

Materiali Polimerici e Compositi

8 – Proprietà Funzionali

Proprietà funzionali

- Densità
- Termiche
- Elettriche
- Ottiche
- Acustiche
- Proprietà barriera
- Altri metodi di caratterizzazione

Densità e Volume Specifico (1/ρ)

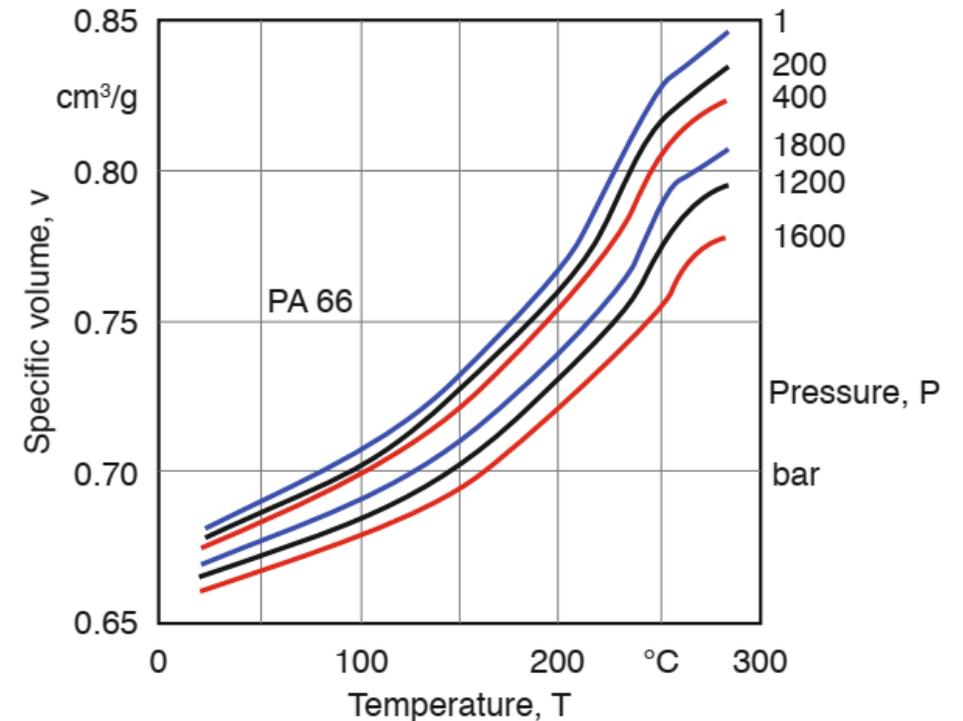
- Densità $\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}}$

– Per i polimeri il volume specifico (il reciproco della densità) viene rappresentato in funzione di temperatura e pressione

→ Diagrammi p-v-T

Polimeri semicristallini:

Variazione della pendenza delle curve in corrispondenza della temperatura di fusione (per il PA 66 $T_m \approx 250^\circ\text{C}$).

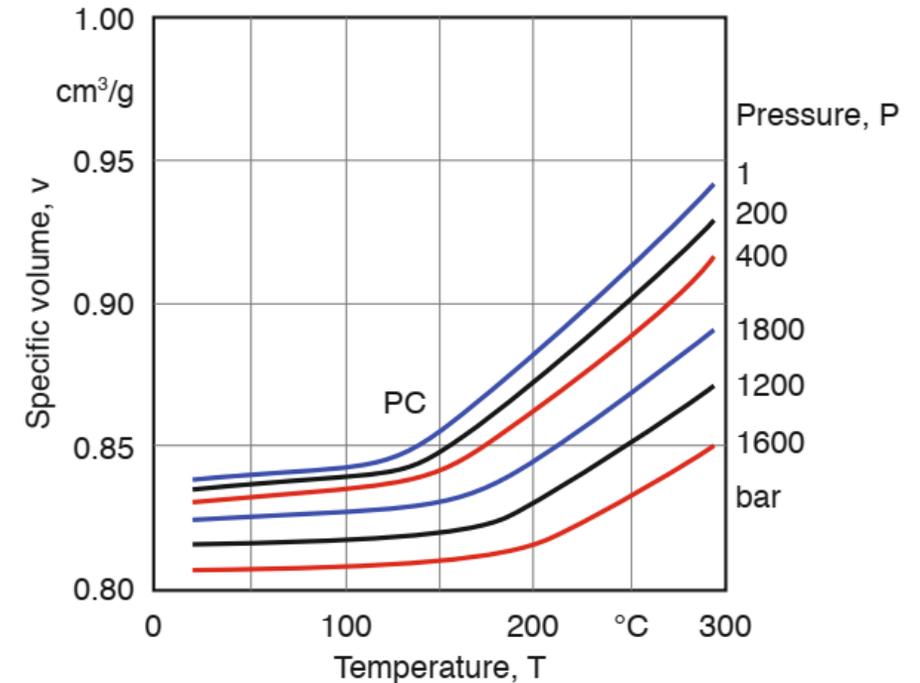


Densità e Volume Specifico ($1/\rho$)

Polimeri amorfi:

Variazione di pendenza nelle curve in corrispondenza della temperatura di transizione vetrosa ($T_g \approx 150^\circ\text{C}$).

→ Si veda la trattazione in cap. 3 «Struttura»



Proprietà termiche

- **Temperatura di fusione**: passaggio del materiale solido avente una struttura a catene molecolari ordinate, in un liquido viscoso la cui struttura è fortemente disordinata. La fusione di un polimero non avviene ad una determinata temperatura ma all'interno di un intervallo di temperature.
- **Temperatura di transizione vetrosa (T_g)**: segna il passaggio repentino da un comportamento fragile e rigido ad uno elastomerico e gommoso.

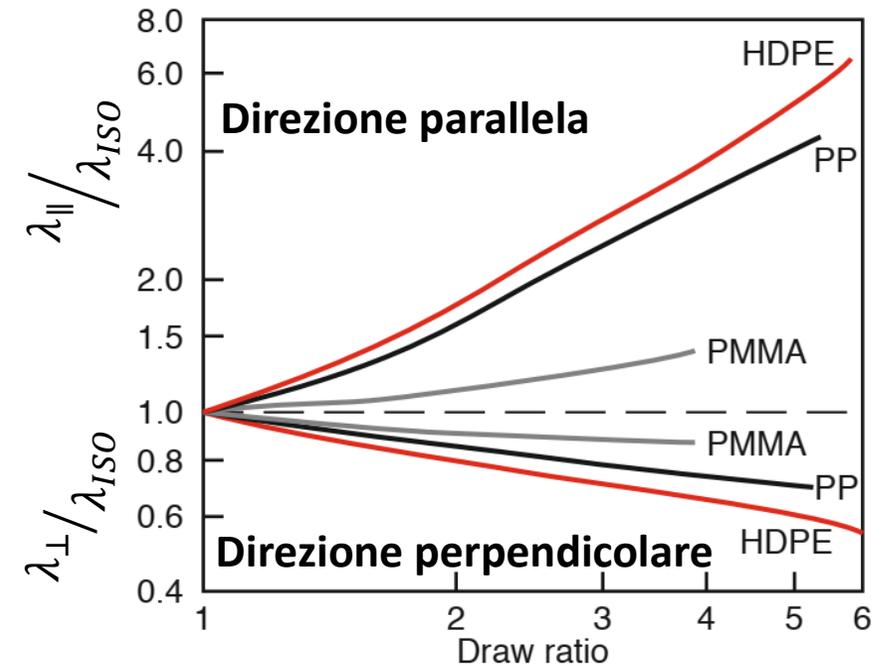
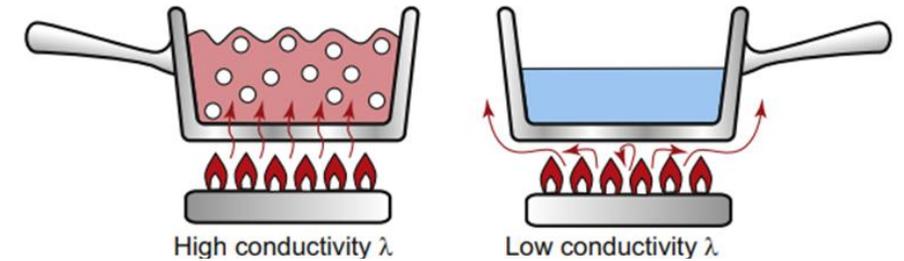
Proprietà termiche – Conducibilità Termica

- La **conducibilità termica λ** (W/mK) descrive come si propaga il calore attraverso un solido in condizioni di stato stazionario.

- Acciaio inossidabile $\lambda = 12 \div 24$ W/mK
- Vetro $\lambda = 1.4 \div 1.5$ W/mK
- PET $\lambda = 0.14 \div 0.15$ W/mK
- Schiuma polimerica rigida $\lambda = 0.023 \div 0.040$ W/mK

I valori di conducibilità termica delle diverse materie plastiche variano notevolmente nell'intervallo di temperatura di interesse tecnico.

La conducibilità è influenzata dall'orientazione delle molecole (conseguente alla trafilatura): aumenta in direzione parallela, si riduce perpendicolarmente.



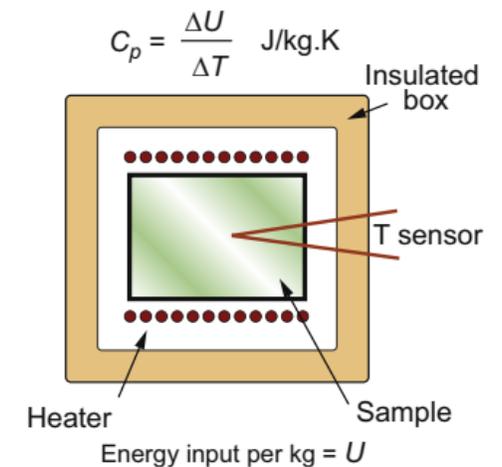
Proprietà termiche – Calore Specifico

- Il calore specifico è definito come l'energia necessaria per aumentare la temperatura di un 1kg di sostanza di 1 grado Kelvin.

Serve a determinare la quantità di energia necessaria per aumentare la temperatura del materiale.

- Acciaio inossidabile $C_p = 450 \div 530 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- PET $C_p = 1400 \div 1500 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- La capacità termica è definita come il prodotto tra il calore specifico e la massa del corpo.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

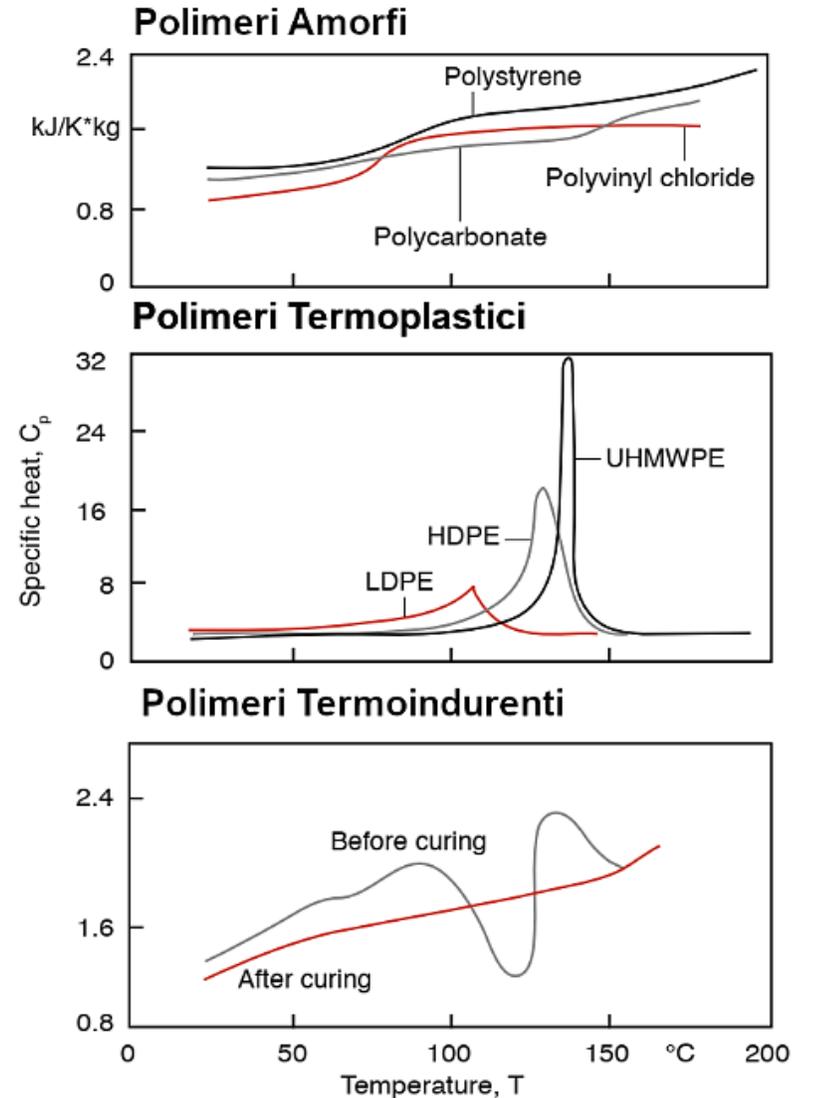


Proprietà termiche – Calore Specifico

Polimeri amorfi e semicristallini: brusco cambiamento alla temperatura di transizione vetrosa

I materiali termoplastici semicristallini presentano una discontinuità nel calore specifico alla temperatura di fusione. Questo discontinuità nel calore specifico include il calore necessario per fondere i cristalliti, solitamente chiamato **calore di fusione**. Pertanto, il calore specifico dipende dal grado di cristallinità.

Durante la reticolazione dei termoindurenti, le reazioni che avvengono sono accompagnate da notevoli effetti termici (reazioni esotermiche). Una volta reticolati, l'andamento del calore specifico è simile a quello dei termoplastici amorfi.



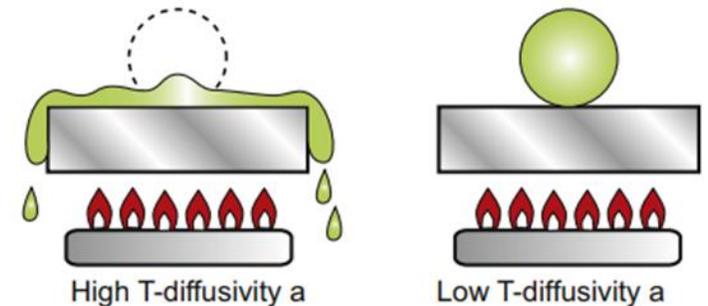
Proprietà termiche – Diffusività Termica

La diffusività termica a (m^2/s) descrive la propagazione del calore in condizioni non stazionarie (la temperatura cambia nel tempo). È definita come il rapporto tra conducibilità termica e il prodotto tra densità e calore specifico.

È importante nei processi di riscaldamento e raffreddamento.

- Acciaio inossidabile $a = 8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Vetro $a = 0.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- PET $a = 0.1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$$



Proprietà termiche – Penetrazione Termica

In aggiunta alla diffusività termica si utilizza anche il numero di [penetrazione termica](#):

b è funzione di T e si esprime: $b = \sqrt{\lambda \cdot Cp \cdot \rho}$

Noto b , si può calcolare la **T_c di equilibrio** a seguito del contatto di due corpi A e B a diversa temperatura T_A e T_B

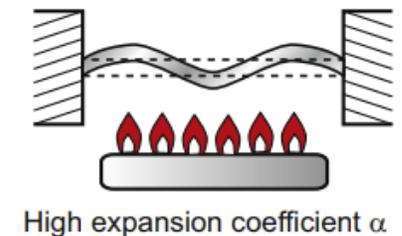
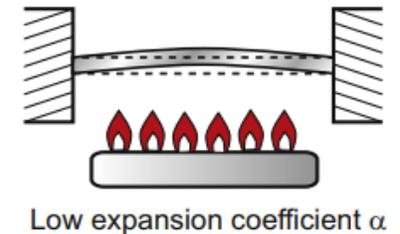
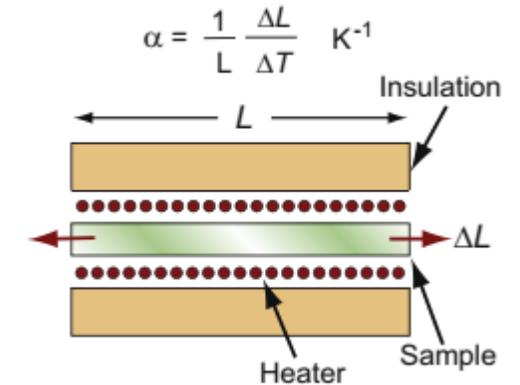
$$T_c = \frac{b_A \cdot T_A + b_B \cdot T_B}{b_A + b_B}$$

Parametro importante per:

- ▶ Processing: calcolo delle T per utensili e stampi
- ▶ Utilizzo: p.es. manici di pentole / tazze / isolanti termici in industria aerospaziale

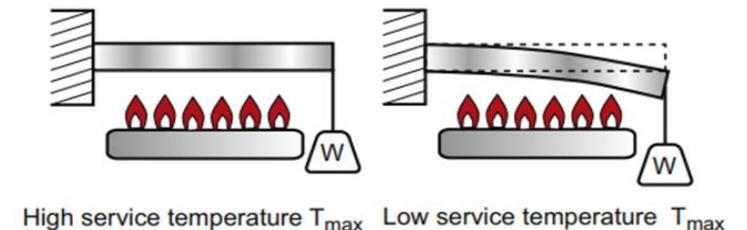
Proprietà termiche – Espansione Termica

- La maggior parte dei materiali quando vengono scaldati si espandono. [Il coefficiente di espansione termica](#) misura la variazione di lunghezza per grado di temperatura.
- I **polimeri termoplastici** hanno coefficienti di espansione termica molto elevati, poiché sono materiali debolmente legati e richiedono un minore apporto di energia termica per espandere la struttura ($\alpha_t \approx 90-120 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$).
- I **polimeri termoindurenti**, che hanno una struttura tridimensionale di legami covalenti forti, presentano una minore espansione termica ($\alpha_t \approx 30-70 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$).
- Acciaio inossidabile $\alpha_t = 13 \div 20 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
- Vetro $\alpha_t = 0.55 \div 0.75 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$



Proprietà termiche – Temperatura di servizio

- **Temperatura di servizio massima**: temperatura massima alla quale il materiale può essere utilizzato senza che vada incontro a degradazione, ossidazione o si riduca la resistenza meccanica. Per i polimeri 150÷200°C.
- **Temperatura di servizio minima**: temperatura al di sotto della quale il materiale diventa fragile.
- Dipende anche da:
 - il rammollimento o l'infragilimento reversibile sotto carichi termici a breve termine.
 - il comportamento sotto l'influenza della temperatura a lungo termine con o senza carichi aggiuntivi.



Proprietà termiche di alcuni polimeri

Polymer	Specific gravity	Specific heat (kJ/kg°C)	Thermal conductivity (W/m/K)	Coeff. of therm. exp. ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{K}$)	Thermal diffusivity (m^2/s) $\times 10^{-7}$	Max temperature (°C)
ABS	1.04	1.47	0.3	90	1.7	70
Acetal (homo-pol.)	1.42	1.47	0.2	80	0.7	85
Acetal (co-pol.)	1.41	1.47	0.2	95	0.72	90
Acrylic	1.18	1.47	0.2	70	1.09	50
Cellulose acetate	1.28	1.50	0.15	100	1.04	60
Epoxy	1.90	-	0.23	70	-	130
Mod. PPO	1.06	-	0.22	60	-	120
PA 66	1.14	1.67	0.24	90	1.01	90
PA 66 +30% GF	1.38	1.26	0.52	30	1.33	100
PET	1.37	1.05	0.24	90	-	110
PET +30% GF	1.63	-	-	40	-	150
Phenolic	1.40	1.30	0.35	22	1.92	185
PC	1.15	1.26	0.2	65	1.47	125
u-Polyester	1.20	1.20	0.2	100	-	-
PP	0.905	1.93	0.24	100	0.65	100
PS	1.05	1.34	0.15	80	0.6	50
LDPE	0.92	2.30	0.33	200	1.17	50
HDPE	0.95	2.30	0.63	120	1.57	55
PTFE	2.10	1.00	0.25	140	0.7	50
u-PVC	1.40	1.00	0.16	70	1.16	50
p-PVC	1.30	1.67	0.14	140	0.7	50
SAN	1.08	1.38	0.17	70	0.81	60
PS-foam	0.032	-	0.032	-	-	-
Steel	7.854	0.434	60.00	-	14.1	800

Calorimetria Differenziale a Scansione – DSC

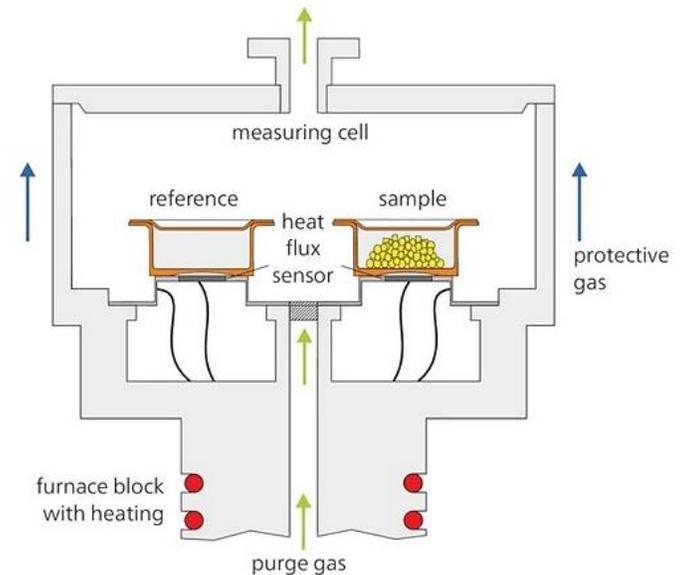
Funzionamento:

Le misure DSC prevedono che mentre il campione e il riferimento sono sottoposti allo stesso programma di temperatura controllata in un'atmosfera specifica, viene misurata la differenza tra il flusso di calore del campione e quello riferimento in funzione della temperatura/tempo

- Nel **DSC a flusso di calore**, il campione e il materiale di riferimento vengono riscaldati (o raffreddati) a velocità controllata fianco a fianco in un'unica cella, registrando contemporaneamente la differenza di temperatura tra loro, dovuta alla differenza di calore specifico tra il provino e il riferimento. Da questa differenza di temperatura si ricava la differenza di flusso di calore tra provino e riferimento.
- **Power compensation:** il campione e il riferimento vengono scaldati (o raffreddati) in modo indipendente a una velocità controllata in celle adiacenti e separate. Viene registrata la differenza di potenza necessaria a mantenere campione e riferimento alla stessa temperatura.

Questa tecnica serve per investigare processi che coinvolgono scambi termici come: fusione, cristallizzazione, reticolazione (termoindurenti) transizione vetrosa.

DSC a flusso di calore

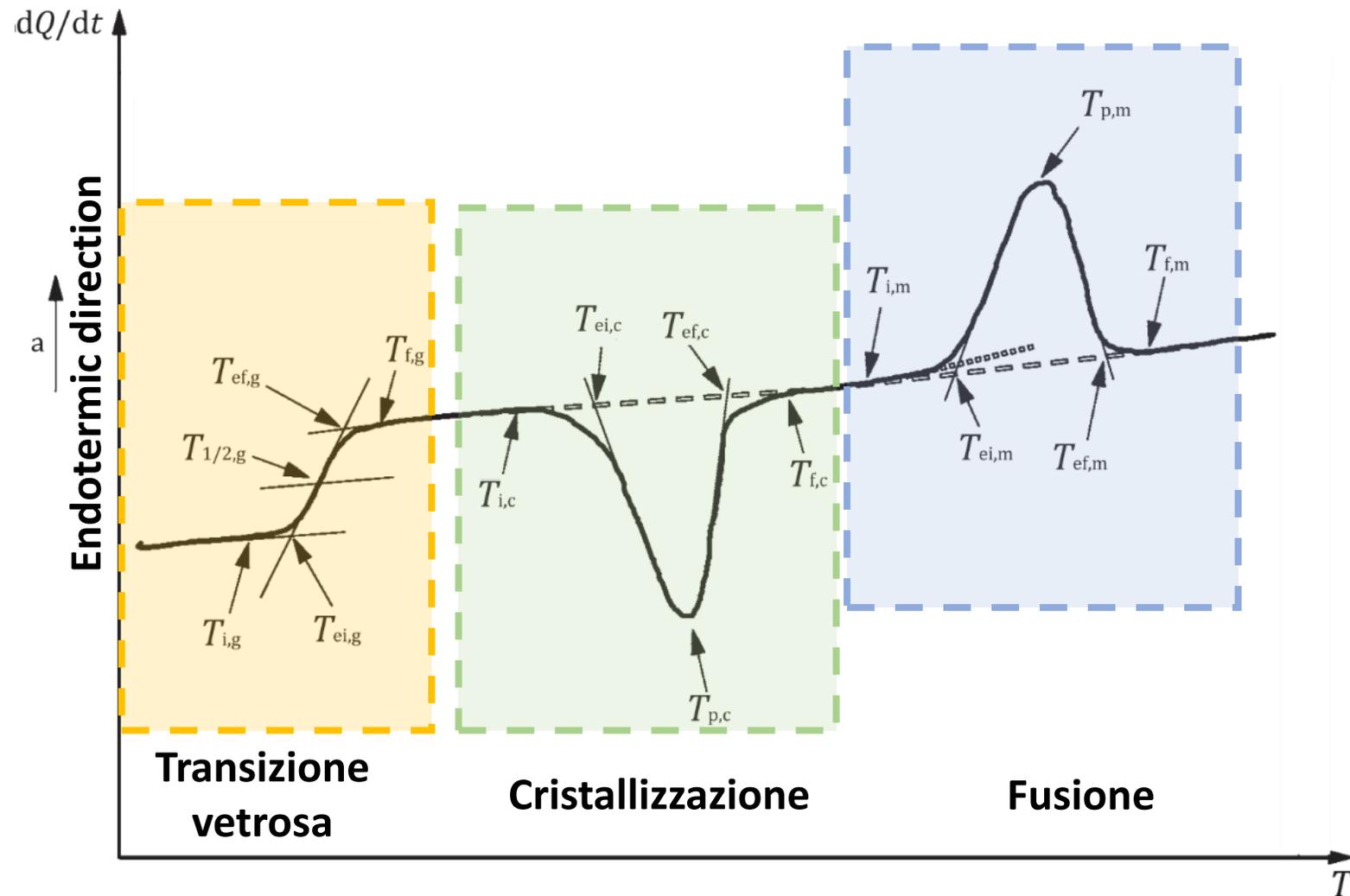


Normative applicabili

ISO 11357

ASTM D3418, ASTM E1356

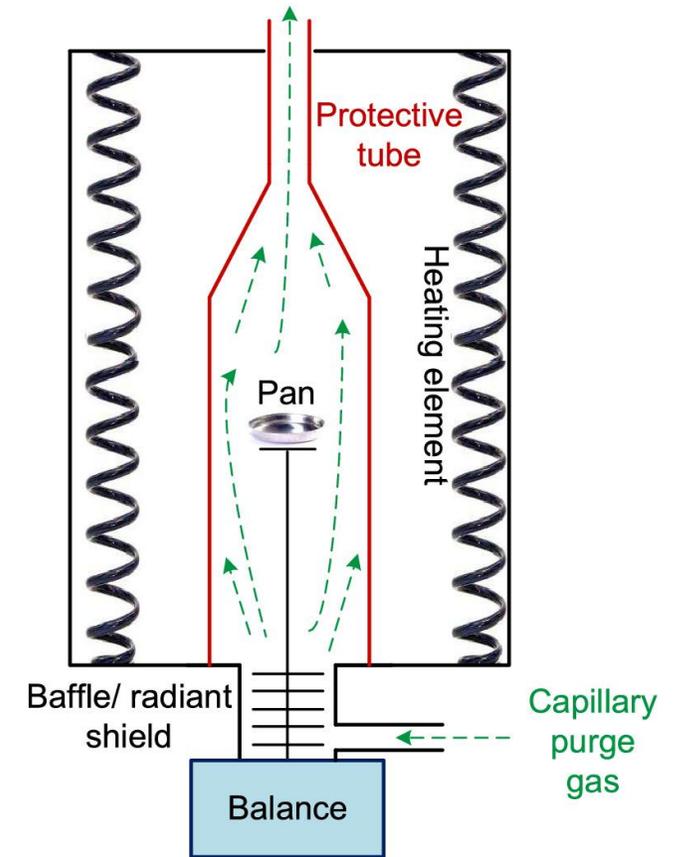
Calorimetria Differenziale a Scansione – DSC



Termogravimetria

Funzionamento:

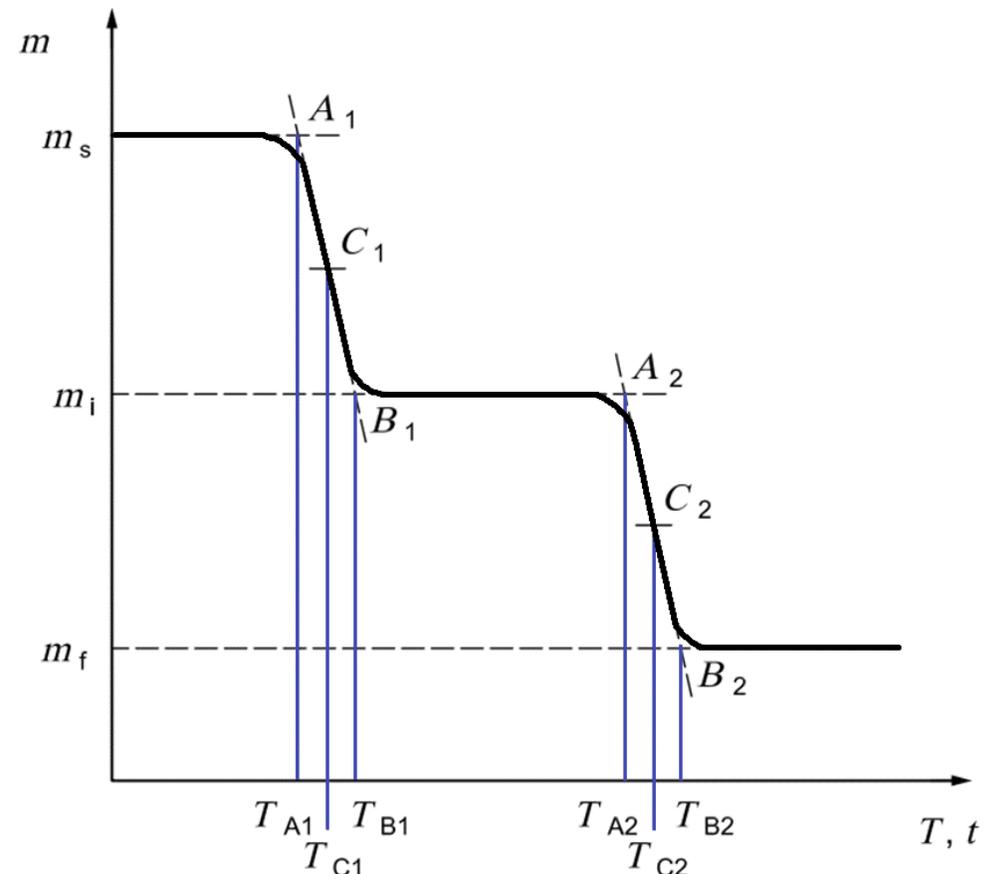
Il campione viene riscaldato a temperatura controllata ad una specifica velocità e contemporaneamente viene misurata la variazione di massa in funzione della temperatura. In alternativa il campione viene mantenuto a temperatura costante e viene misurata la variazione di massa in funzione del tempo. Durante la misura il campione può essere mantenuto in atmosfera inerte o in atmosfera ossidante. Si possono raggiungere temperatura pari a 1200°C.



Normative applicabili
ISO 11358

Termogravimetria

- **Viene utilizzata per determinare:** temperatura e velocità di decomposizione, percentuale di volatili, additivi e cariche.
- Per misurare il contenuto inorganico nella plastica (ASTM D5630, ISO 3451) si può utilizzare il **contenuto di ceneri** (ashes content).

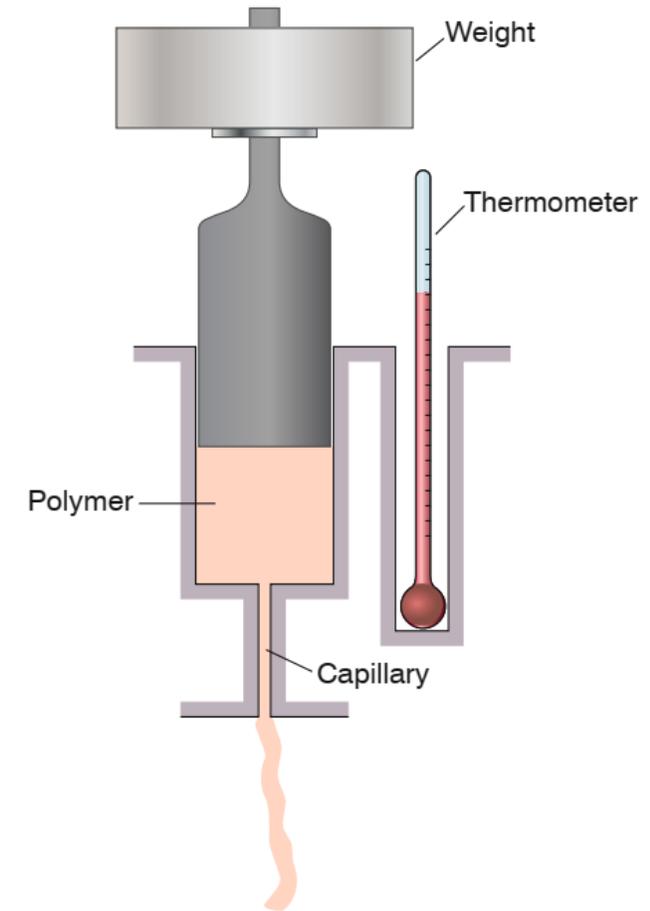


Perdita di massa in due passi

Melt flow index

La portata in massa (Melt mass-flow rate - MFR) e la portata volumetrica (Melt volume-flow rate MVR) sono determinate facendo fluire il materiale fuso attraverso un capillare di lunghezza e diametro specifici in condizioni di temperatura e carico stabilite dalle norme

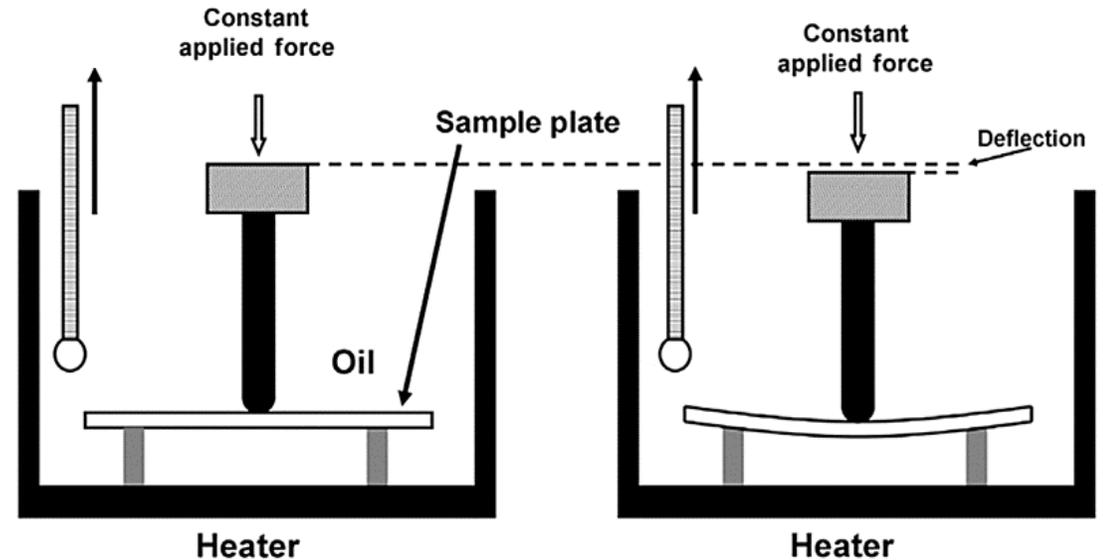
- **Melt mass-flow rate (MFR):** massa estrusa in un tempo specifico (grammi per 10 minuti)
- **Melt volume-flow rate (MVR):** il volume estruso in un tempo specifico (cm³ in 10 minuti).
- Viene utilizzato nell'industria per caratterizzare la fusione di polimeri e come rapido strumento per il controllo qualità.



Normative applicabili
ISO 1133
ASTM D1239

Heat deflection temperature (HDT)

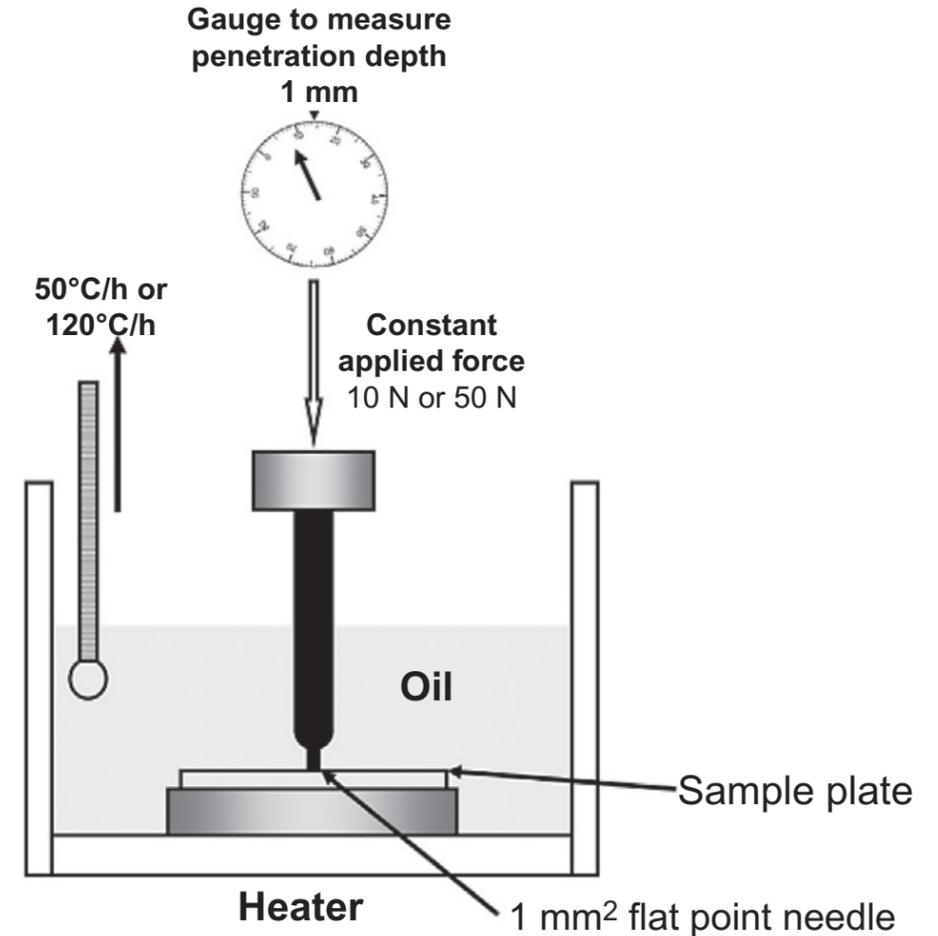
Un campione viene sottoposto a flessione a tre punti a carico costante e riscaldato velocità costante. La HDT è la temperatura alla quale il campione raggiunge il valore di deflessione standard (calcolata sulla base delle dimensioni del campione e una deformazione a flessione dello 0.2%).



Normative applicabili
ISO 75, ASTM D 648

Punto di rammollimento (VICAT)

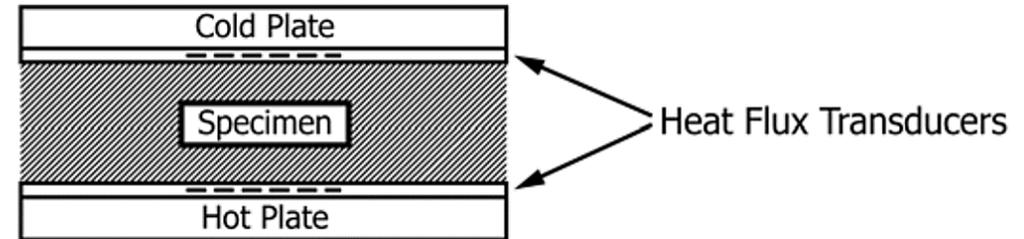
- La temperatura di rammollimento Vicat è la temperatura alla quale un ago penetra nel campione ad una profondità di 1 mm sotto un carico specifico e utilizzando una velocità di riscaldamento uniforme.



Normative applicabili
ISO 306, ASTM D 1525

Conducibilità termica con termoflussimetro

- Il campione di prova viene collocato tra due piastre riscaldate con la differenza di temperatura definita e una volta raggiunto l'equilibrio termico, viene misurato il flusso di calore attraverso il campione.
- Per il calcolo della conducibilità termica (λ) si utilizza il flusso di calore medio e la resistenza termica (R).
- La trasmittanza termica (U) è il reciproco della resistenza termica totale. Più basso è il valore U, migliore è la capacità isolante.



$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{A} \frac{L}{\Delta T} \quad R = \frac{L}{\lambda} \quad U = \frac{1}{R}$$

Normative applicabili
ASTM C518, UNI EN
12667, UNI EN 12664

Reazione al fuoco

– Vedi video prove di reazione al fuoco.

→ Si veda la trattazione in cap. 4 «Miscelazione e additivi»

Normative applicabili

UNI EN ISO 11925-2, UL 94

Proprietà elettriche

- A differenza dei metalli, i polimeri comuni sono scarsi conduttori di elettroni.
- Le loro proprietà elettriche dipendono dalla struttura e morfologia della catena.
- I materiali plastici vengono utilizzati nelle applicazioni elettriche ed elettroniche a causa delle loro **proprietà isolanti** (es. PE per l'isolamento dei cavi).
- Le proprietà elettriche possono venir modificate con l'aggiunta di additivi.

Proprietà elettriche - Comportamento dielettrico

Consideriamo un condensatore a piastre parallele caricato da un circuito. La **carica accumulata** dal condensatore è proporzionale al voltaggio V mediante una costante di proporzionalità C , detta **capacità elettrica o capacitanza**.

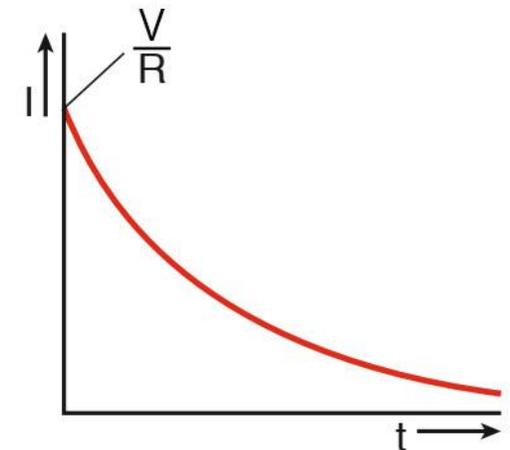
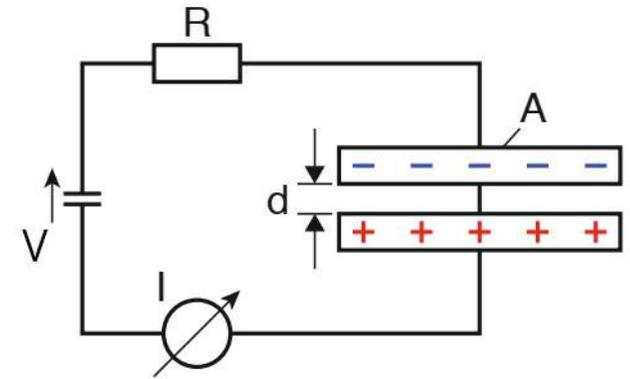
$$Q = C \cdot V$$

La capacitanza per un condensatore a piastre parallele in vuoto è data da

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

Dove ϵ_0 è il **coefficiente dielettrico nel vuoto**, A è l'area della piastra, d è la distanza tra le piastre. Quindi la carica in questo caso è data da

$$Q_0 = C_0 \cdot V$$



Proprietà elettriche - Comportamento dielettrico

Se tra le piastre inseriamo un dielettrico reale, a parità di voltaggio V , la carica aumenterà di un fattore ϵ_r

$$Q = \epsilon_r Q_0$$

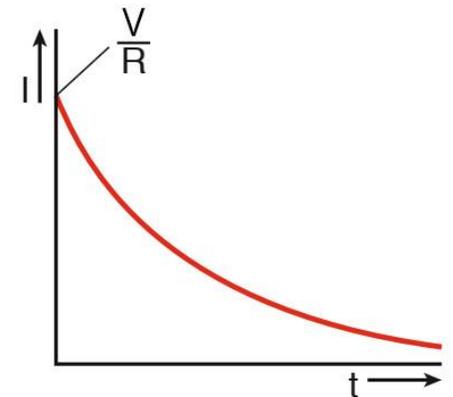
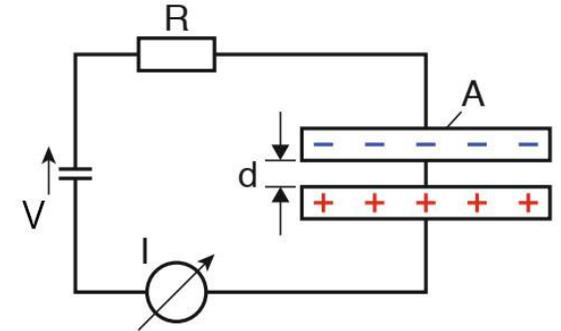
E la capacità diventerà

$$C = \epsilon_r C_0 = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

ϵ_r è il **coefficiente dielettrico relativo**, è adimensionale, dipende dal materiale e dalla temperatura.

Il prodotto $\epsilon_r \epsilon_0 = \epsilon$ è la costante dielettrica assoluta.

→ Il dielettrico inserito aumenta la capacità del condensatore.



Proprietà elettriche – Polarizzazione del dielettrico

La carica cambia quando viene inserito un materiale dielettrico tra le piastre. Questa variazione di carica è causata dall'influenza del campo elettrico, il quale va a polarizzare il materiale dielettrico.

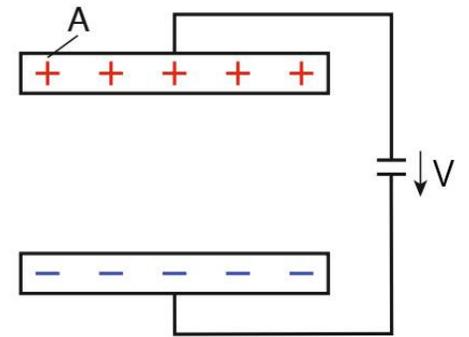
$$Q = Q_0 + Q_P \text{ esprimendo per unità di area } \frac{Q}{A} = \frac{Q_0}{A} + \frac{Q_P}{A} = D$$

Dove D è la carica totale per unità di area.

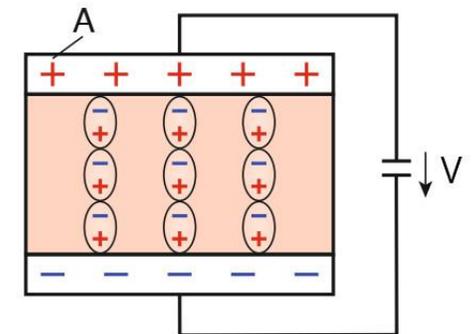
$$\text{data l'intensità del campo elettrico } E = \frac{V}{d} = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{Q_0}{A} = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r} \frac{Q}{A}$$

$$\text{Risulta } \frac{Q_0}{A} = \epsilon_0 E$$

SENZA DIELETTICO



CON DIELETTICO

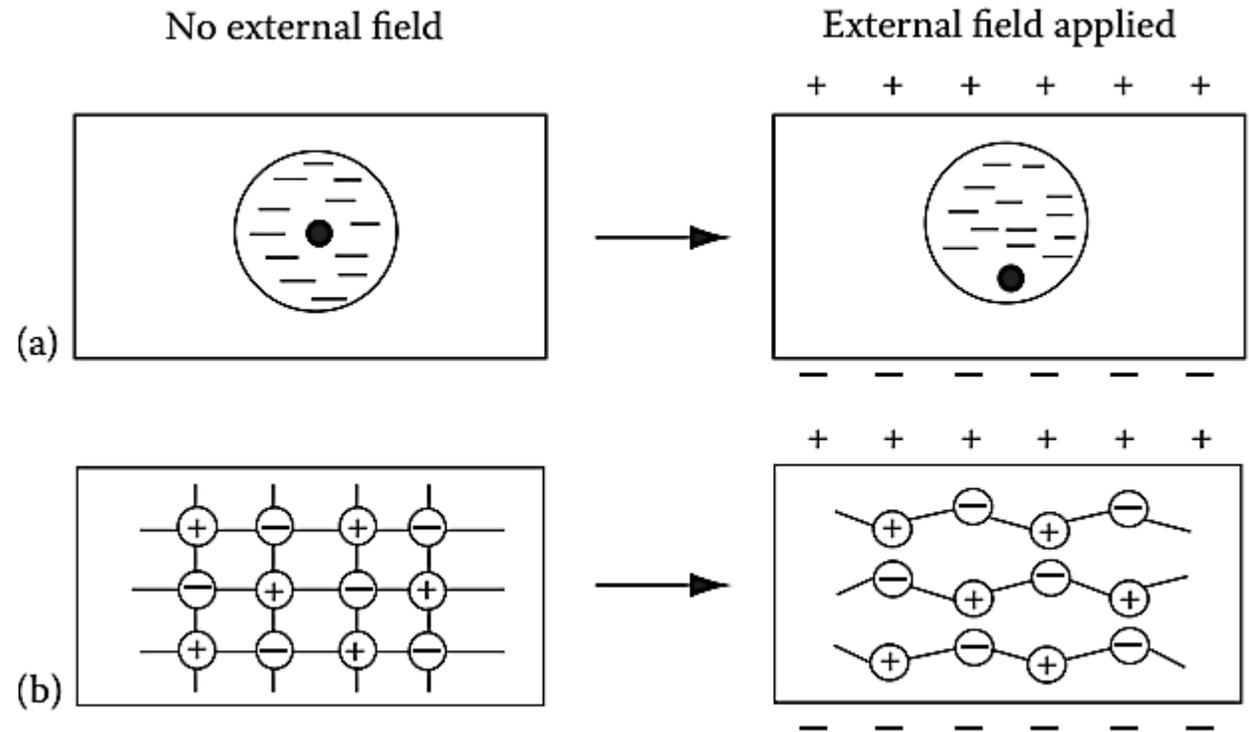


Proprietà elettriche – Meccanismi di polarizzazione

Esistono 2 meccanismi di polarizzazione: **polarizzazione di spostamento e di orientazione**

1. Polarizzazione di spostamento:

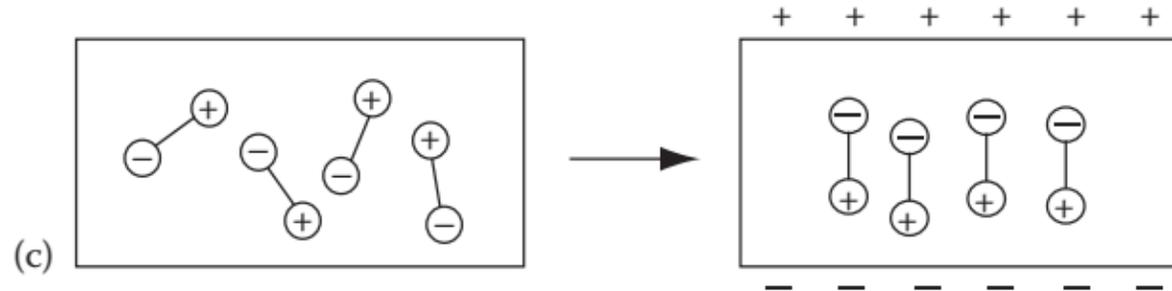
- **Polarizzazione elettronica (a):**
spostamento relativo della nuvola elettronica rispetto al nucleo atomico a causa del campo elettrico
- **Polarizzazione ionica (b):**
spostamento degli ioni all'interno di una molecola o di una struttura cristallina per allinearsi al campo



Proprietà elettriche - Meccanismi di polarizzazione

2. Polarizzazione di orientazione:

Orientazione dei dipoli (c): le molecole polari, che possiedono un momento di dipolo permanente, possono orientarsi lungo il campo



Spostare o deformare i dipoli richiede tempo, ancora più tempo la polarizzazione di orientazione specialmente quando è impedito il moto delle catene (reticolazioni, T_g , etc.). Nei campi alternati ad alta frequenza, il movimento dei dipoli può essere ritardato. Questo fenomeno è chiamato rilassamento dielettrico, che porta a **perdite dielettriche** che si manifestano come **riscaldamento dielettrico**.

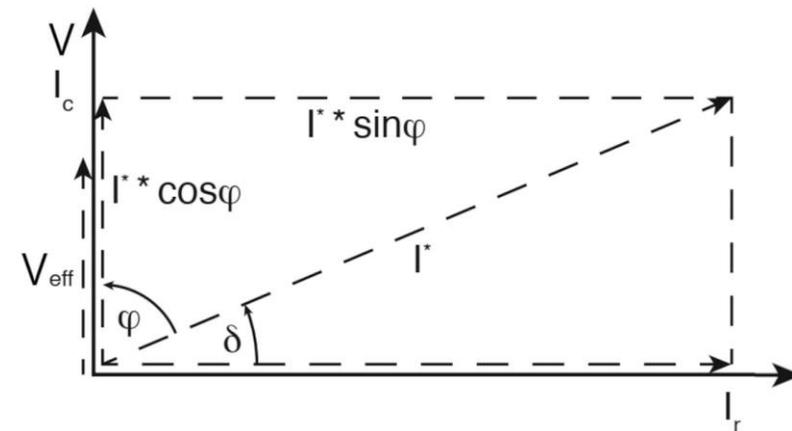
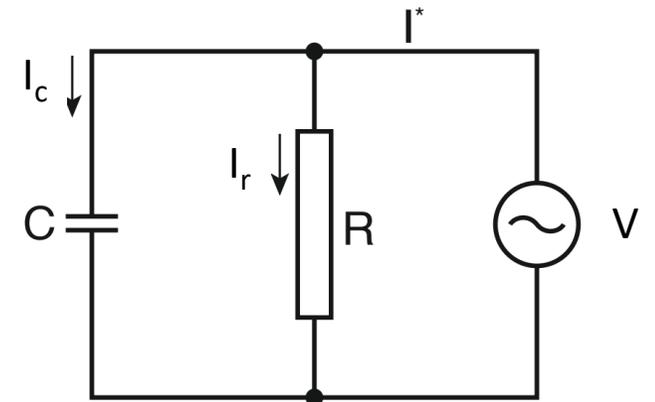
Proprietà elettriche - Fattore di dissipazione

Il movimento delle molecole durante la polarizzazione del dipolo o degli ioni in un campo elettrico alternato, causa attrito e quindi riscaldamento del dielettrico.

Per spiegare questo fenomeno si utilizza il circuito equivalente illustrato in figura.

Si supponga che in questo circuito passi una corrente alternata, con un valore di tensione V e una **frequenza angolare** ω definita $\omega = 2\pi f$

Nel circuito circolerà una corrente complessa I^* , composta da una componente resistiva o di perdita $I_r = V/R$ e una componente capacitiva $I_C = \omega CV$



Proprietà elettriche - Fattore di dissipazione

Quindi la corrente complessa vale $I^* = I_R + I_C = V/R + i\omega CV$
dove i rappresenta la componente immaginaria.

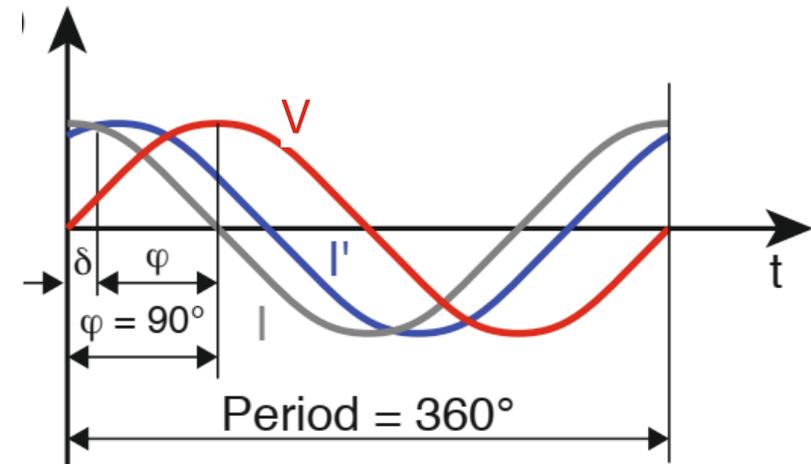
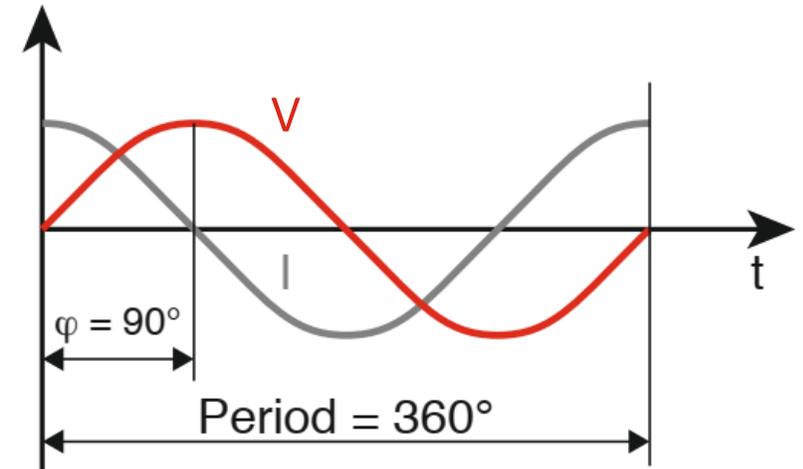
Il fattore di dissipazione elettrica è $\tan \delta = \frac{I_r}{I_c}$

Se non ci sono perdite, il condensatore è puramente capacitivo
 $\tan \delta \rightarrow 0$ e corrente e tensione sono sfasate di 90° .

Se ci sono perdite $\tan \delta > 0$, la corrente I^I è in ritardo di un
angolo di perdita δ .

La corrente resistiva I_r che porta a riscaldamento con un
energia pari a $E_h = \frac{1}{2} V I_{eff} \tan \delta$

Dove I_{eff} è il modulo di I^*



Rottura dielettrico

Se l'intensità del campo elettrico attraverso un isolante polimerico viene aumentata a sufficienza, si arriva a un punto in cui le proprietà isolanti del materiale vengono meno e si verifica la rottura dielettrica. Questo cedimento può essere improvviso e catastrofico.

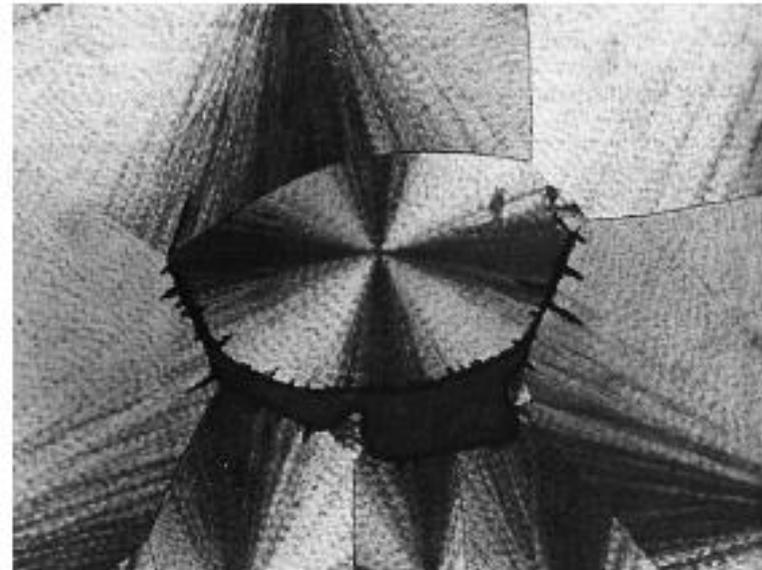
Solitamente si verificano anche altri processi che facilitano la rottura del dielettrico:

- Breakdown termico se la conducibilità del materiale consente il riscaldamento per effetto Joule, o nel caso di un corrente alternata a causa del calore dissipato nei processi di rilassamento dielettrico;
- Bolle d'aria (l'aria è caratterizzata da una rigidità dielettrica molto inferiore) sono potenziali fonti di rottura dielettrica in un polimero;
- Degradazione elettromeccanica, dovuta a una combinazione di stress meccanico ed elettrico (ad esempio, alte tensioni).

Rottura dielettrico

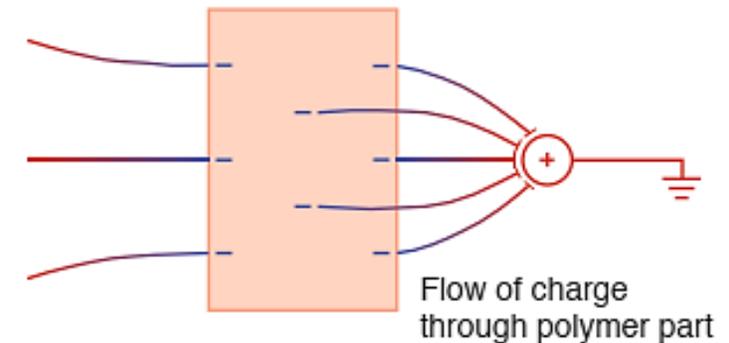
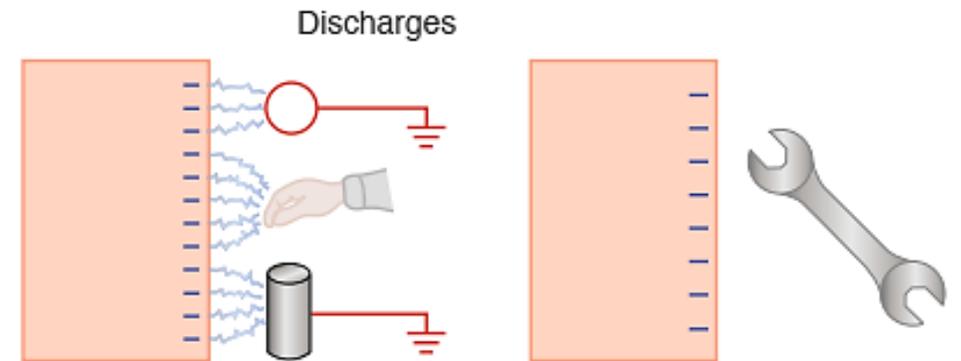
- L'invecchiamento o il deterioramento dei polimeri, dovuto alla degradazione o alla fessurazione sotto stress meccanico, riduce anche le proprietà isolanti del polimero.
- L'applicazione prolungata di campi elettrici elevati per lunghi periodi di tempo può portare a un invecchiamento del materiale, inducendo così un'ulteriore elemento di debolezza.

Rottura del dielettrico lungo i
bordi degli sferuliti



Proprietà elettriche - carica elettrostatica

- La carica elettrostatica è il risultato delle eccellenti proprietà isolanti dei polimeri, poiché i polimeri sono cattivi conduttori, lo spostamento di carica dei corpi in sfregamento non riesce a compensarsi.
- La scarica deriva da un eccesso di elettroni su una superficie e da una mancanza di elettroni sull'altra. La carica superficiale viene rilasciata a seguito del contatto con un altro corpo conduttore o un corpo con carica inversa. Spesso la scarica avviene anche senza contatto, ma se i corpi sono sufficientemente vicini, poiché la carica si diffonde attraverso l'aria fino al corpo conduttore.
- Per risolvere il problema vengono aggiunti agenti antistatici.



→ Si veda la trattazione in cap. 4 «Miscelazione e additivi».

Proprietà ottiche

- Le caratteristiche ottiche delle plastiche includono:
 - colore
 - trasparenza
 - aspetto
 - proprietà misurabili come l'indice di rifrazione.
- Per l'utilizzo nel campo dell'ottica bisogna tener presente anche di altre proprietà:
 - stabilità dimensionale
 - durezza superficiale
 - resistenza all'abrasione
 - temperatura di utilizzo
 - invecchiamento
 - assorbimento acqua.

Proprietà ottiche - Trasparenza

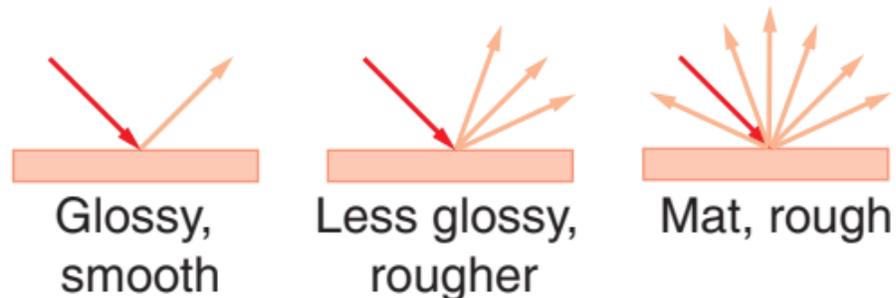
- Le materie plastiche possono essere distinte in tre categorie in base alla loro trasparenza: trasparenti, traslucide e opache.
- La trasmissione τ è utilizzata per misurare la trasparenza di un materiale: è definita come il rapporto tra la luce trasmessa Φ_n e la luce incidente Φ_v

$$\tau = \frac{\Phi_n}{\Phi_v} \cdot 100[\%]$$

- La trasmissione della luce è influenzata negativamente da cristallinità, cariche, rugosità, contaminazione o graffi superficiali.

Proprietà ottiche - Gloss

- Il **gloss** è dato dalla riflessione della luce.
- Dipende dalla superficie della plastica, che a sua volta è determinata dalla superficie dello stampo e dalla sua temperatura → Stampi molto lucidi e temperature elevate danno luogo a superfici lucide.
- Plastiche altamente caricate danno luogo a superfici più opache.
- Le misurazioni di gloss sono un approccio non distruttivo per controllare i cambiamenti della superficie durante le prove di invecchiamento ai raggi UV e agli agenti atmosferici.



Proprietà ottiche - Indice di rifrazione

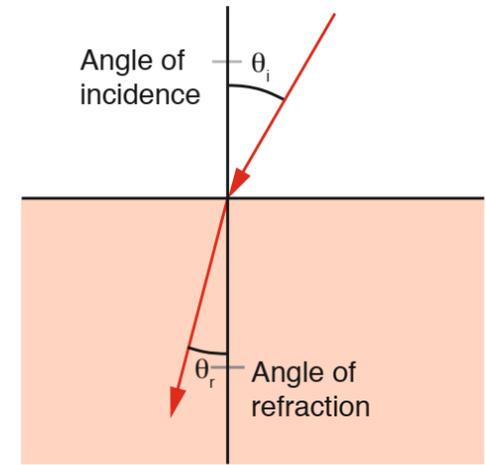
- Quando i raggi di luce passano da un materiale a un altro, vengono deviati a causa della variazione della velocità della luce da un mezzo all'altro.
- **L'indice di rifrazione n** è definito come il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto (c) e la velocità della luce attraverso il materiale in esame (v)

$$n = \frac{c}{v}$$

- Si può calcolare in funzione dell'angolo di incidenza θ_i e di rifrazione θ_r

$$n = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r}$$

- **La proprietà di rifrazione rende possibile l'azione di messa a fuoco di una lente.** Le lenti in plastica hanno il vantaggio di essere leggere e praticamente infrangibili. Hanno però lo svantaggio di una bassa resistenza ai graffi e bassa stabilità dimensionale.



Material	Index of Refraction (n)
Air	1.00
Water	1.33
Cellulose acetate	1.48
Poly(methyl methacrylate)	1.49
Common glass	1.52
Poly(vinyl chloride) copolymer	1.53
Polystyrene	1.59
Flint glass	1.65
Diamond	2.42

Proprietà ottiche - Fotoelasticità e birifrangenza

– La **fotoelasticità** e la **birifrangenza** sono conseguenze dell'anisotropia ottica dei mezzi trasparenti. Quando un materiale trasparente è sottoposto ad una deformazione o all'orientazione delle molecole, l'indice di rifrazione diventa direzionale; le deformazioni principali ε_1 e ε_2 sono associate agli indici di rifrazione principali n_1 e n_2 in un sistema bidimensionale.

– La differenza tra i due indici principali di rifrazione (birifrangenza) può essere correlata alla differenza delle deformazioni principali utilizzando il **coefficiente di deformazione ottica, k**:

nel caso delle deformazioni: $n_1 - n_2 = k(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ considerando gli stress: $n_1 - n_2 = k(\sigma_1 - \sigma_2)$

– La doppia rifrazione in un materiale si verifica quando un fascio di luce attraversa un mezzo trasparente in direzione perpendicolare al piano che contiene le direzioni principali di deformazione. Le onde luminose in arrivo si dividono in due onde che oscillano lungo le due direzioni principali, sfasate di una distanza δ detta **ritardo** data da

$$\delta = (n_1 - n_2)t$$

Dove t è lo spessore del corpo trasparente.

Proprietà ottiche - Fotoelasticità e birifrangenza

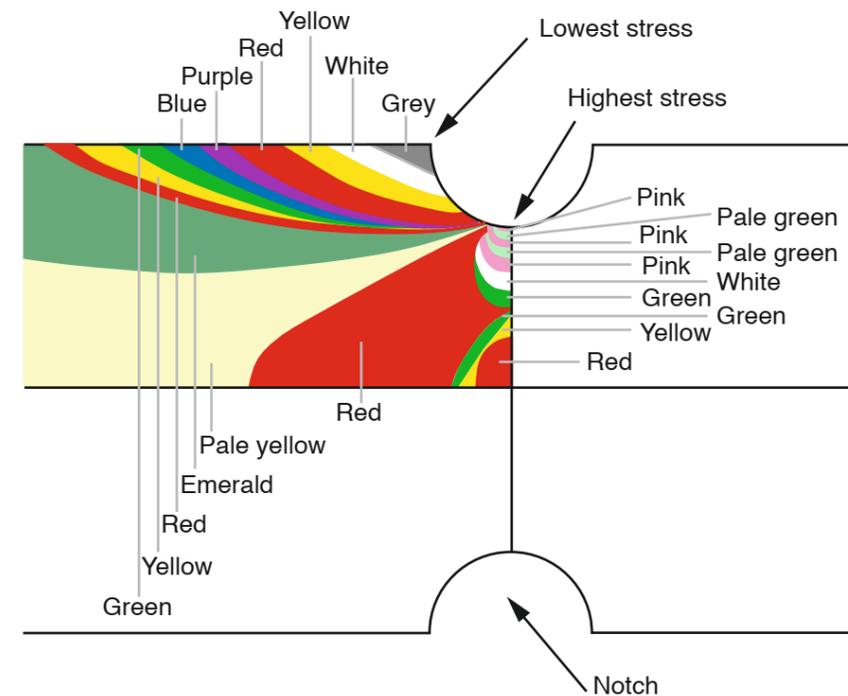
$$\text{Fringe order} = \frac{\delta}{\lambda}$$

- Nell'analisi di fotoelasticità, l'entità delle sollecitazioni viene determinata misurando la direzione delle sollecitazioni o delle deformazioni principali e il ritardo attraverso un polariscopio (ASTM D 4093).
- Con il polariscopio si utilizza il colore come parametro per quantificare il campo di deformazione
- Il ritardo di fase in un campione deformato è associata a un colore specifico. La sequenza di colori e i rispettivi valori di ritardo sono legati al cosiddetto ordine di fringe.

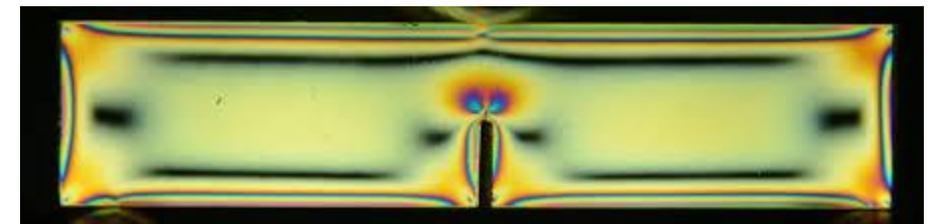
Color	Retardation (nm)	Fringe order
Black	0	0
Gray	160	0.28
White	260	0.45
Yellow	350	0.60
Orange	460	0.79
Red	520	0.90
Tint of passage	577	1.00
Blue	620	1.06
Blue-green	700	1.20
Green-yellow	800	1.38
Orange	940	1.62
Red	1050	1.81
Tint of passage	1150	2.00
Green	1350	2.33
Green-yellow	1450	2.50
Pink	1550	2.67
Tint of passage	1730	3.00
Green	1800	3.10
Pink	2100	3.60
Tint of passage	2300	4.00
Green	2400	4.13

Proprietà ottiche - Fotoelasticità e birifrangenza

- Un corpo nero rappresenta un corpo libero da deformazioni
- Un corpo con tante bande strette di diversi colori è un corpo con alto grado di deformazione.
- Le bande colorate sono chiamate isocromatiche.
- Il profilo di frange può anche essere il risultato dell'orientamento molecolare e delle tensioni residue in un componente polimerico trasparente stampato.
- Tale effetto può essere applicato solamente a polimeri trasparenti o traslucidi.



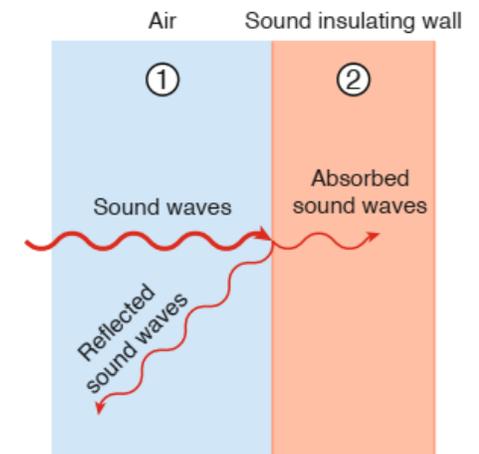
Profilo per una barretta indentata sottoposta a trazione



Concentrazione di stress a livello dell'indentazione

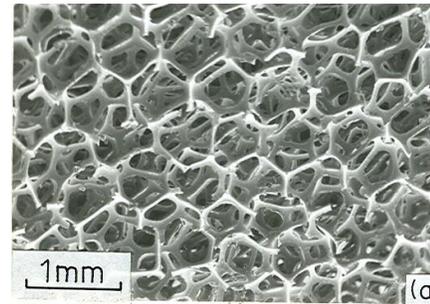
Proprietà acustiche

- Le onde sonore, come le onde luminose possono essere **trasmesse, riflesse e assorbite** quando colpiscono la superficie di un corpo.
- La **trasmissione** delle onde sonore attraverso le parti polimeriche è di particolare interesse per l'ingegnere progettista. Sono importanti l'assorbimento del suono e la velocità con cui le onde acustiche attraversano un corpo.
- La velocità del suono attraverso un materiale dipende dal suo stato: la velocità del suono attraverso un polimero allo stato gommoso è 100 volte più lenta di quella attraverso un polimero allo stato vetroso.
- La **riflessione** del suono è una proprietà essenziale per la riduzione del rumore. Quando le onde sonore attraversano il mezzo 1 e colpiscono la superficie del mezzo 2, una frazione di onde sonore riflesse ritorna nel mezzo 1. Per ottenere un'elevata riflessione del suono, la massa del mezzo 2 deve essere elevata rispetto alla massa del mezzo 1.
- La massa delle pareti fonoisolanti può essere aumentata con l'uso di riempitivi, come il PVC plastificato con solfato di bario o utilizzando lastre composite come pareti isolanti.

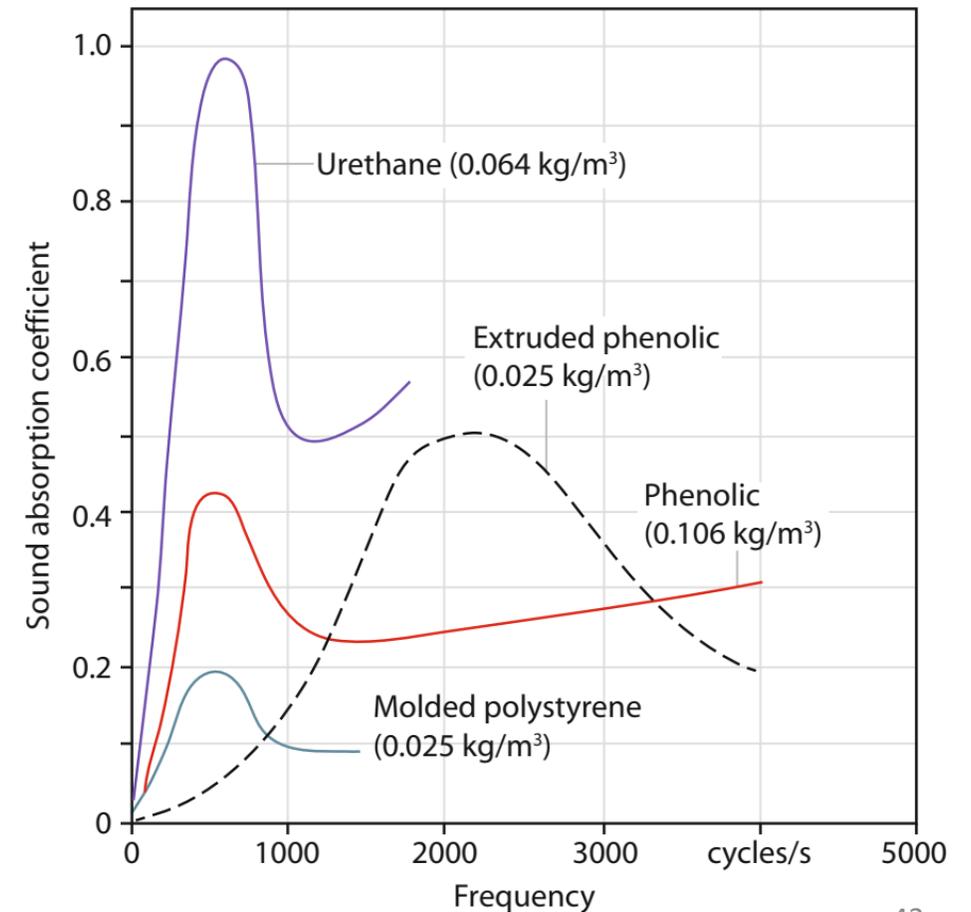


Proprietà acustiche

- In un materiale, l'assorbimento acustico avviene trasformando le onde acustiche in calore.
- **I polimeri espansi sono ideali per eliminare le riflessioni multiple delle onde sonore in ambienti insonorizzati.**
- I materiali con una temperatura di transizione vetrosa inferiore alla temperatura ambiente sono particolarmente adatti come materiali smorzanti. I materiali più utilizzati a questo scopo sono i termoplastici e gli elastomeri debolmente reticolati.

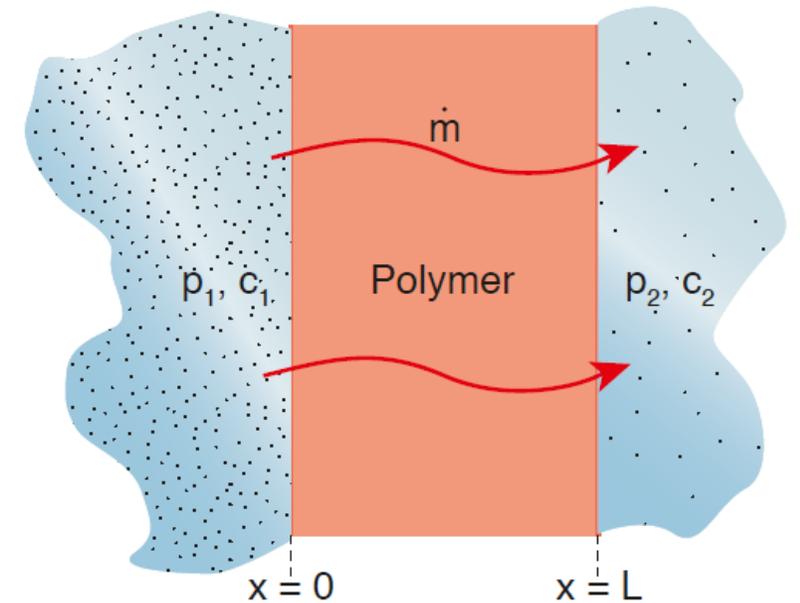


Coefficiente di assorbimento per varie schiume



Proprietà barriera - Diffusione

- A causa della loro bassa densità, i polimeri sono relativamente permeabili a gas e liquidi.
- Una conoscenza più approfondita della permeabilità è necessaria quando si tratta di applicazioni di imballaggio e di rivestimenti protettivi per ambienti corrosivi.
- Il trasporto di gas e liquidi attraverso i polimeri consiste in varie fasi:
 - **Adsorbimento** del materiale diffondente all'interfaccia del polimero;
 - **Diffusione** del mezzo attraverso il polimero;
 - **Deassorbimento** (rilascio) del materiale diffuso attraverso l'interfaccia del polimero.



Proprietà barriera - Diffusione

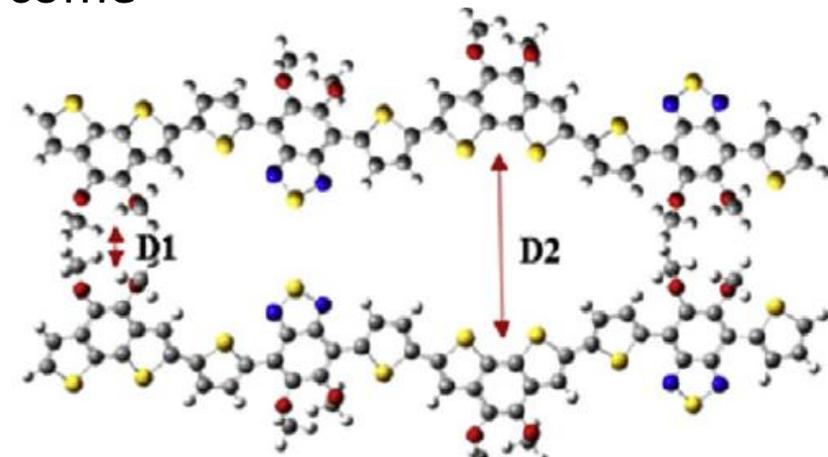
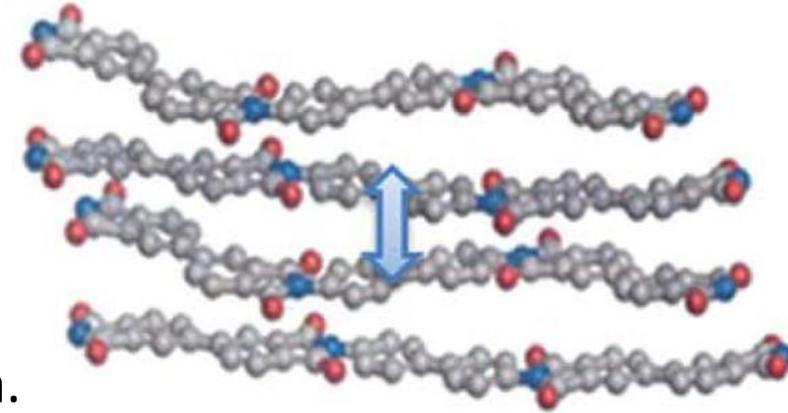
Il trasporto attraverso un materiale può avvenire secondo 3 meccanismi:

1. **Massivo**: presenza di flusso attraverso l'intero corpo (fessure, rotture, pori e capillari micro o macroscopici).
2. **Diffusivo**: a seguito di differenza in fugacità, attività, potenziale chimico fra le specie; (senza un gradiente di pressione applicato – permselettività) attraverso lacune intermolecolari.
3. **Diffusione ristretta**: dimensione dei pori dell'ordine delle dimensioni molecolari. Agiscono come setacci molecolari attraverso lacune intramolecolari.

permselettività: proprietà di una membrana di essere permeabile solo da certe specie di molecole o di ioni

Proprietà barriera - Diffusione

- Lacune intermolecolari: sono spazi tra una molecola e l'altra e dipendono dalla natura e dalla morfologia del polimero. Hanno dimensioni non costanti perché soggette ai moti molecolari termici
- Lacune intramolecolari: spazi presenti all'interno della molecola. Dato che le catene polimeriche sono di grandi dimensioni, al loro interno è possibile che vi sia spazio sufficiente per il passaggio di specie più piccole. Anche queste discontinuità del materiale, come le precedenti, non sono rigide e possono variare la loro dimensione per effetto di moti termici.

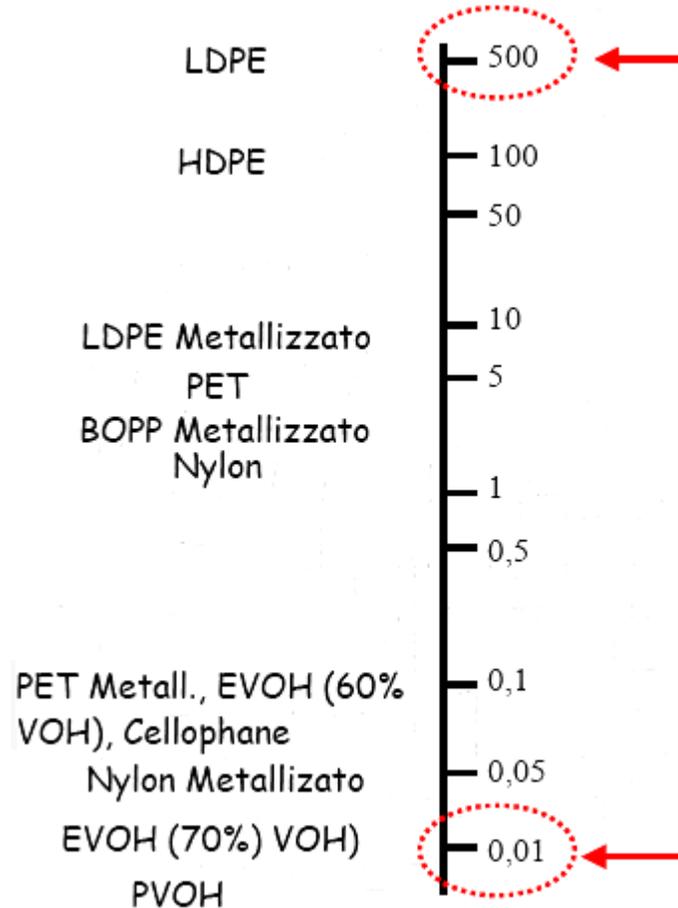


In entrambi i casi lo spazio «a disposizione» è correlato al

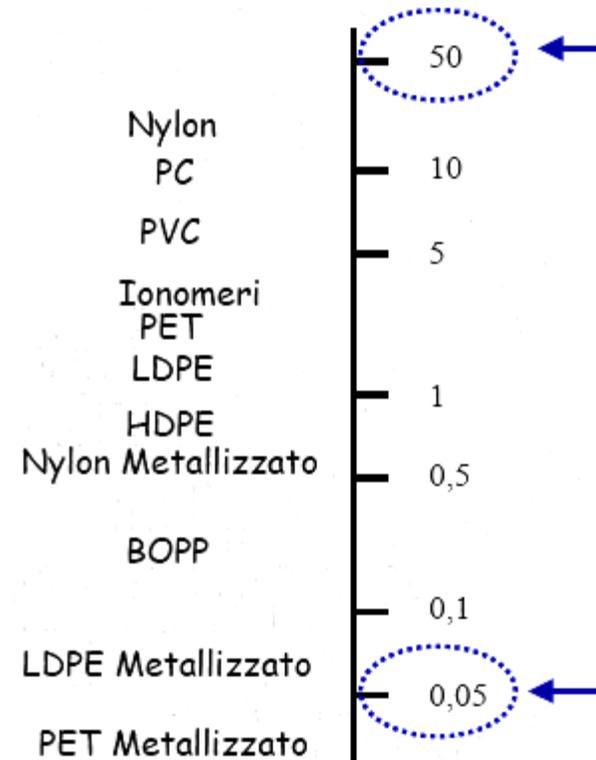
volume libero!

Proprietà barriera - Diffusione

Permeabilità a O_2 (espressi in u.a.)



Permeabilità a H_2O (espressi in u.a.)

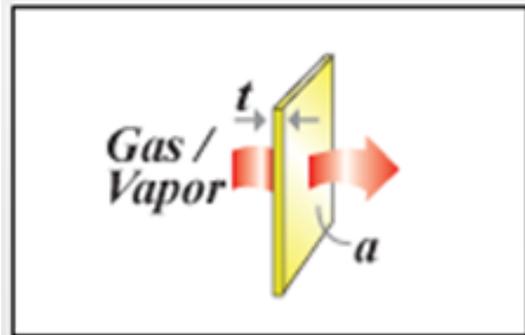


BOPP = PP bi-orientato
 EVOH = Etilene Vinil Alcool
 EVA = Etilene Vinil Acetato

Proprietà barriera - Diffusione

Miscele di polimeri, copolimerizzazioni e strutture composite: molte delle strutture flessibili utilizzate per il packaging sono a base di copolimeri, miscele di polimeri differenti (blends) o accoppiate/coestruse con polimeri diversi (strutture composite). La finalità è diminuire la permeazione.

$$\text{Diffusione } O_2: v = \frac{dM_{O_2}}{d\tau} = \frac{P_{O_2}}{t} \cdot A \cdot C_{O_2}$$



Dove M_{O_2} = quantità di ossigeno che passa attraverso la membrana, τ è il tempo (la derivata di M_{O_2} rispetto al tempo rappresenta quindi la velocità v di diffusione dell'ossigeno), P_{O_2} è la permeabilità dell'ossigeno, t è lo spessore, A è l'area e C_{O_2} è la concentrazione di ossigeno nell'ambiente esterno.

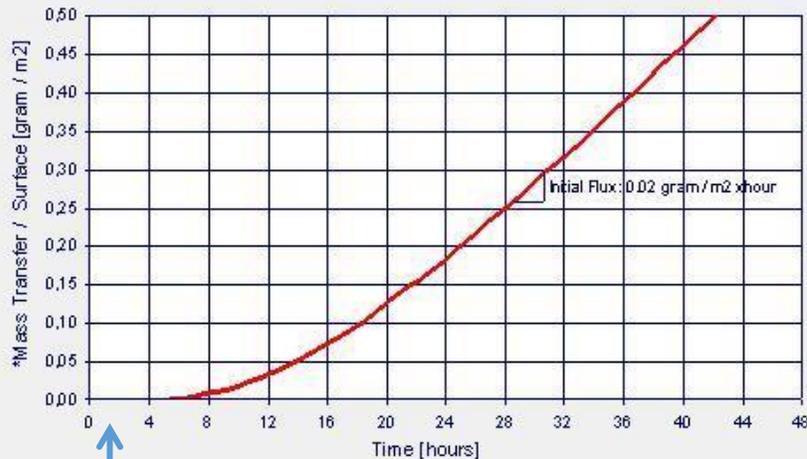
Proprietà barriera - Diffusione

PET è una discreta barriera ai gas MA gas sotto pressione + bottiglie ermeticamente chiuse porta a un trasporto considerevole attraverso le pareti.

Quantità di CO₂ che diffonde attraverso la parete in **2 giorni** (trasferimento di massa iniziale)



Initial Mass Transfer* CO2 through PET wall of 0.27 mm thickness (Activity =1, T=310 K, Pinitial=3 Bar)
by www.diffusion-polymers.com



Lag time corto: dopo 4h le prime molecole di CO₂ escono dalla bottiglia

In **2 anni** (trasferimento di massa totale)

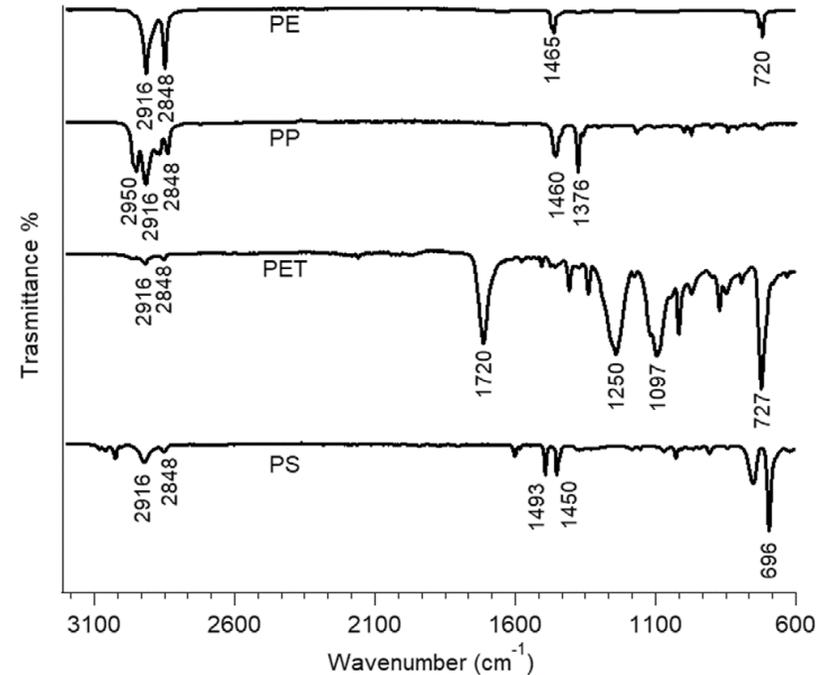
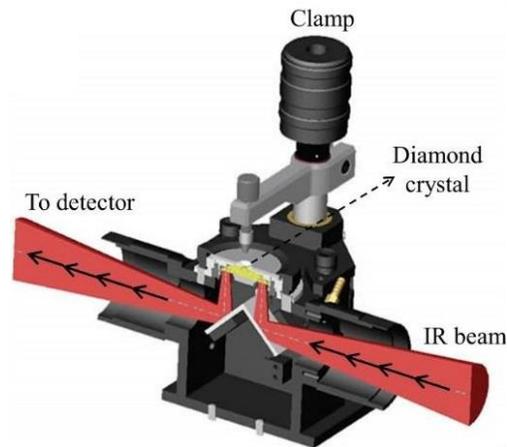
Total Mass Transfer of CO2 out of COLA through a standardized PET bottle of 1.5 liter with a thickness of 0.27 mm and an available diffusion area of 0.07 m² (Activity CO2=1, T=297 K, Pinitial=3 Bar)
by www.diffusion-polymers.com



Andamento lineare nel tempo: si riduce il contenuto di CO₂. Dopo 1 anno resta in bottiglia solo il 25% della CO₂ iniziale.

Altri metodi di caratterizzazione

- **Spettroscopia infrarossa (FT-IR)**: identifica le specie chimiche presenti nel campione attraverso l'analisi dei picchi associati alle diverse molecole che costituiscono il materiale.



- **Gasromatografia / Spettrometria di massa (GC/MS)**: il gascromatografo rileva i composti gassosi presenti miscela mentre lo spettrometro di massa effettua l'analisi quantitativa.