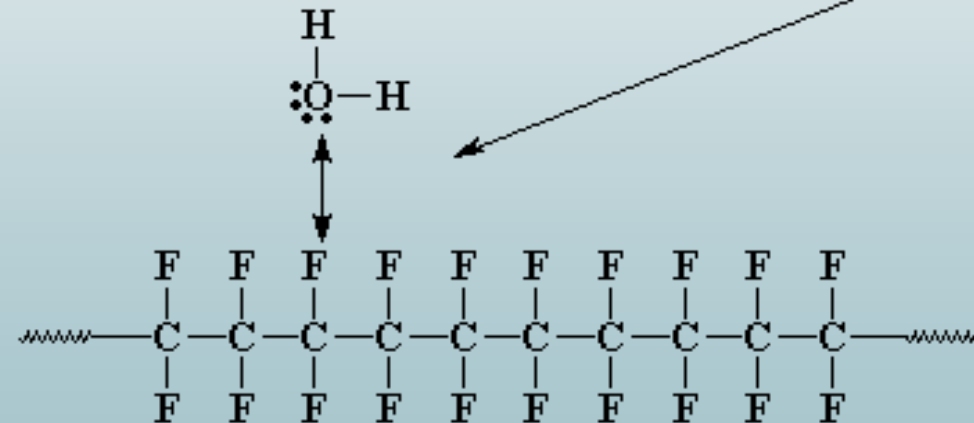
Todos os fluoroplásticos, excetuando-se o PTFE, podem ser processados usando técnicas de fusão comumente aplicável aos termoplásticos.

As temperaturas exigidas para processá-los são mais altas do que para a maioria dos outros termoplásticos.

PTFE – Politetrafluoretileno

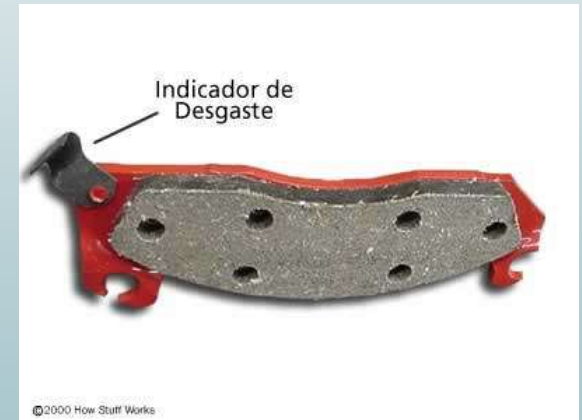


The fluorine atoms of PTFE prefer their own kind, drawing to each other, while repelling any other kind of molecule, like this water molecule, for example.



Peças produzidas - PTFE

- Bomba de combustível elétrica;
- Elemento deslizante do amortecedor;
- Elemento deslizante do freio;
- Guia do pistão do amortecedor;
- Indicador de desgaste de freio.



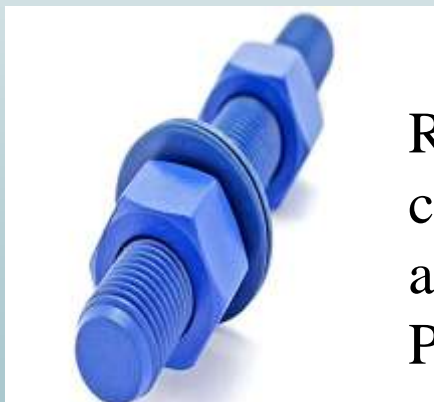
Peças produzidas - PTFE



Esteira para máquinas de empacotamento.



Protetor de conexões constituído de PTFE.



Revestimentos anti-corrosivos e anti-aderentes à base de PTFE



Vedações, gaxetas, anéis e selos compressores.

PTFE Polytetrafluoroethylene



Propriedade do PTFE com cargas e fibras

Fibra de vidro

Resistência à compressão.

Resistência ao desgaste.

Ótima resistência química.

Grafite

Boa condutibilidade térmica.

Boas propriedades de deslizamento.

Baixo coeficiente de atrito.

MoS₂

Ótimas propriedades de deslizamento.

Reduz o desgaste.

Carbono

Resistência à compressão.

Resistência ao desgaste.

Boa condutibilidade térmica.

Bronze

Resistência à compressão.

Resistência ao desgaste.

Baixo escoamento a frio .

Ótima condutibilidade térmica.

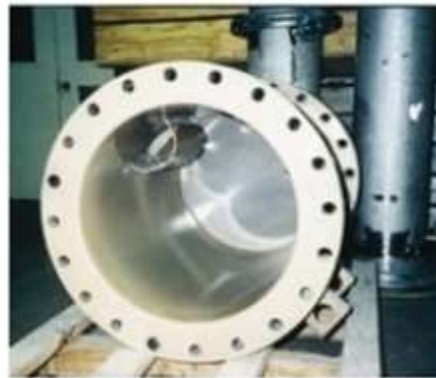
Pigmento

Somente cor para identificação ou distinção.



Peças produzidas - ECTFE

- Revestimentos de fios e cabos;
- Válvulas e componentes de bombas, conectores, mangueiras;
- Recobrimento para fibras ópticas;
- Recobrimento para aço;
- Filmes em bateria de lítio;
- Chapa com fibra de vidro no revestimento de tanques;
- Utensílios para laboratório.



Características principais dos polímeros fluorados

- altamente cristalino (93 – 98%)
- resistência química excelente;
- temperatura de trabalho de -200° a 250°C;
- pequena alteração dimensional;
- anti-aderente;
- auto lubrificante;
- atóxico;
- não sofre ação dos raios solares;
- bom dissipador de calor;
- bom amortecedor de vibrações
- coeficiente de atrito muito baixo;
- alta resistência dielétrica;
- facilmente usinável.

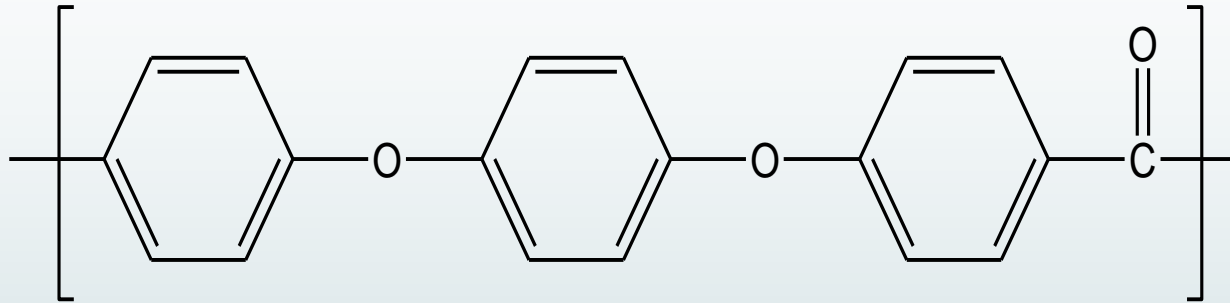
Limitações

- baixa resistência mecânica;
- dimensões reduzidas do semi-acabado;
- baixa resistência abrasiva.



PEEK – Poli(éter-éter-cetona)

Estrutura Química



Peças produzidas - PEEK



- Tubos Flexíveis

- Ótima resistência mecânica
- Boa dureza
- Flamabilidade V-0 sem aditivos
- Baixa emissão de fumaça e gases tóxicos em situação de fogo
- Extrusão de paredes finas, boa processabilidade



- Fios Elétricos com cobertura de manga

- Alta temperatura de uso contínuo
- Excelente resistência sobre alta pressão e alta velocidade
- Baixo coeficiente de fricção

Peças produzidas - PEEK



- Partes de sistema de freios ABS

- Alta resistência mecânica
- Excelente resistência a abrasão
- Alta precisão de moldabilidade
- Resistência a fluidos



- Sistema de controle de motor

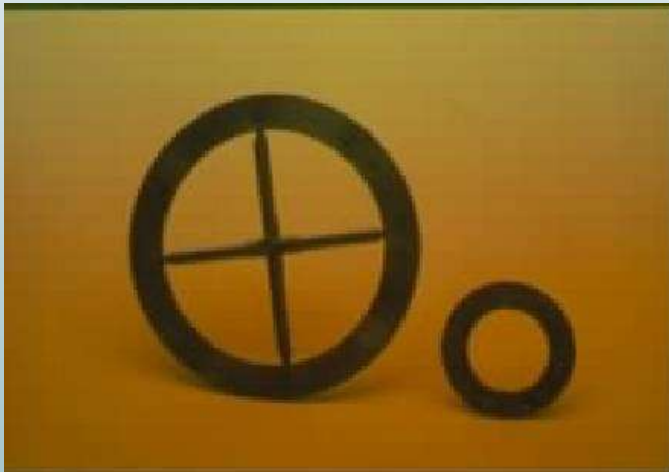
- Alta qualidade do molde final, evitando pós-processamento
- Alta precisão de reprodutibilidade
- Baixo coeficiente de fricção mesmo a altas temperaturas

Peças produzidas - PEEK



- Tela de óleo de caminhão

- Alta temperatura de uso contínuo
- Altíssima resistência química
- Alta precisão de moldabilidade
- Excelente resistência mecânica



- Disco de câmbio de ônibus

- Alta temperatura de uso contínuo
- Altíssima resistência química
- Alta precisão de moldabilidade
- Excelente resistência mecânica

Peças produzidas - PEEK

Steering adjustment
• worm gear height adjust



Ball joints
• bearing shells



EPS System
• worm gear
• yoke bearing

Hydraulic pump
• pump coupling



Yoke bearing
• sliding foil

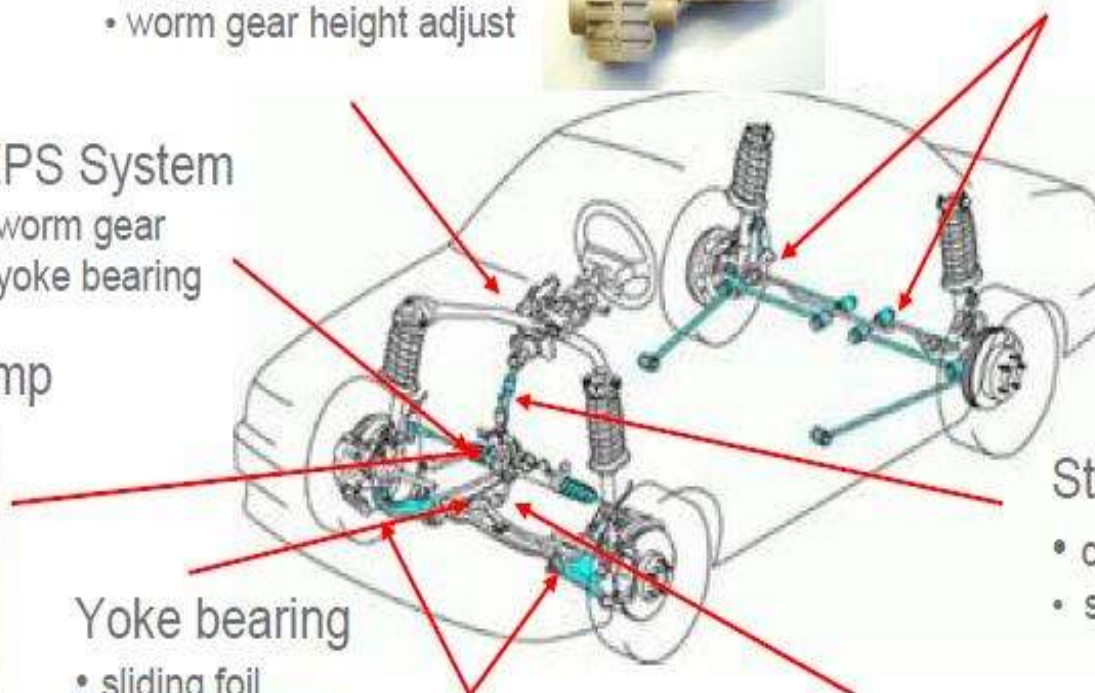


Ball joints
• bearing shells

Steering column
• column sleeve
• slider bearing



Active Front Steering System
• worm gear



Cortesia: Solvay

Peças produzidas - PEEK



• Carregador de lâminas

- Excelente estabilidade dimensional
- Excelente resistividade de superfície (105 - 109 ohms/sq)
- Facil moldagem
- Pureza inerente, que evita contaminações



• Terminais de conexão para uso no mar

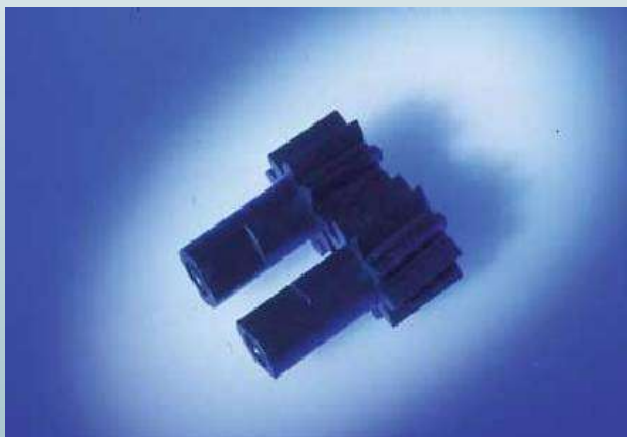
- Excelentes propriedades isolantes
- Boa performance em variação de temperatura
- Longa vida útil
- Alta resistência dielétrica

Peças produzidas - PEEK



- Endoscópios

- Resistente a todos os tipos de limpeza, inclusive radiação gama
- Resistência a fratura por *stress*
- Longa vida útil
- Grande resistência hidrolítica, mesmo depois de alta exposição a água ou vapor



- Hemodiálise

- Resistente a líquidos dialisantes, desinfetantes, soluções de limpeza e anti congelantes
- Fácil maquinabilidade e estabilidade dimensional
- Resistência à baixíssimas temperaturas

Peças produzidas - PEEK

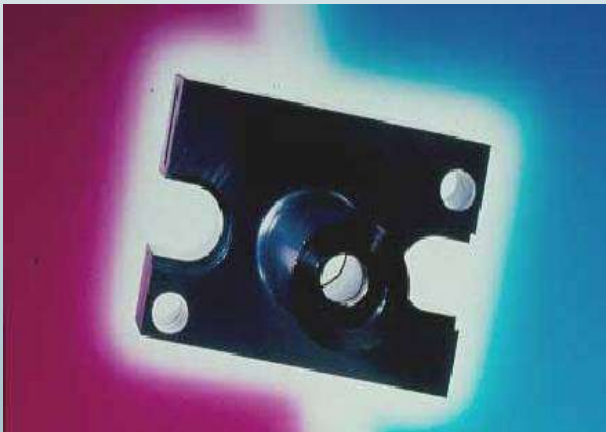


- Máquinas de café expresso

- Alta temperatura de uso contínuo
- Estabilidade eletrolítica de longa duração
- Resistência química a elevadas temperaturas

- Componentes de válvulas de potes de bebidas

- Excelente resistência a ambientes químicos agressivos
- Resistência a fratura por stress e longa vida útil
- Resistência a grandes variações de temperatura e pressão



Peças produzidas - PEEK



- Casco e partes sob o convés
- Temperaturas de até 300° C podem ser obtidas devido às forças de atrito encontradas.
- Ótima resistência ao desgaste.



Gaiolas de rolamento

- Rolamentos mais leves, mais suaves, com menor fricção.
- Propriedades de deslizamento gera pouco atrito.
- Longa vida útil
- Não necessita de lubrificação.



Peças produzidas - PEEK



Peças da tubulação para aplicações offshore

- Resistência química elevada
- Estabilidade térmica oxidativa excelente



Material para fabricação de dispositivos ortopédicos.

- Resistência química
- Resistência mecânica

Características do PEEK

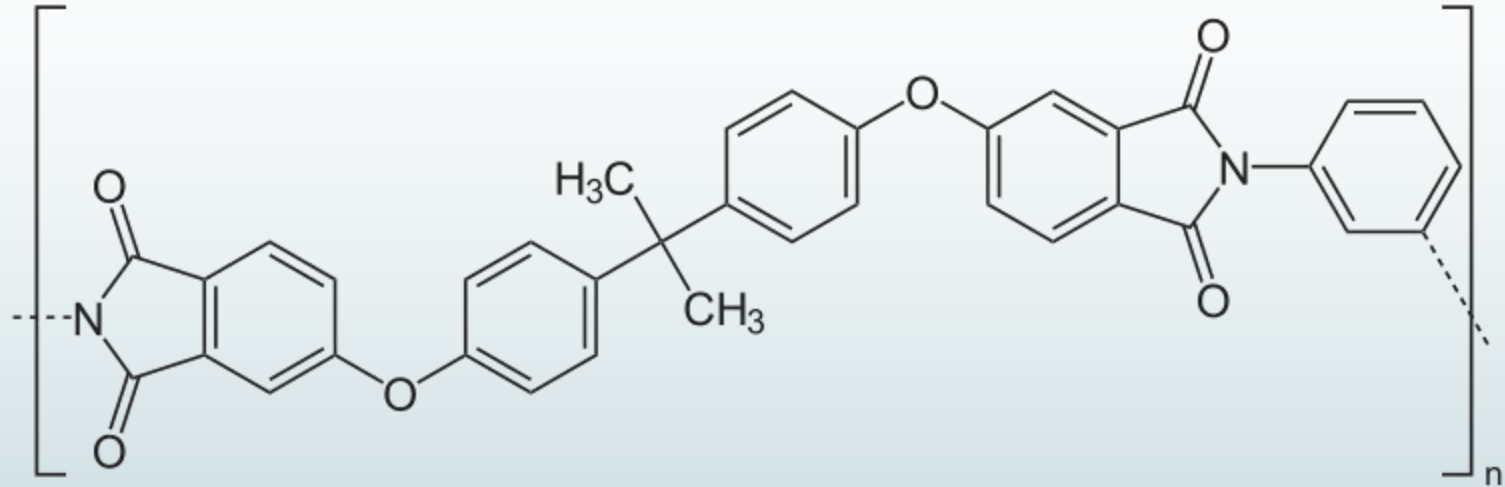
- Baixa emissão de fumaça e gases tóxicos em situação de fogo;
- Resistência a altas temperaturas em uso contínuo;
- Resistente a líquidos dialisantes, desinfetantes, soluções de limpeza, anti-congelantes, raios-X e radiações gama;
- Alta resistência a fluídos;
- Excelentes propriedades isolantes, alta resistência dielétrica;
- Mantém baixa umidade;
- Rigidez elevada;
- Ótima resistência a abrasão;
- Alta resistência a fadiga;
- Baixo coeficiente de fricção;

Material é dissolvido ou decomposto em anidridos ou ácidos fortemente oxidantes.



PEI – Poli(éter-imida)

Estrutura Química



Peças produzidas - PEI



- Sistema de luzes internas de aviões
 - Baixa emissão de fumaça e gases tóxicos em situação de fogo
 - Ótima processabilidade
 - Facilidade de se adicionar corantes



- Válvulas de combustíveis
 - Resistência química contra a ação da maioria dos combustíveis e fluidos
 - Resistência contra a ação de fluidos hidráulicos de aviões

Peças produzidas - PEI



• Componentes de ignição

- Resistência química contra a ação da maioria dos combustíveis e fluidos de automóveis
- Ótima retenção de torque
- Excelente estabilidade dimensional
- Excelente moldabilidade com pequena variação



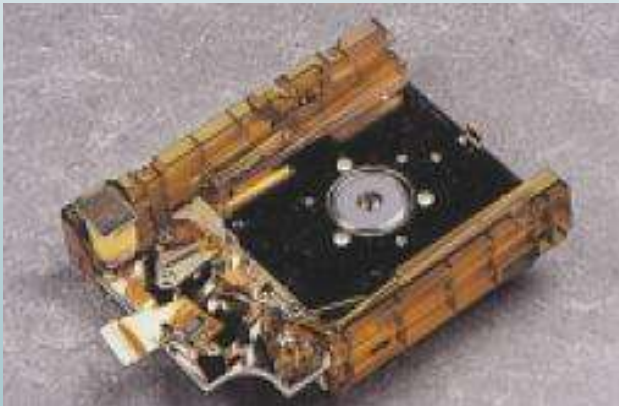
• Luz de neblina

- Alta resistência a temperaturas acima de 200 °C
- Metalização sem primer
- Redução de peso pelas paredes finas
- Excelente estabilidade dimensional

Peças produzidas - PEI



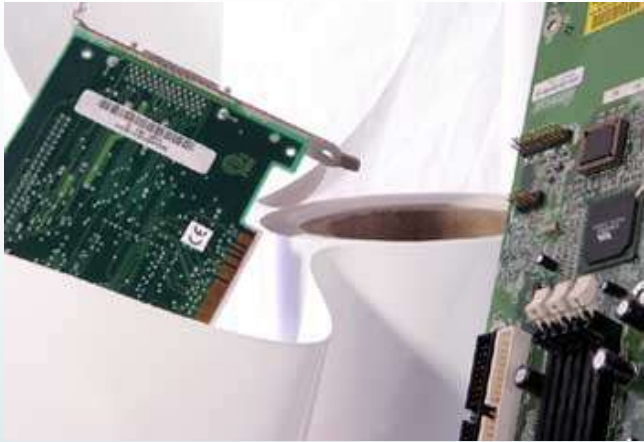
- Conectores
- Excelente estabilidade dimensional (uniforme coeficiente de expansão térmica)
 - Retardante de chama
 - Baixa absorção de água
 - Isolante elétrico até 600 V



Aparelhos de telecomunicação

- Constante dielétrica estável e fator de dissipação com um grande “range” de temperatura (menos de 0° até 200°C) e frequência (1 Hz a 1010 Hz)
- Significante produtividade através da integração de componentes e facilidade de montagem

Peças produzidas - PEI



Placas de circuito impresso e disco rígido para computadores.

- Constante dielétrica e fator de dissipação estável a grandes variações de frequência e temperatura.



Pipetas

- Resiste aos métodos de esterilização como gás EtO, radiação gamma, autoclaving e aquecimento a seco
- Excelente resistência química contra lipídios, detergentes e desinfetantes.
- Transparente
- Rígido

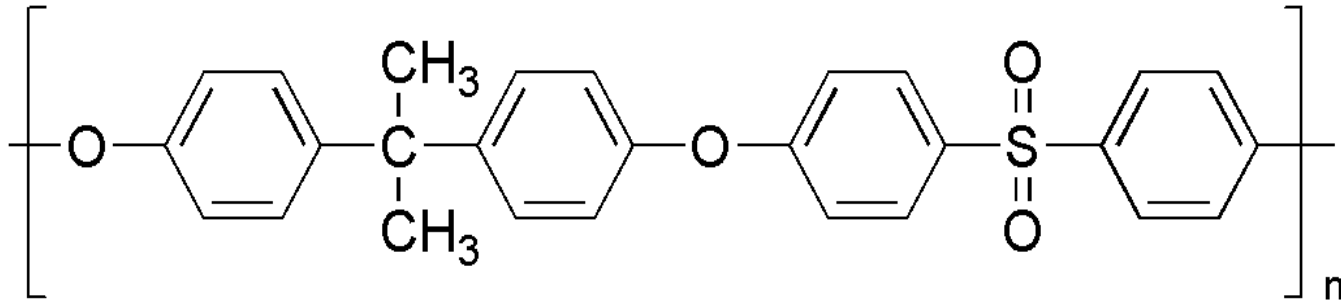
Características do PEI

- Boa estabilidade dimensional;
- Alta resistência a temperaturas acima de 200 °C;
- Resistência contra a ação de combustíveis e fluidos;
- Retardante de chama;
- Baixa absorção de umidade;
- Material rígido;
- Resiste aos vários métodos de esterilização como gás EtO, radiação gama, autoclaving e aquecimento a seco;
- Resistência química contra a maioria dos lipídios, detergentes e desinfetantes;
- Baixa emissão de fumaça e gases tóxicos em situação de fogo;
- Isolante elétrico até 600 V;
- Constante dielétrica estável e fator de dissipação com um grande “range” de temperaturas e frequência.



Polisulfona - PSU

Estrutura Química



Peças produzidas de PSU

- Interior de aeronaves comerciais;
- Juntas, bobinas; transmissores, bombas de vácuo;
- Equipamentos para esterilização de aparelhos cirúrgicos;
- Isolamento de fios e cabos especiais;
- Equipamentos médicos e alimentícios;
- Conectores elétricos para lâmpadas de projetor;
- Circuitos impressos.



Características do PSU

- Bom isolante elétrico;
- Resistente a altas temperaturas;
- Boa resistência ao escoamento (*creep*);
- Auto-retardante de chama;
- Boa rigidez;
- Boa estabilidade química;
- Resistente a raios gama;
- Boa estabilidade dimensional.

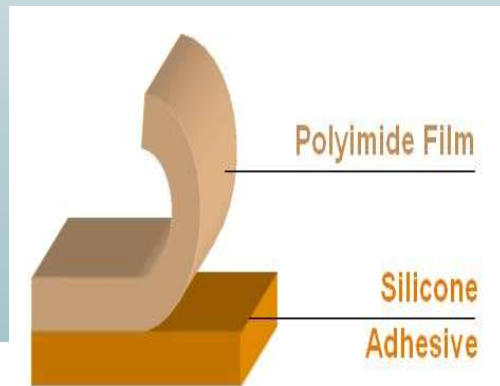
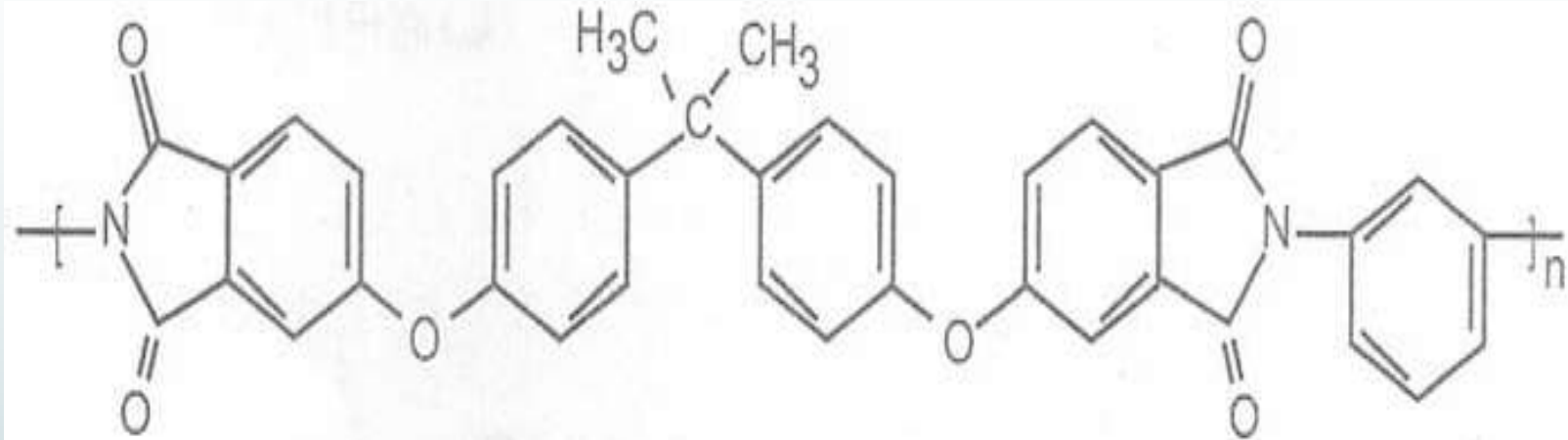
Limitações

- Pouco resistente a solventes aromáticos, oxigenados, ou clorados;
- Dificuldades de processamento.

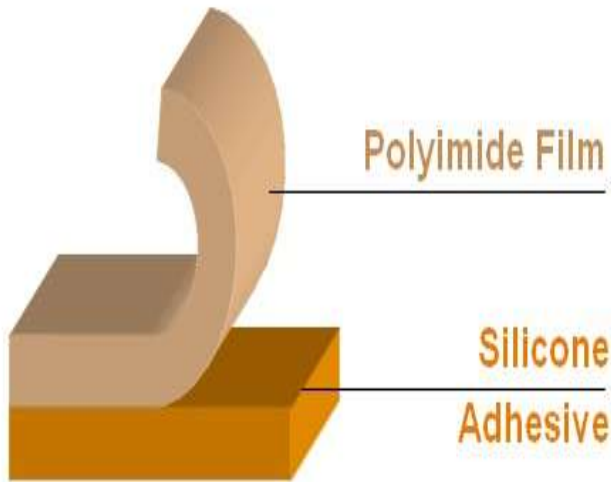


PI – Poliimida

Estrutura Química



Peças produzidas - PI



Filme de poliimida aplicado com adesivo de silicone

- Isolamento de equipamentos eletrônicos, motores e pilhas de Li.
- Material com resistência elevada a altas e baixas temperaturas.



Tube de fibra de PI

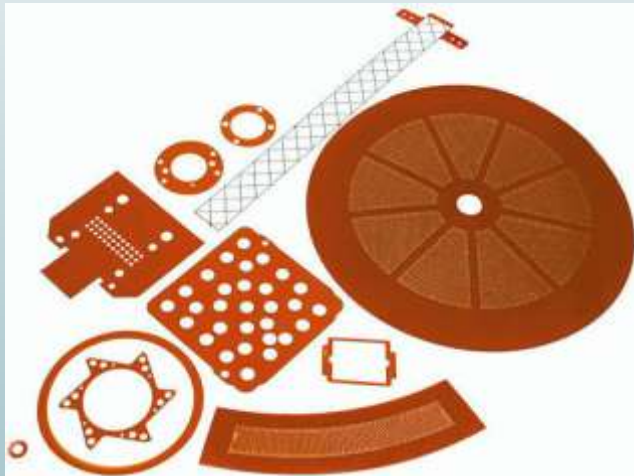
- Resistente a deformação plástica.
- Alta resistência mecânica.
- Material resistente ao desgaste.

Peças produzidas - PI



Rolos de filme de PI

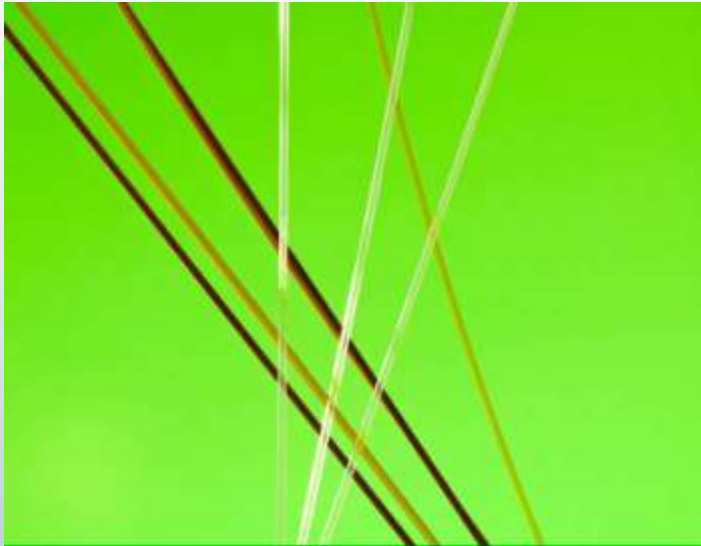
- Boa resistência química.
- Ótimo isolante elétrico.
- Alta resistência a temperatura (300°C).



Isolante de PI para placas de circuitos elétricos

- Ótima resistência química.
- Pode ser usado até temperatura de 350°C em tempo curto.
- Auto-retardamento de chama.

Peças produzidas - PI



Tubos de PI para aplicações médicas

Especificamente as que necessitam de monitoramento visual, transparência ao UV ou transmissão de imagem.

Boa interação do material do tubo com pigmentos.



Características principais do PI

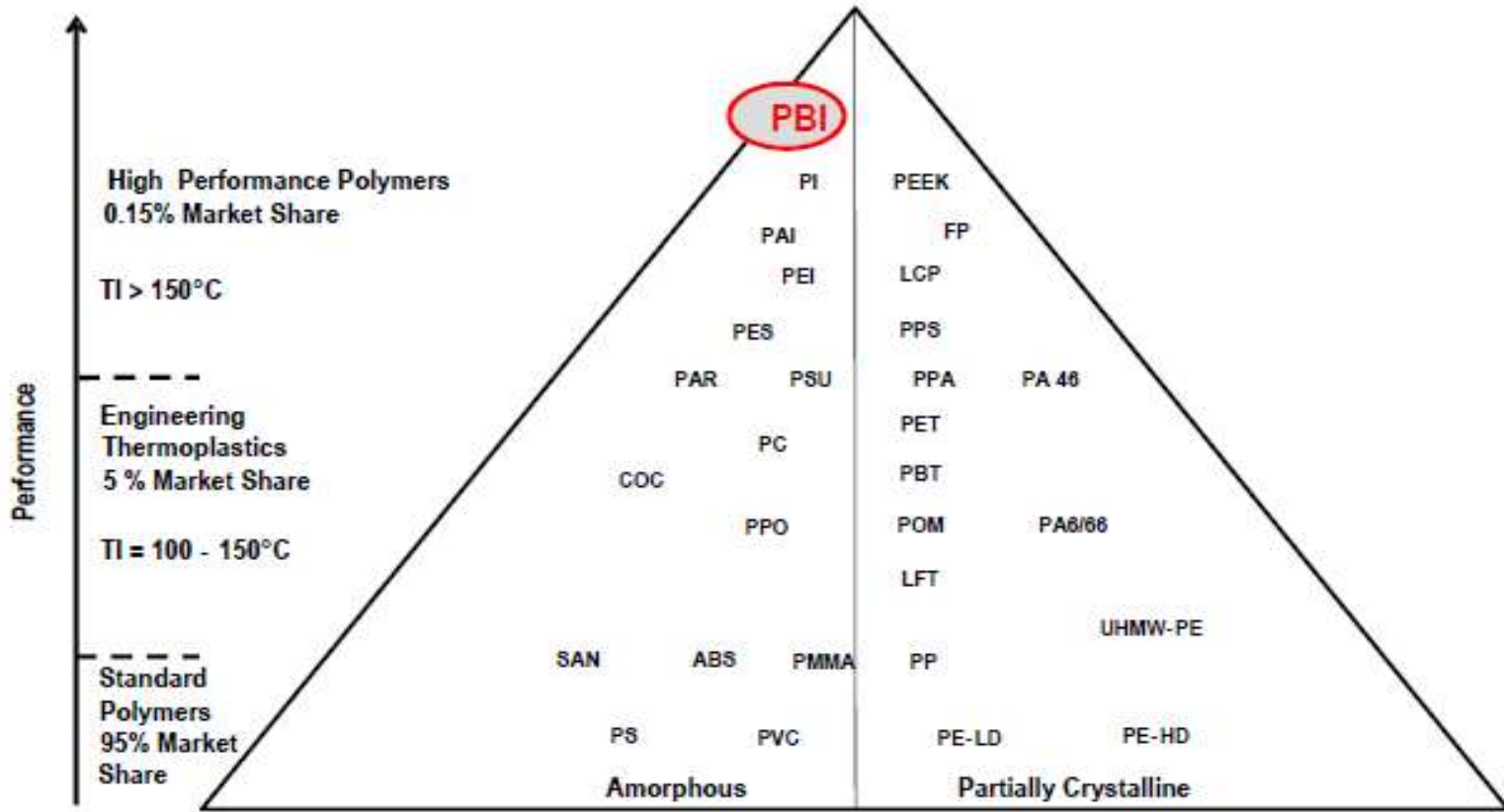
- Baixo coeficiente de fricção;
- Excelente resistência ao desgaste;
- Alta resistência mecânica;
- Resistente a deformação plástica;
- Auto-retardamento de chama;
- Suporta altas temperaturas e grandes variações de temperatura;
- Ótimo isolante elétrico;
- Boa resistência química;
- Excelente tenacidade;
- Alta estabilidade dimensional;

Limitações

- Ópticamente escuro;
- Baixa resistência às radiações;
- Difícil processamento.



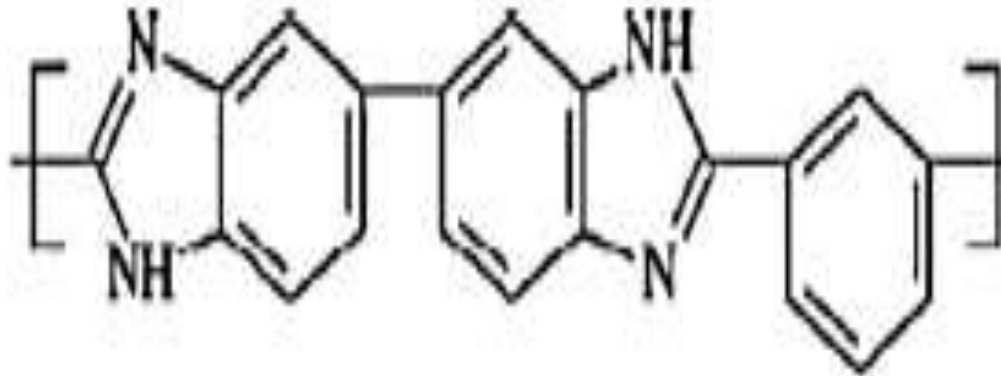
Topo da pirâmide - PBI



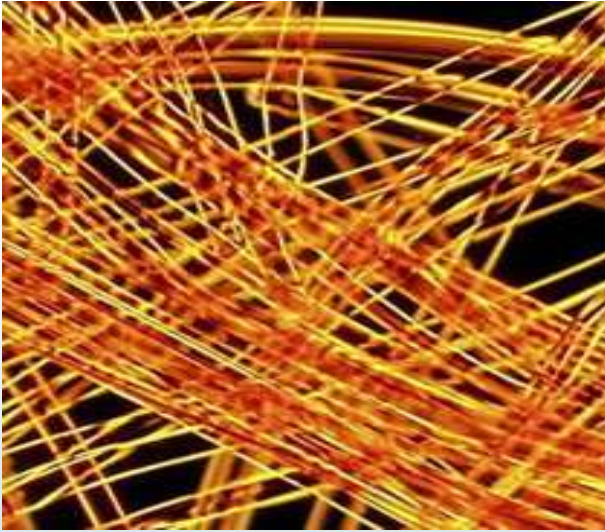
TI = UL Temperature Index

PBI – Polibenzimidazila

Estrutura Química



Peças produzidas - PBI



Fibra têxtil para aplicações aeroespaciais

- Material não-inflamável
- Excelente estabilidade térmica
- Longa vida útil.
- Alta resistência a corrosão.



Aparatos de proteção militar

- Material suporta temperaturas contínuas de operação ao redor de 430°C e picos de 760°C.
- A resistência à tração atinge 160 MPa a 23°C

Peças produzidas - PBI



Luvas

- Resistência a altas temperaturas
- Resistência química
- Material não-inflamável.



Roupas de proteção contra incêndio

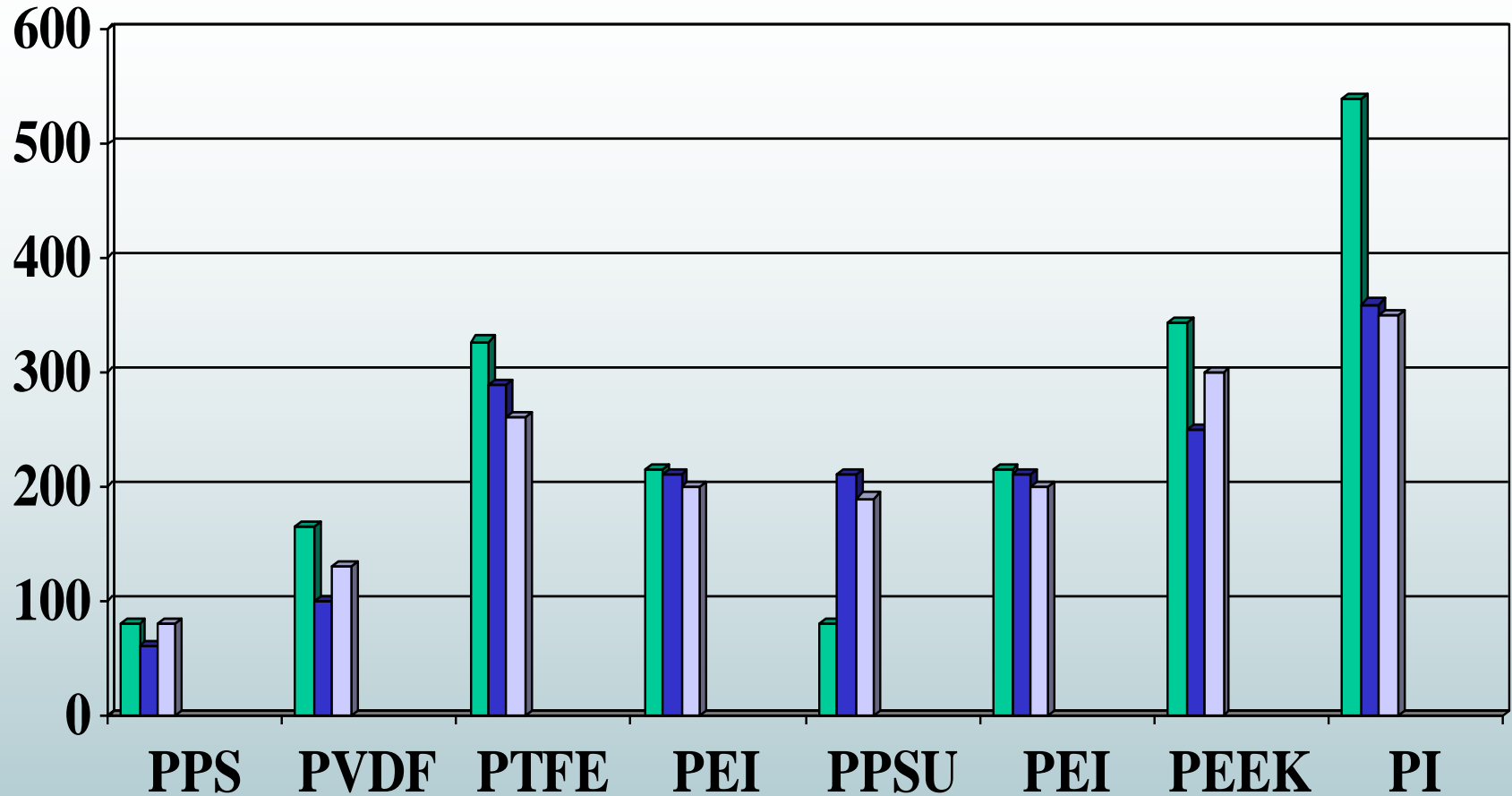
- Excelente resistência a altas temperaturas.
- Material não sofre queima.

Características principais do PBI

- Resistência a altas temperaturas;
- Excelente resistência química;
- Material não-inflamável;
- A resistência à tração atinge 160 MPa a 23°C;
- Excelente estabilidade térmica;
- Longa vida útil;
- Alta resistência a corrosão;
- Isolante térmico;
- Resistência mecânica elevada.



Propriedades - Polímeros Alto Desempenho

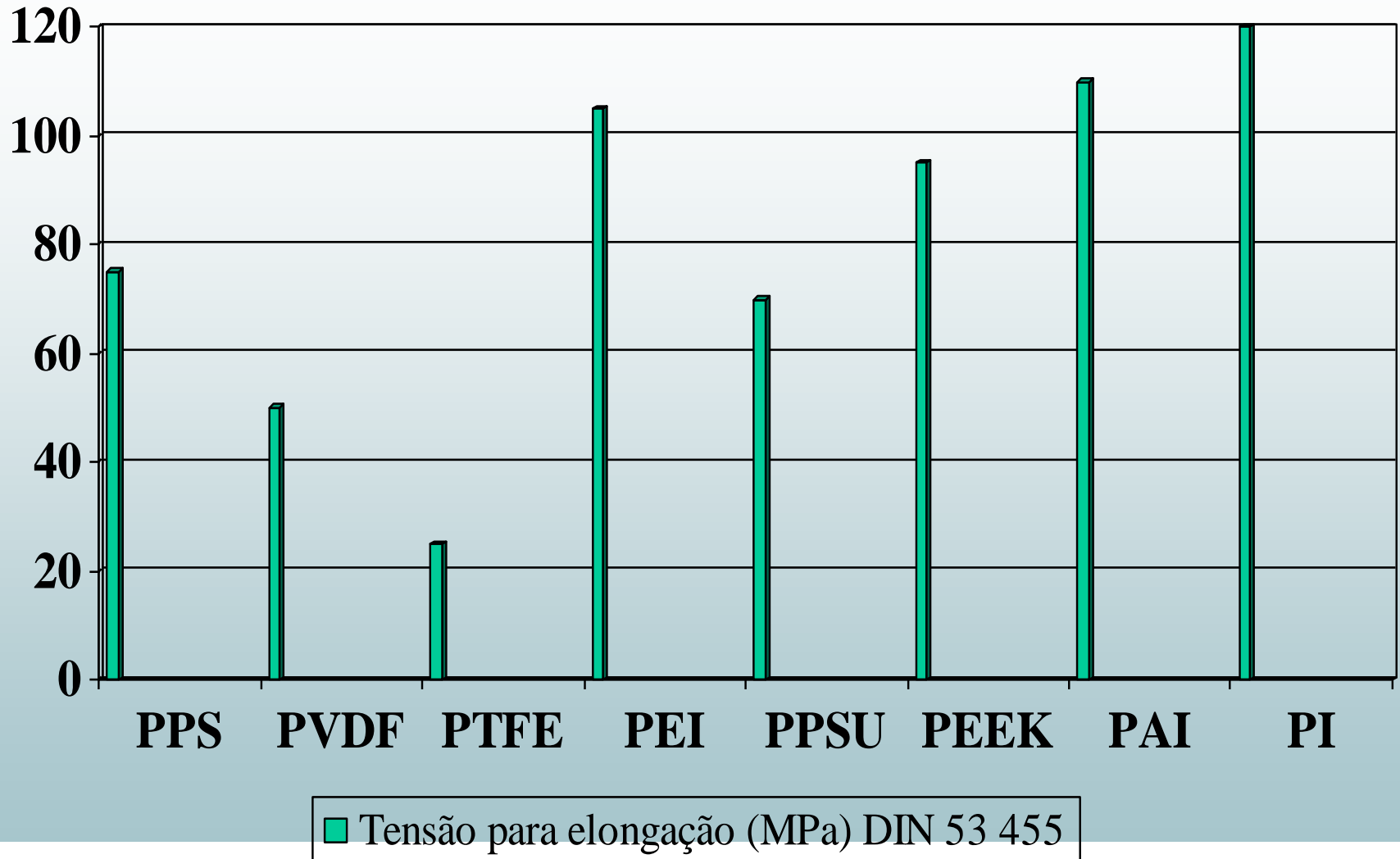


■ Temperatura de fusão cristalina

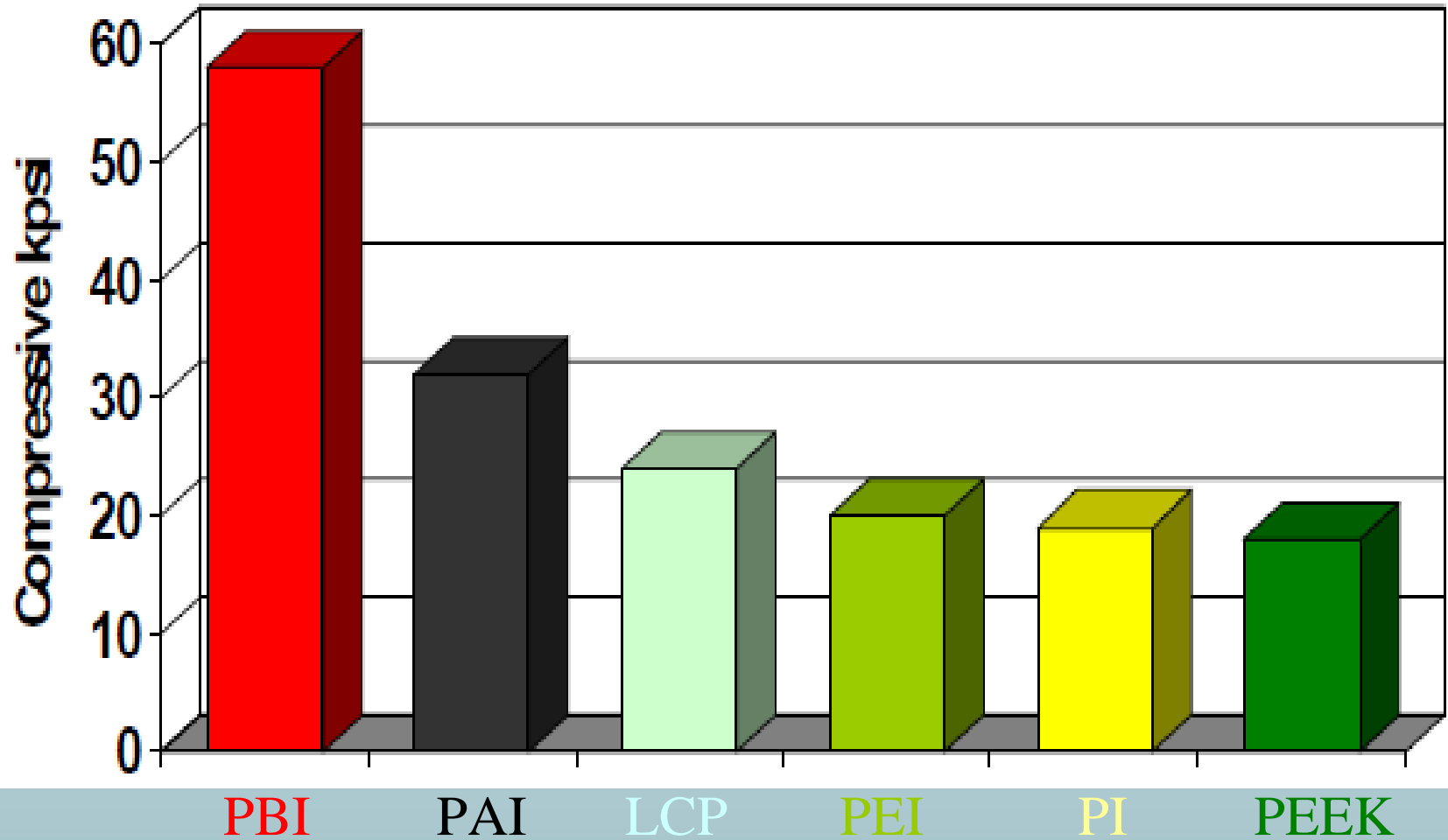
■ Temperatura de trabalho para longo tempo

■ Temperatura de trabalho em curto tempo

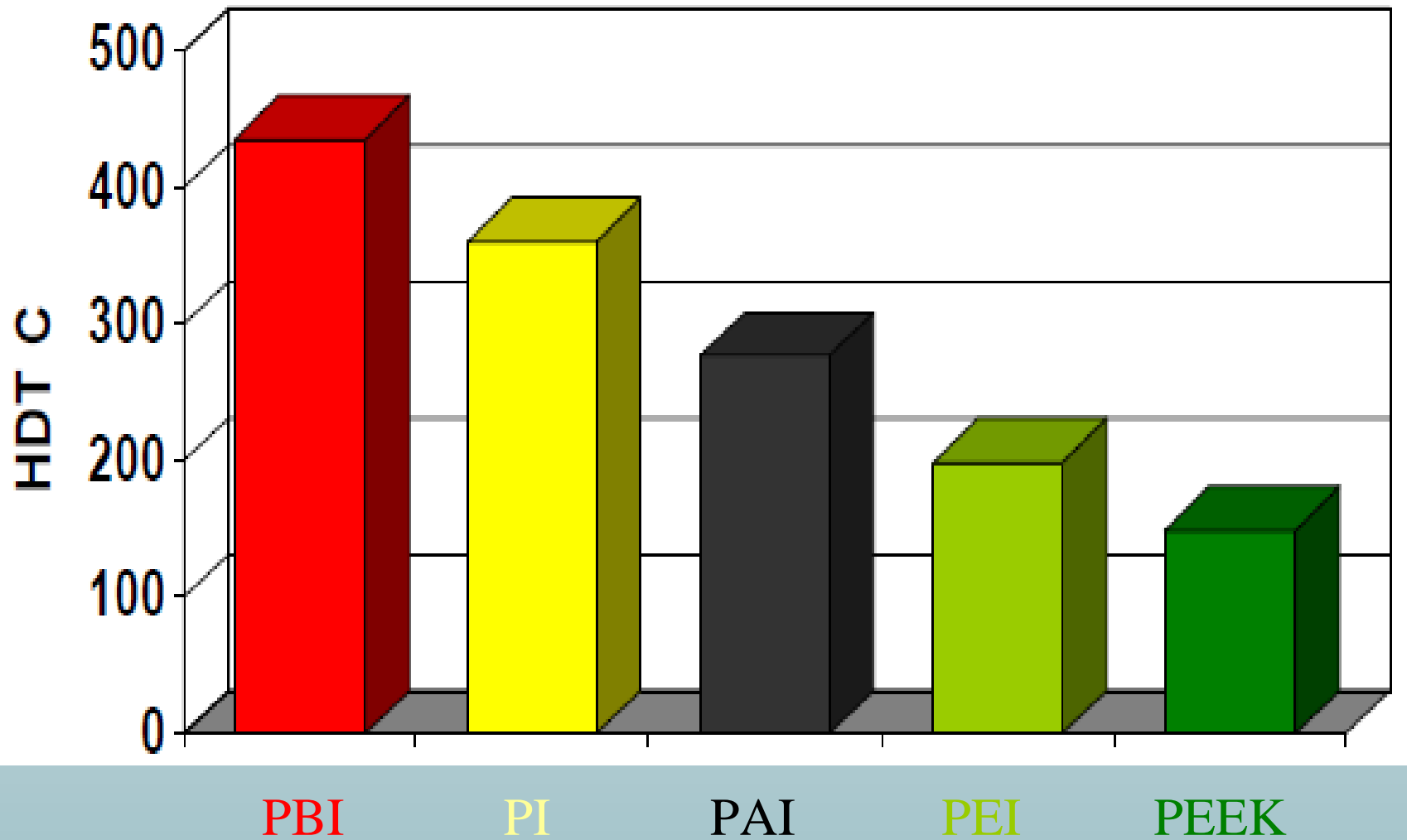
Propriedades - Polímeros Alto Desempenho



Resistência a compressão



Temperatura de deflexão térmica



Referências

- Apresentação SIBRATEC “Plástico e a Indústria Automobilística” Dr. Hélio Wiebeck
- “Plástico de Engenharia” Hélio Wiebeck e Júlio Harada, Ed. Artliber, 2005.
- Carlos A. Hemais, “**Polímeros e a Indústria Automobilística**”, Polímeros vol.13 no.2 São Carlos Apr./June 2003
- J.A.Sant’Anna e H.Wiebeck, “**Plástico substituindo o metal na produção de peças: Como fazer a seleção de materiais nesta troca, tendências e exemplos**”, Plastshow 2006.
- Márcio Azevedo, “**Demanda por resinas de alto desempenho cresce e prognósticos se mostram promissores**”, Revista Plástico Moderno, edição n. 402, abril de 2008.
- Jonas Soares Rolim, “**Polímeros de Alto Desempenho**”, Trabalho de conclusão de curso, Escola Politécnica da USP, 2008.
- Felipe A. Medeiros, Gilson C. Gama, “**Revestimento Interno de Válvulas utilizando o fluorpolímero ECTFE**”, *11ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, 2011.*



Referências

- www.plastico.com.br/revista/pm332/engenharia1.html
- www.solvayplastics.com/sites/solvayplastics/EN/Pages/Solvayplastics.aspx
- www.quadrantplastics.com/en/home.html
- www2.dupont.com/Teflon/en_US/index.html
- www.polimerica.it
- www.tangram.co.uk/
- www.victrex.com
- www.geoplastics.com
- www.solidur.com
- www.derflon.com





ESCOLA
POLITÉCNICA
DA USP

Informações

Prof. Dr. Hélio Wiebeck

Escola Politécnica – USP

Email: hwiebeck@usp.br

Marcus Vinicius Seixas

Escola Politécnica – USP

Email: marcus.seixas@usp.br

