



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Innovazione del Prodotto
a.a. 2022-23
Anno I – Semestre I



Tecnologia dei materiali polimerici

Lezione 26

- Prof. **Lisa Biasetto**
- E-mail: lisa.biasetto@unipd.it



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Innovazione del Prodotto
a.a. 2022-23
Anno I – Semestre I

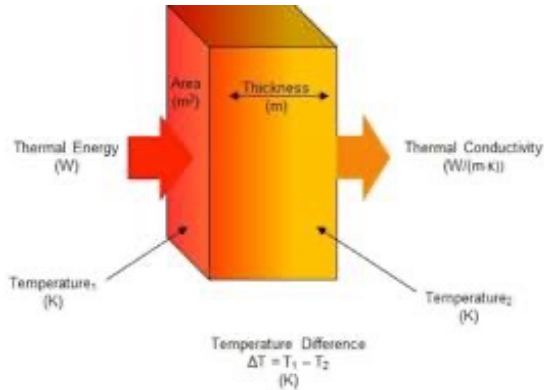


❖ Proprietà termiche dei polimeri

❖ Introduzione alle proprietà termiche

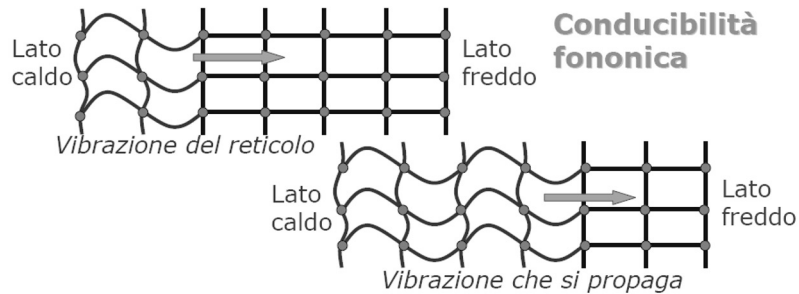
Materiale	k (W/m K)	α (K ⁻¹) [$\times 10^{-5}$]	Temperatura di distorsione (°C)	Temperatura di rammollimento (°C)
Polietilene				
LDPE	~0.3	16-22	40 -50	~90
HDPE	0.5	11-16	60-80	130
PVC rigido	0.15	5-8	60-80	~210
PP	~0.18	~11	65-70	170-180
PS	0.08-0.20	~7	82-88	240
PMMA	0.20	5-8	95-110	160-200
Nylon 6,6	0.25	~12.5	105	260
PTFE	0.25	~11	130	non rammollisce
Policarbonato	~0.22	6.5	135	225
Resina ABS	0.04-0.30	6-13	100	-
Resine acetaliche	0.23	8.3	125	185
Resina fenolica (non caricata)	0.12-0.24	2.5-6	145	non rammollisce
Resina fenolica caricata con cellulosa	0.17-0.30	3-4.5	-	non rammollisce
Resina poliestere caricata con fibre di vetro	0.40-0.50	1.9-3	100-300	non rammollisce
Resina epossidica (non caricata)	0.20-0.25	7.2	175	non rammollisce
Resina siliconica	-	3.5	175-480	-
Resina uretanica	-	5.7	90	-

Conducibilità termica



Stato stazionario

$$Q = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)$$



Se la T aumenta, gli atomi vibrano: i "nodi" della vibrazione si muovono → trasmissione più difficile



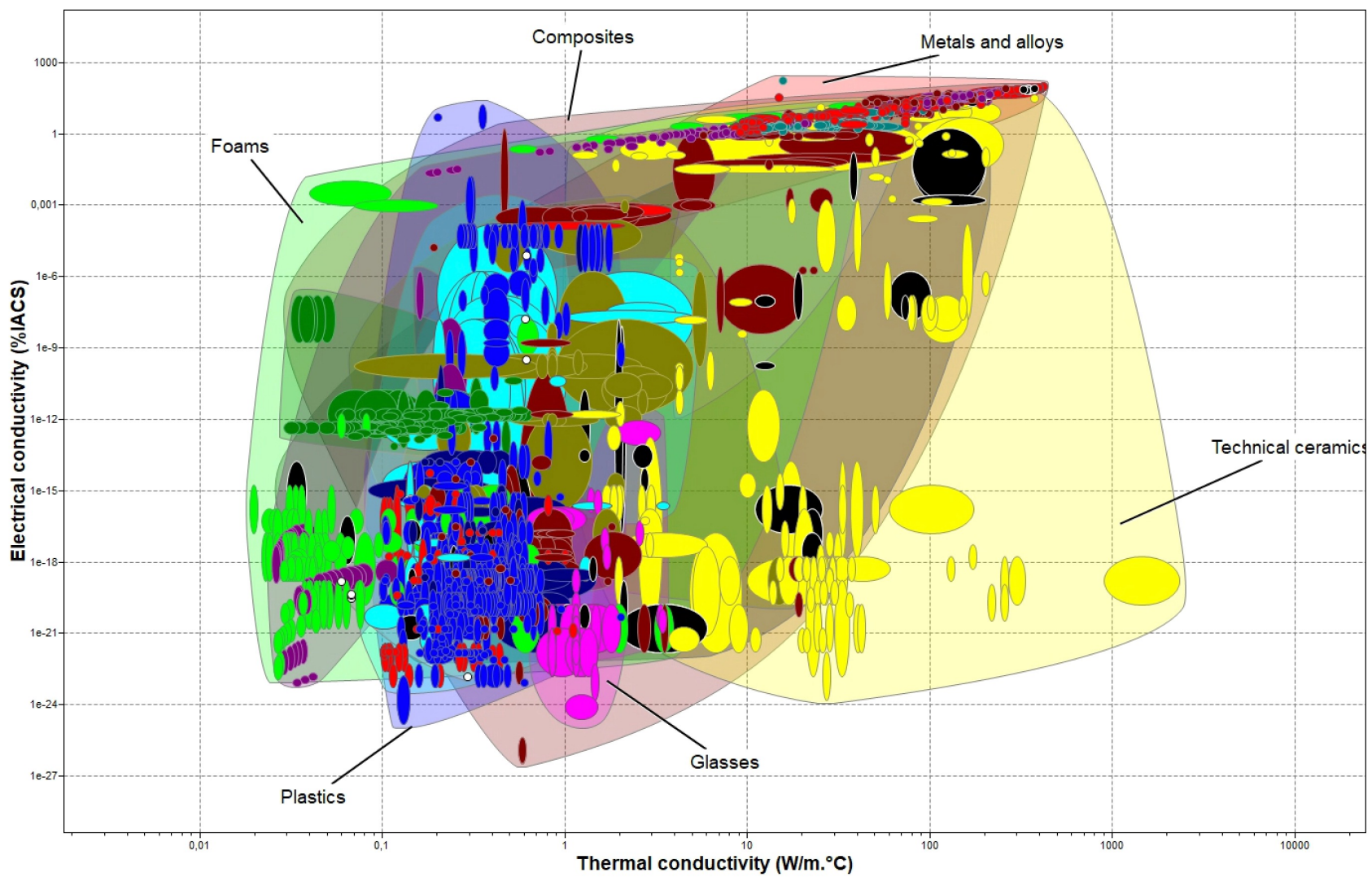
Se la spaziatura tra atomi è irregolare la vibrazione reticolare tende ad "estinguersi" → **bassa conducibilità dei materiali** totalmente o parzialmente **amorfi (vetri e polimeri)**

$$k = k_{el} + k_{ph}$$

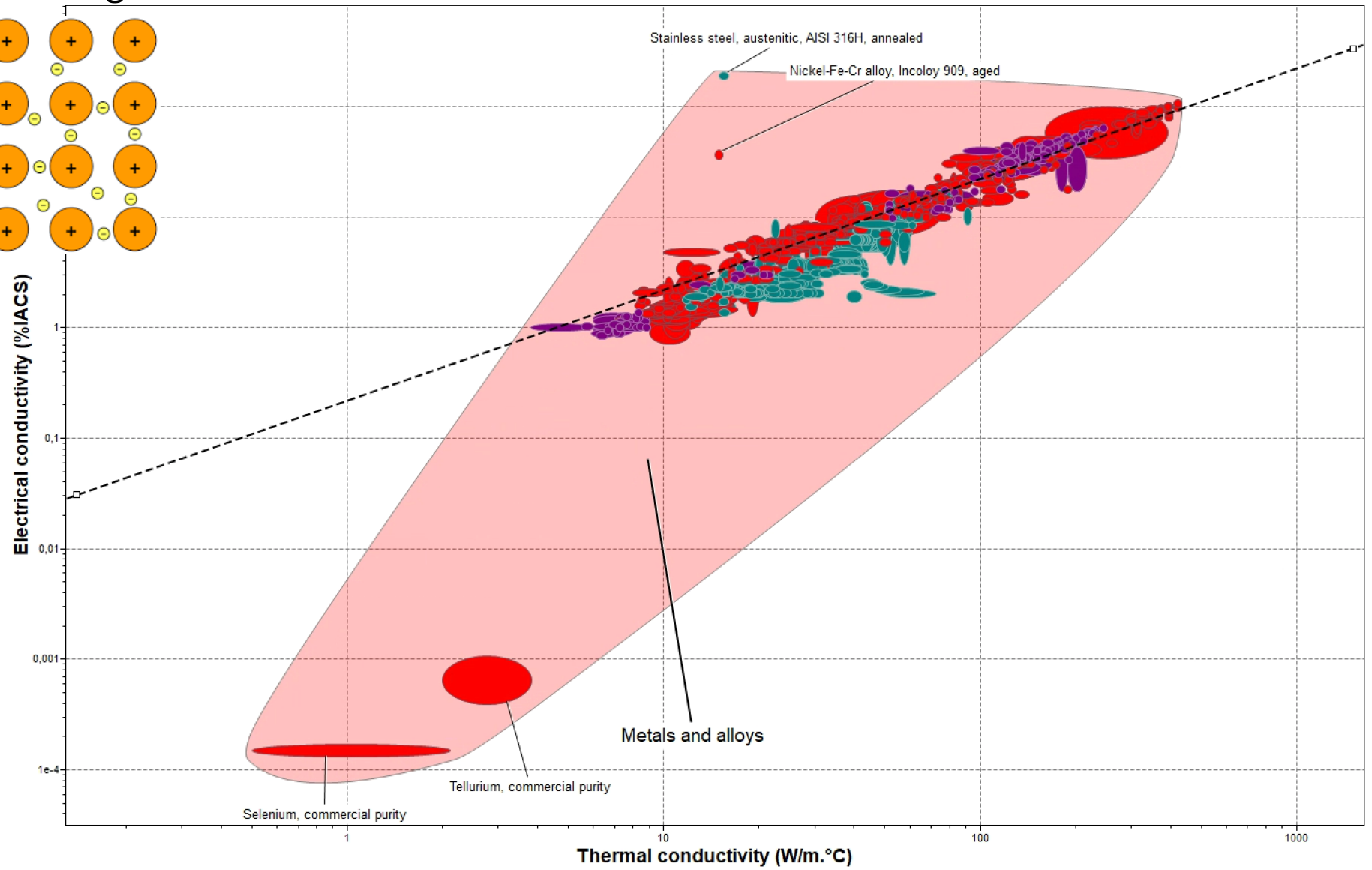
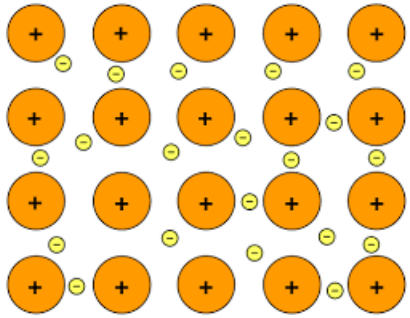
$$\frac{k_{amorfo}}{k_{cristallino}} \cong \left(\frac{\rho_{amorfo}}{\rho_{cristallino}} \right)^6$$

$$\frac{k_{amorfo}}{k_{cristallino}} - 1 \cong 5.8 \cdot \left(\frac{\rho_{amorfo}}{\rho_{cristallino}} - 1 \right)$$

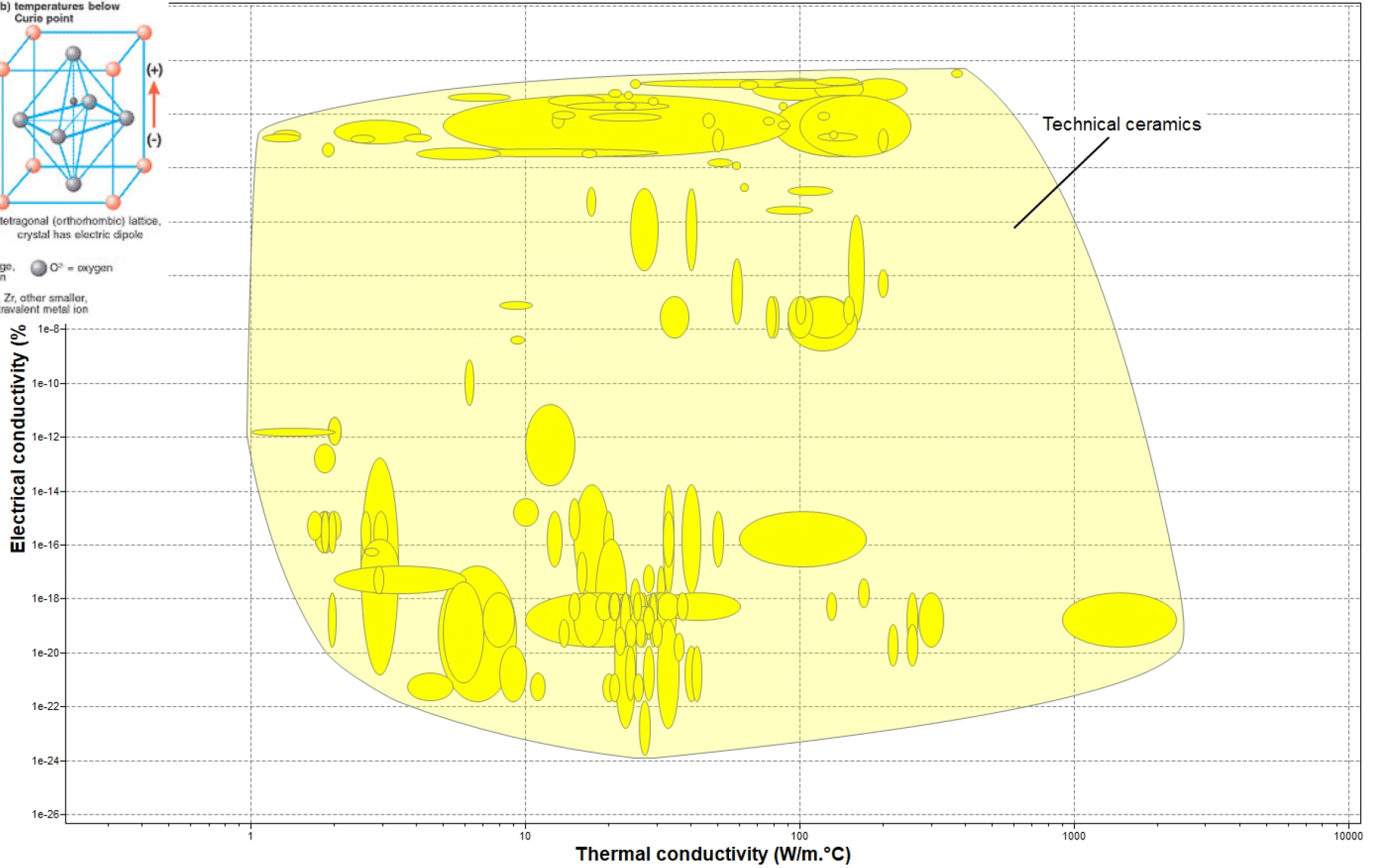
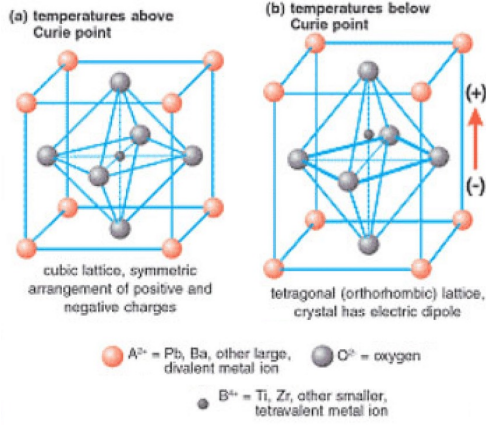
Conducibilità elettrica vs Conducibilità termica dei materiali



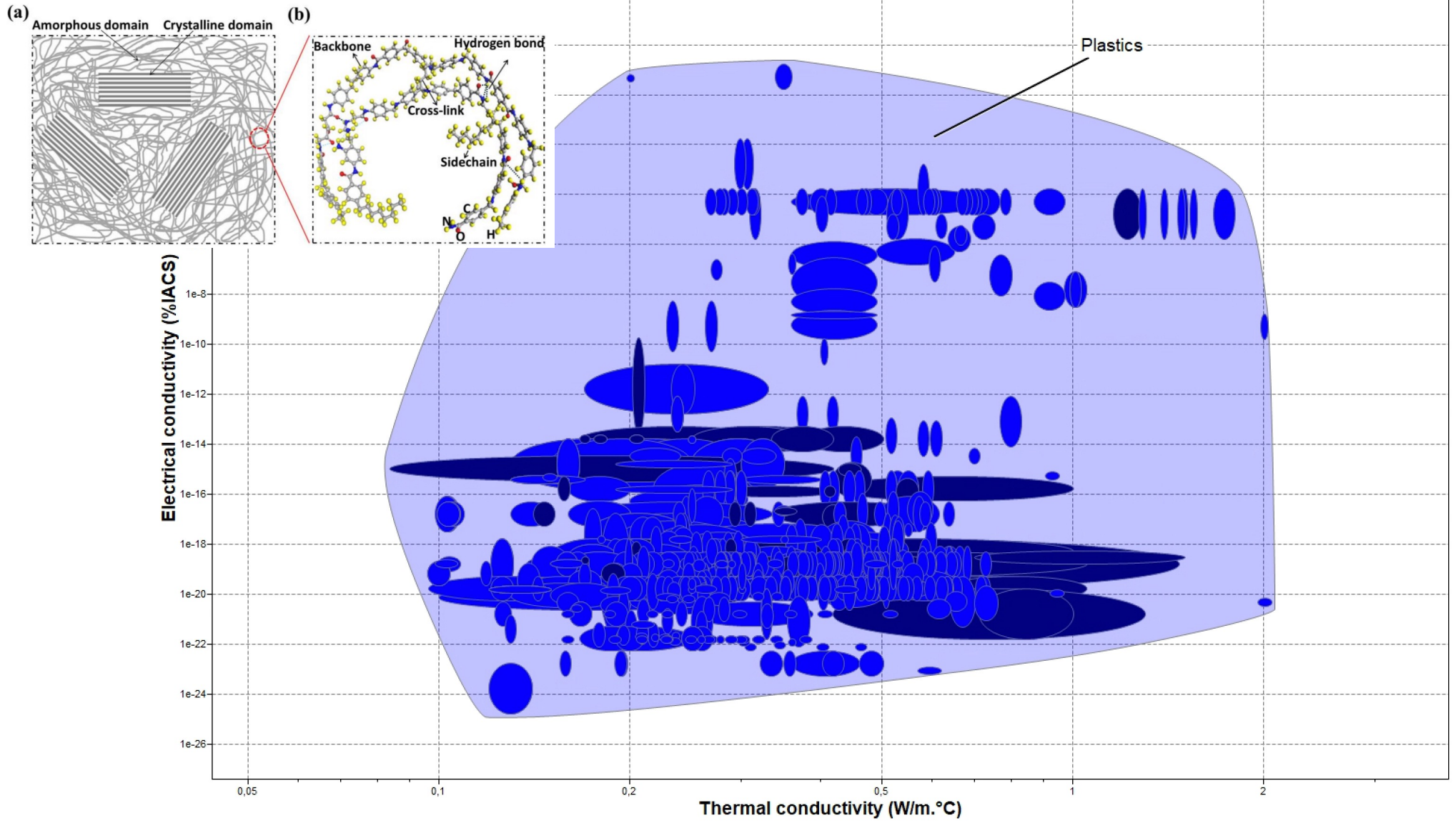
Metalli e loro leghe



Ceramici Tecnici

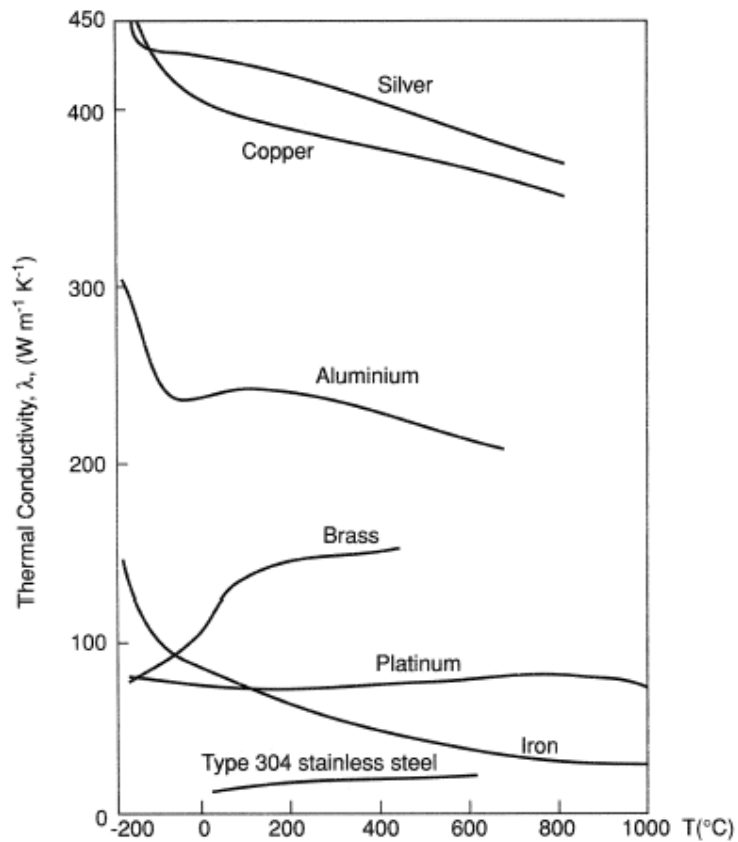


Plastiche

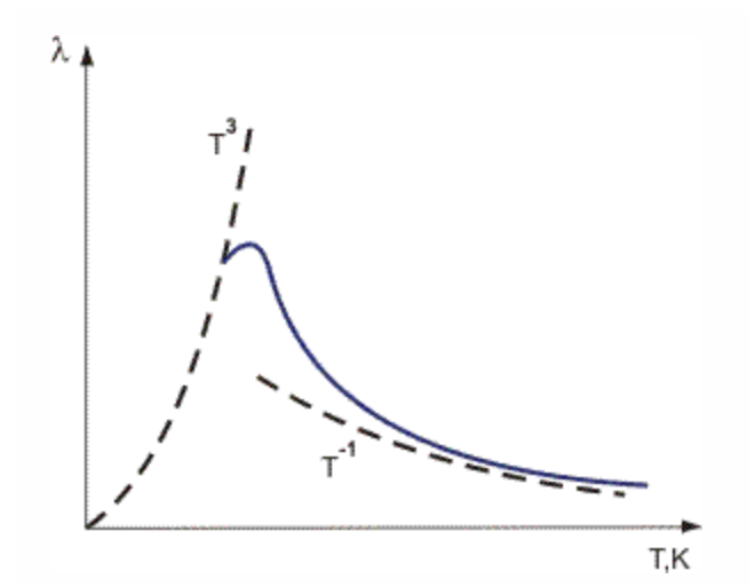


Dipendenza della Conducibilità termica dalla temperatura

Electronic thermal conductivity



Phonon thermal conductivity



Coefficiente di dilatazione termica CTE

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = - \left(\frac{\partial \ln \rho}{\partial T} \right)_p \quad \Delta l = l_0 \cdot [e^{\alpha \cdot \Delta T} - 1]$$

$$\alpha = \frac{1}{l} \left(\frac{\partial l}{\partial T} \right)_p = \left(\frac{\partial \ln l}{\partial T} \right)_p$$

$$\Delta V = V - V_0 = V_0 \cdot \alpha_v \cdot \Delta T \rightarrow V = V_0 \cdot (1 + \alpha_v \cdot \Delta T)$$

$$\Delta l = l - l_0 = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \rightarrow l = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$\Delta x = x - x_0 = x_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \rightarrow x = x_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$\Delta y = y - y_0 = y_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \rightarrow y = y_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$\Delta z = z - z_0 = z_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \rightarrow z = z_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$V = x_0 \cdot y_0 \cdot z_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)^3 \approx V_0 \cdot (1 + 3\alpha \cdot \Delta T)$$

Coefficiente di dilatazione termica CTE

Elemento Monodimensionale

$$\varepsilon_{z,termica} \approx \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \cdot \Delta T \quad \varepsilon_{z,meccanica} = \frac{\sigma}{E}$$

$$\varepsilon_{z,totale} = \varepsilon_{z,meccanica} + \varepsilon_{z,termica} = 0 \rightarrow \frac{\sigma}{E} + \alpha \cdot \Delta T = 0 \rightarrow \sigma = -E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Elemento Bidimensionale

$$\varepsilon_{x,termica} \approx \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \cdot \Delta T \quad \varepsilon_{x,meccanica} = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_y}{E}$$

$$\varepsilon_{y,termica} \approx \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \cdot \Delta T \quad \varepsilon_{y,meccanica} = -\nu \cdot \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E}$$

$$\varepsilon_{x,totale} = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_y}{E} + \alpha \cdot \Delta T$$

$$\varepsilon_{y,totale} = -\nu \cdot \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} + \alpha \cdot \Delta T$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma = \frac{-E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{1 - \nu}$$

Coefficiente di dilatazione termica CTE

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \sigma = \frac{-E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{1 - 2\nu}$$

Elemento Tridimensionale

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{2 \cdot (1 - \nu)}$$

Elemento Bidimensionale
Che divide due ambienti
a diversa temperatura

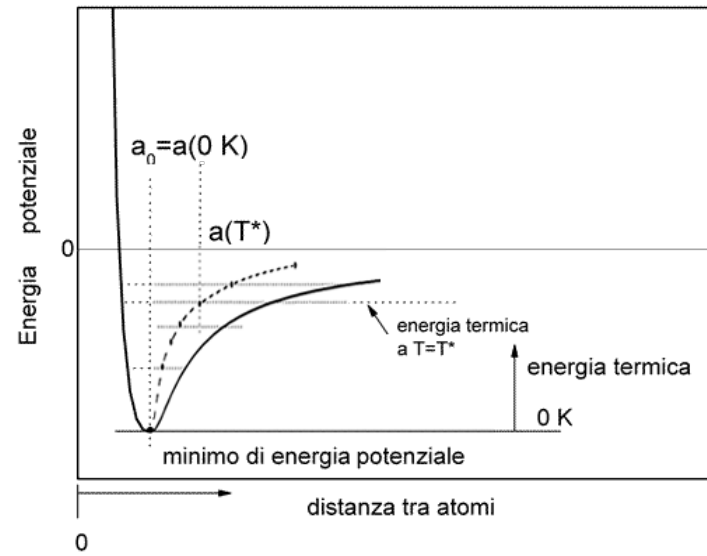
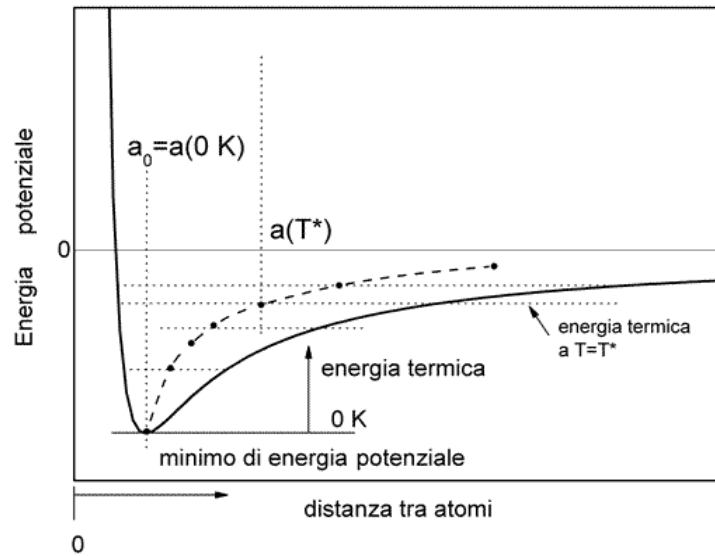
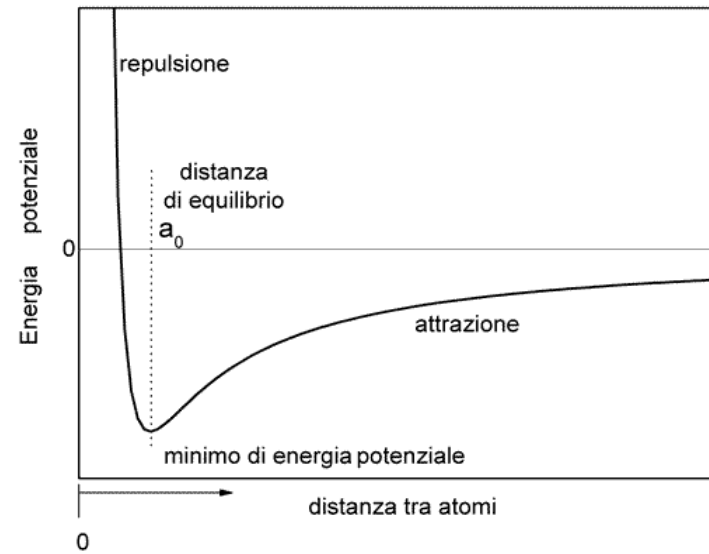
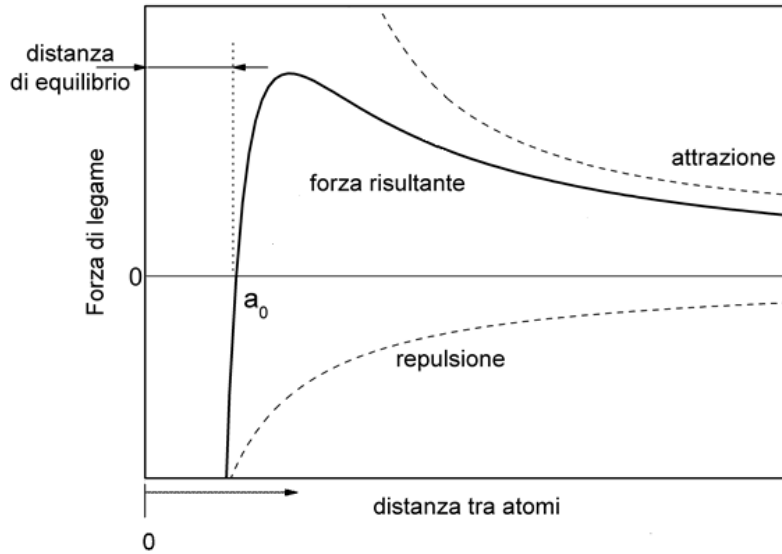
$$\varepsilon_{x,\text{totaleVETRO}} = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_y}{E} + \alpha_V \cdot \Delta T = \varepsilon_{x,\text{totaleMETALLO}} = \alpha_M \cdot \Delta T$$

$$\varepsilon_{y,\text{totaleVETRO}} = -\nu \cdot \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} + \alpha_V \cdot \Delta T = \varepsilon_{x,\text{totaleMETALLO}} = \alpha_M \cdot \Delta T$$

Accoppiamento tra due materiali
diversi,
Ad esempio vetro e metallo

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{E \cdot (\alpha_M - \alpha_V) \cdot \Delta T}{1 - \nu}$$

Significato fisico del CTE

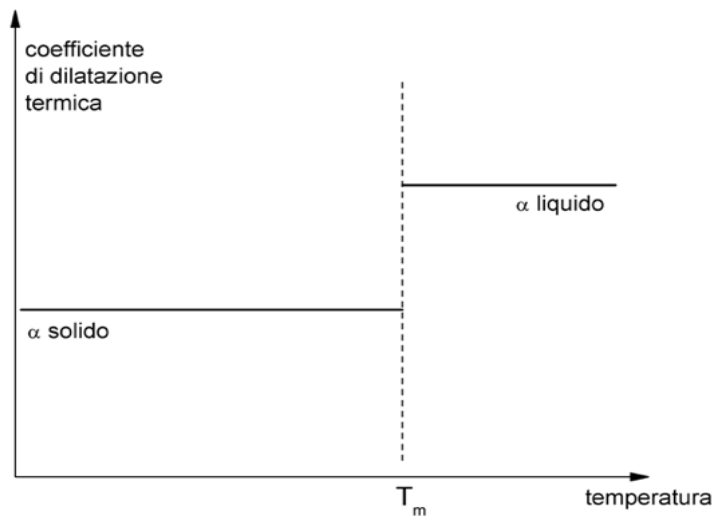
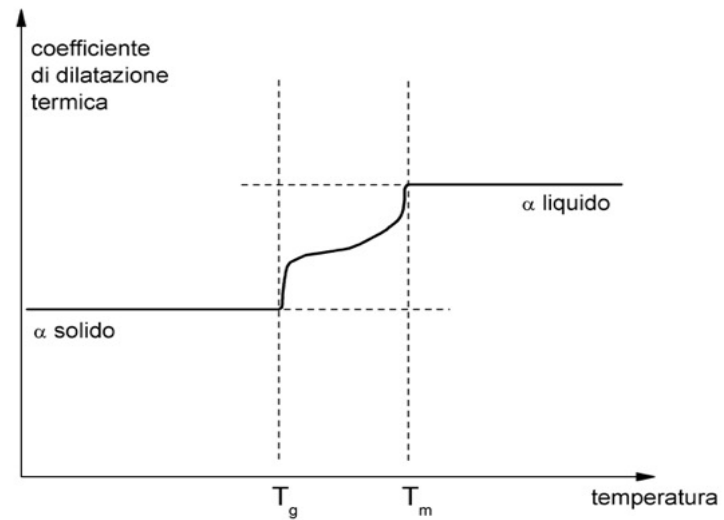
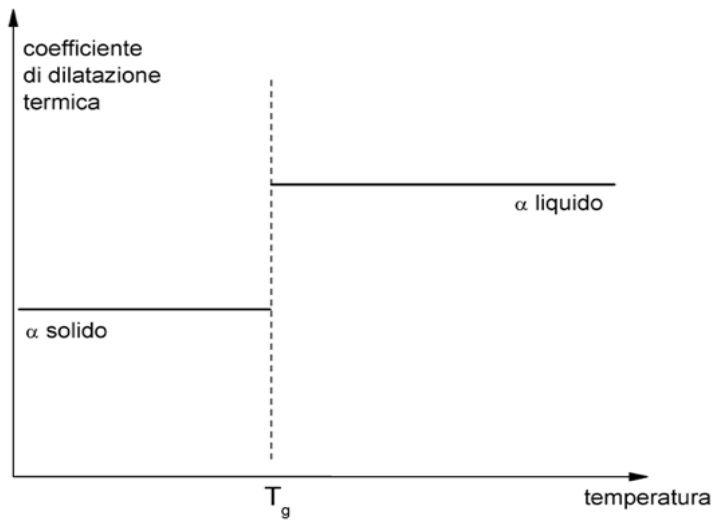


Materiale	α [$\cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]
Rame	16.7
Al e leghe	21 – 25
Acciai	11 - 13
PVC	52
Gomma	77
Resina epossidica	54
Vetro comune	8.5
Vetro borosilicato	3.3
Si	3.2
Diamante	1
SiO ₂ vetrosa	0.6
SiO ₂ quarzo	13
Al ₂ O ₃	6.0 - 7.6
Mullite (Al ₆ Si ₄ O ₁₃)	4 - 6
SiC	3.5 - 4.8
Si ₃ N ₄	2.1 - 2.6
Al ₂ TiO ₅	0 - 1.8
Vetroceramiche Zerodur	0.0
Vetroceramiche Pyroceram	0.5

Thermal Shock Resistance Parameters

$$\text{TSP} = \frac{k \cdot \sigma_{\text{rott}}}{E \cdot \alpha}$$

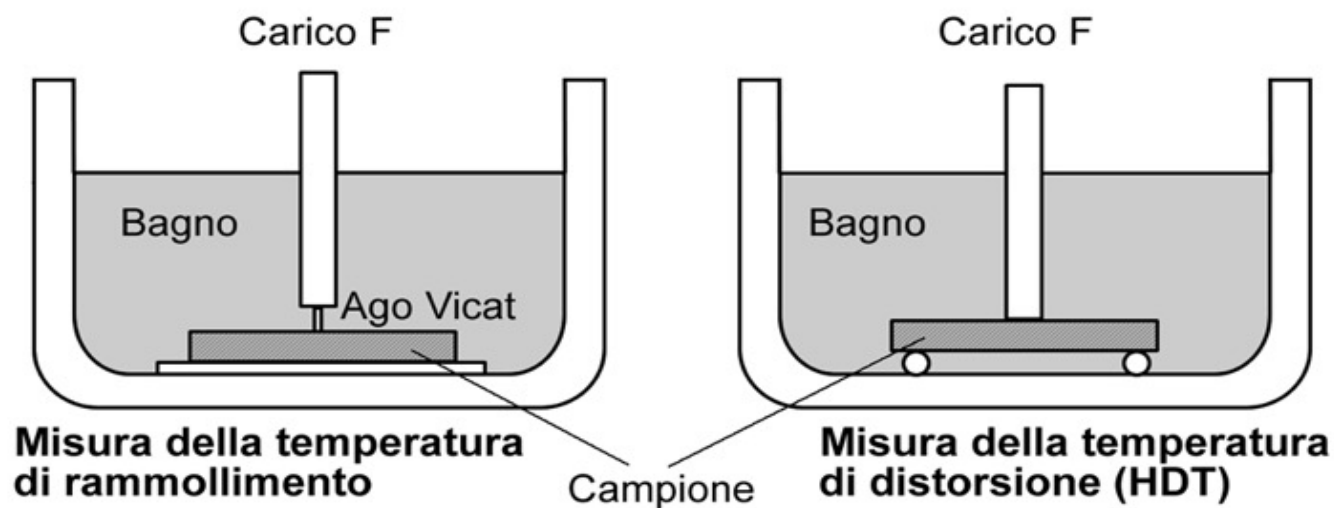
Dipendenza del CTE dalla Temperatura



Temperatura di rammollimento e temperatura di distorsione

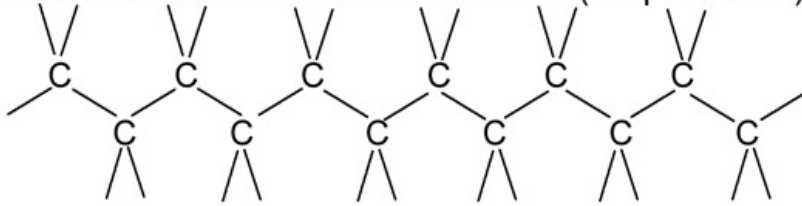
La temperatura di rammollimento (norma DIN ISO 306) è definita come la temperatura alla quale un “ago di Vicat” (punzone con estremità piatta e con area di 1 mm²), sottoposto ad un determinato carico (10 N per il procedimento “A”, oppure 50 N, per il procedimento “B”, preferito), penetra di 1 mm all’interno del campione; la temperatura del campione viene controllata per immersione all’interno di un bagno liquido (la prova viene eseguita “dinamicamente”, riscaldando progressivamente il bagno, ad una velocità tipicamente di 50°C/h).

La HDT (norma ISO 75 e ASTM D648) viene valutata controllando l’abbassamento in mezzeria di un campione sottoposto a flessione (allungamento delle fibre in trazione dello 0.2%), sotto carichi predefiniti (corrispondenti a sforzi di 1.85 MPa, per il procedimento A, preferito, oppure 0.46 MPa per il procedimento B o 8 MPa per il procedimento C) e sempre in immersione (la prova è sempre eseguita dinamicamente, con una velocità di riscaldamento di 2°C/min).

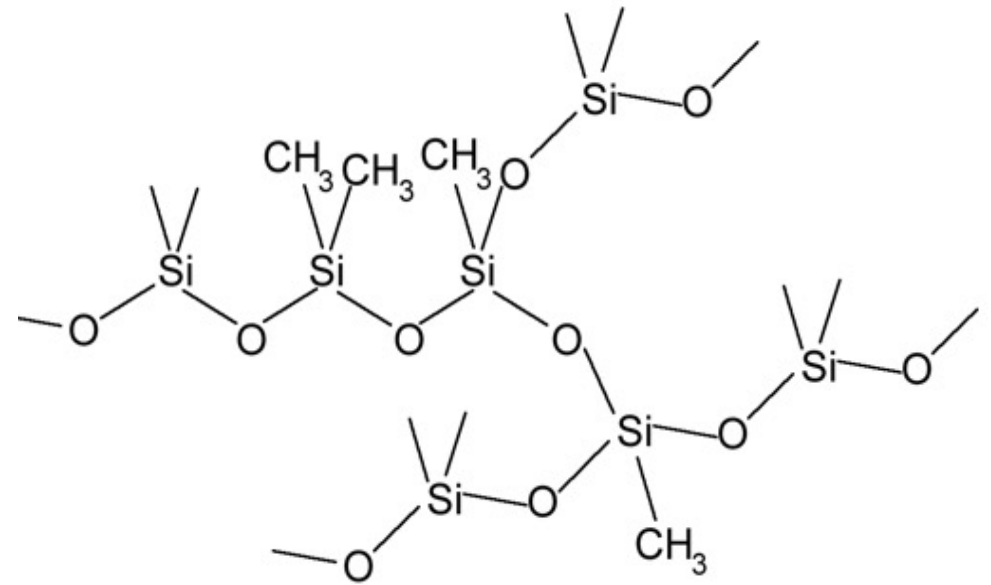
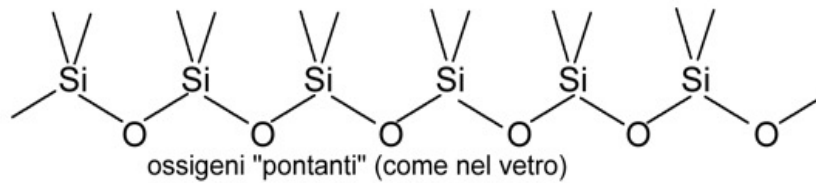


Polimeri ad elevata stabilità termica

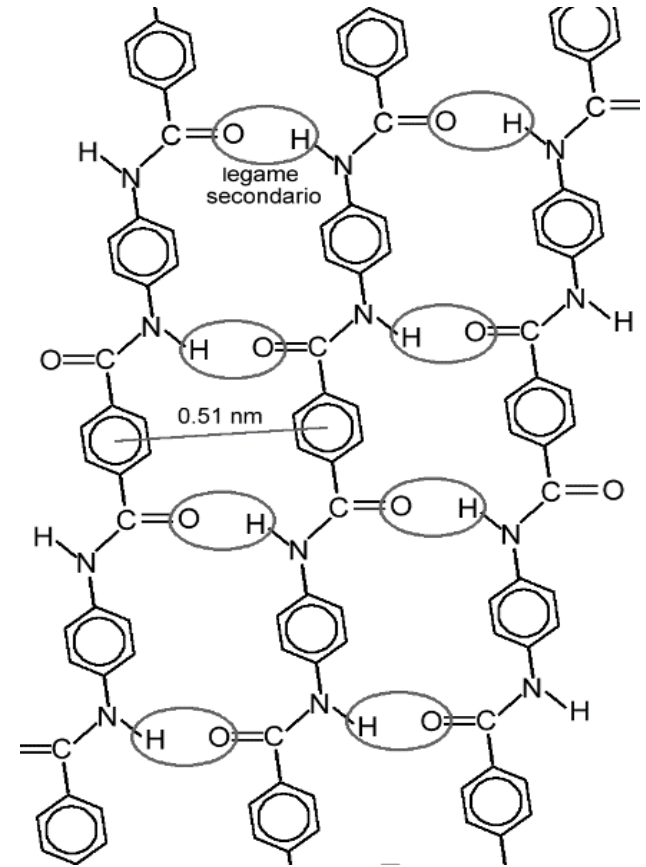
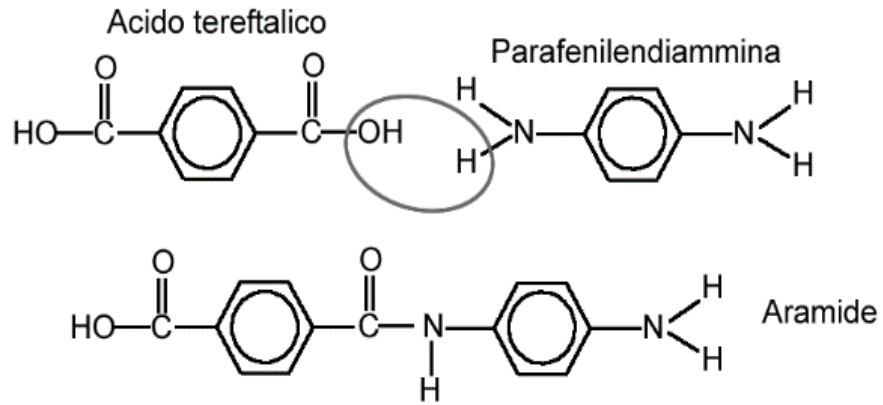
polimero con catena di atomi di carbonio (es. poliolefina)



polimero con catena silossanica (silicone)

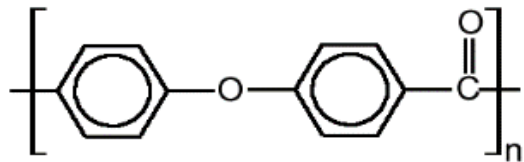
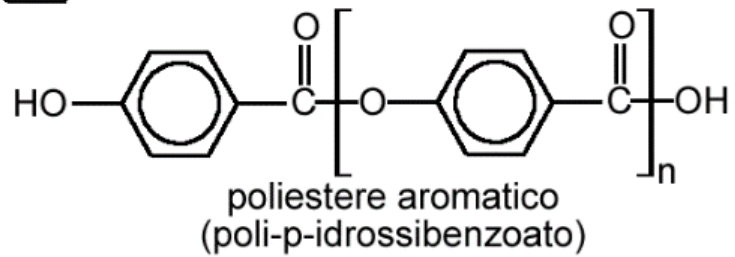
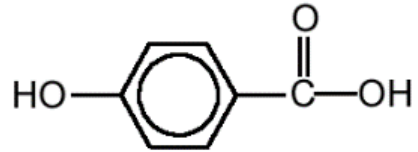


Poliaramidi-Kevlar e Nomex

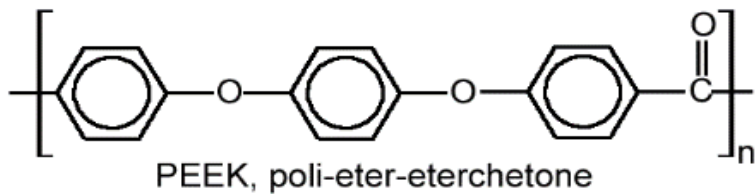


Poliesteri aromatici e polieterchetoni

idrossiacido aromatico

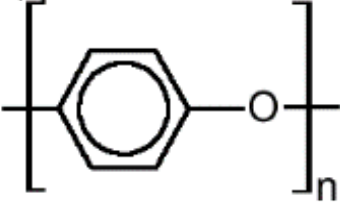


PEK
poli-eterchetone

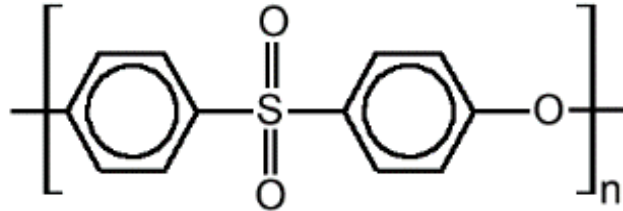
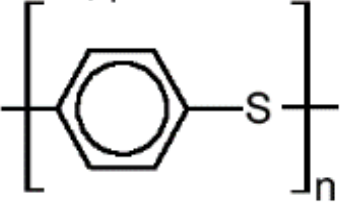


Polisolfoni

PPE, poli-fenilen-etere



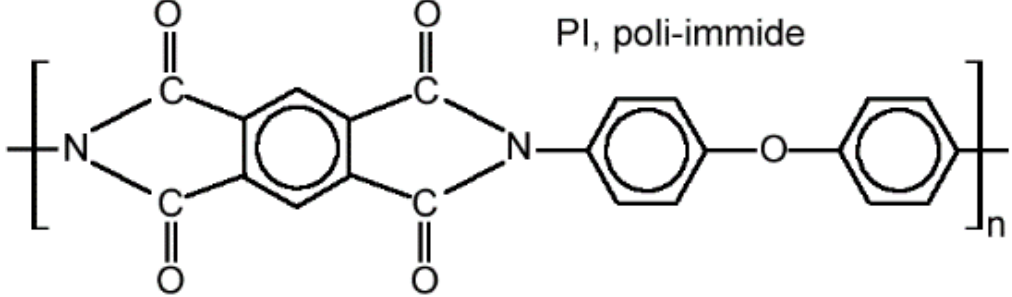
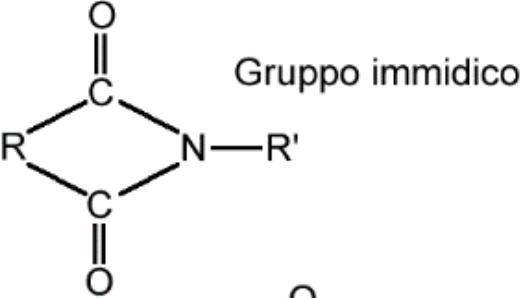
PPS, poli-fenilen-solfuro



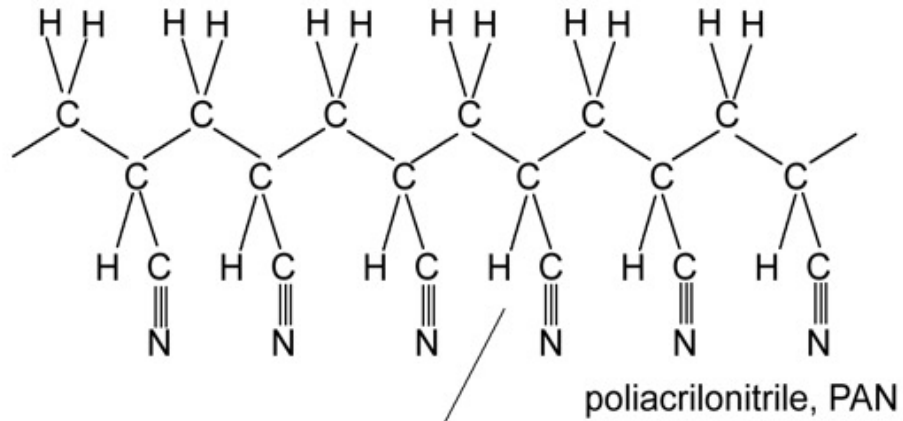
PES, poli-eter-solfone



Poli-immidi



Polimeri Ladder : PAN



polimero "ladder" *trattamento termico, sotto stiro*

