

Università di Bologna

Facoltà di Chimica Industriale
Sede di Faenza

Corso di laurea in
Chimica dei Materiali e Tecnologie Ceramiche

Materiale didattico per il corso di

Metallurgia

Prof. Giuseppe Palombarini

M.F. Ashby

Cambridge University, UK

Scelta dei materiali per l'ingegneria e loro proprietà

Cap. 3 in: Materials Selection in Mechanical Design
2nd Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999
(traduzione di G.Palombarini)

Indice

- 3.1 Introduzione e compendio
- 3.2 Le classi dei materiali per l'ingegneria
- 3.3 Le definizioni delle proprietà dei materiali
- 3.4 Sommario e conclusioni
- 3.5 Altre letture

doc.2

a.a. 2001-02

3.1 Introduzione e compendio

I materiali, si potrebbe dire, sono il cibo della progettazione. Questo capitolo presenta il menu: la lista completa di acquisto dei materiali. Un prodotto di successo - uno che lavori bene, abbia un buon valore in denaro e dia soddisfazione all'utilizzatore - utilizza i materiali migliori allo scopo, e sfrutta a fondo le loro potenzialità e caratteristiche: ne estrae il sapore, per così dire.

Le classi dei materiali - metalli, polimeri, ceramici, e così via - vengono presentate nel paragrafo 3.2. Ma in definitiva si cerca non un materiale, ma un determinato profilo di proprietà. Le proprietà che contano nella progettazione termomeccanica sono definite concisamente nel paragrafo 3.3. Il lettore esperto nelle definizioni di moduli, resistenze, capacità di smorzamento, conducibilità termiche e simili può desiderare di andare oltre, per servirsene come riferimento, quando necessario, per il significato esatto e le unità di misura dei dati relativi alle carte per la selezione successive. Al solito, il capitolo si chiude con un sommario.

3.2 Le classi dei materiali per l'ingegneria

Si usa classificare i materiali per l'ingegneria nelle sei ampie classi indicate in Figura 3.1: metalli, polimeri, elastomeri, ceramici, vetri e compositi. I componenti di una classe hanno elementi in comune: proprietà simili, procedure di elaborazione simili e, spesso, applicazioni simili.

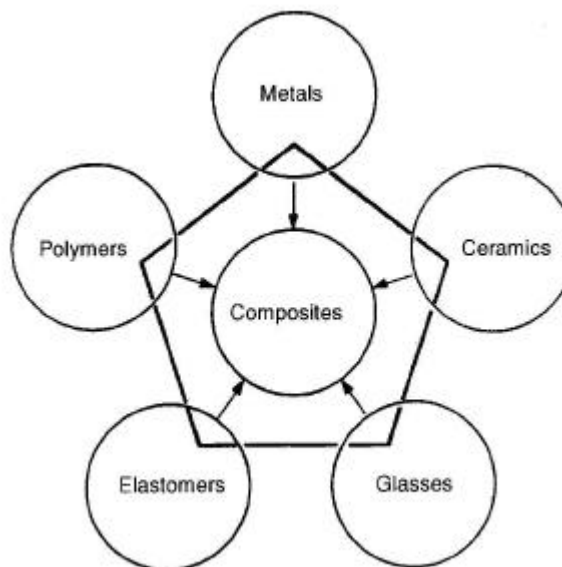


Figura 3.1 - Menu dei materiali per l'ingegneria.

I *metalli* hanno valori relativamente elevati dei moduli elastici. Essi possono essere rinforzati mediante alligazione e con trattamenti termici e meccanici, e tuttavia restano duttili consentendo di formarli con processi di deformazione plastica. Alcune leghe ad alta resistenza (ad es., gli acciai per molle) hanno duttilità basse fino al 2%, ma anche questo valore è sufficiente a garantire che il materiale si snervi prima di fratturarsi e che la frattura, quando avviene, sia di tipo tenace, duttile. In parte a causa della loro duttilità, i metalli vanno soggetti a fatica e, tra tutte le classi di materiali, sono i meno resistenti alla corrosione.

I *ceramici* e i *vetri* presentano anch'essi valori alti dei moduli elastici ma, a differenza dei metalli, sono fragili. La loro resistenza a trazione è la resistenza a frattura fragile, a compressione

è la resistenza allo schiacciamento fragile, circa 15 volte più alta. Non avendo duttilità, i ceramici hanno scarsa tolleranza per le concentrazioni di sforzi (quali cavità o cricche) o per le tensioni al contatto elevate (ad es. in corrispondenza dei punti di afferraggio). I materiali duttili si adattano alle concentrazioni di sforzi deformandosi in modo da ridistribuire più uniformemente il carico; a causa di ciò, sotto carichi statici essi possono essere usati con carichi prossimi al loro carico di snervamento. Per ceramici e vetri non vale la stessa cosa. I materiali fragili presentano sempre un'ampia variazione nei valori di resistenza e la resistenza stessa dipende dal volume di materiale sotto carico e dal tempo di applicazione del carico stesso. Pertanto progettare con i ceramici non è altrettanto facile che con i metalli. Nonostante ciò, i ceramici hanno caratteristiche attraenti. Essi sono rigidi, duri e resistenti all'abrasione (dove il loro uso per cuscinetti e utensili da taglio); essi conservano resistenza ad alte temperature; e resistono bene alla corrosione. Essi sono da considerare una classe importante di materiali per l'ingegneria.

I *polimeri* e gli *elastomeri* si trovano all'altra estremità dello spettro. Essi hanno valori bassi dei moduli elastici, grossomodo 50 volte inferiori a quelli dei metalli, ma possono essere resistenti - quasi come i metalli. In conseguenza di ciò, le deflessioni elastiche possono essere ampie. Essi sono soggetti allo scorrimento viscoso, anche a temperatura ambiente, il che significa che un componente in materiale polimerico sotto sforzo può, nel tempo, acquisire un assetto permanente. Inoltre le loro proprietà dipendono dalla temperatura cosicché un polimero tenace e flessibile a 20°C può essere fragile ai 4°C di un frigorifero domestico, e ancora scorrere velocemente ai 100°C dell'acqua bollente. Nessun polimero presenta un valore utile di resistenza al di sopra dei 200°C. Se nella progettazione si considerano questi aspetti, si possono sfruttare i vantaggi dei polimeri. Che sono molti. Quando sono importanti combinazioni di proprietà, quale la resistenza per unità di peso, i polimeri sono altrettanto validi che i metalli. Essi possono essere formati facilmente: parti in polimero di forma complessa e in grado di svolgere parecchie funzioni possono essere foggiate con una sola operazione. Le ampie deflessioni elastiche di un polimero permettono di progettare componenti che si adattano reciprocamente, rendendo rapido ed economico l'assemblaggio. Se inoltre si dimensiona accuratamente la forma e si colora preventivamente il polimero, non sono necessarie operazioni di finitura. I polimeri sono resistenti alla corrosione e presentano bassi valori del coefficiente di attrito. Una buona progettazione sfrutta queste proprietà.

I compositi combinano le proprietà interessanti delle altre classi di materiali permettendo di evitare alcuni dei loro svantaggi. Essi sono leggeri, rigidi e resistenti, e possono essere tenaci. La maggior parte dei compositi attualmente a disposizione dell'ingegnere hanno una matrice polimerica - di solito epossidica o di poliesteri - rinforzata con fibre di vetro, di carbonio o di Kevlar. Essi non possono essere impiegati al di sopra dei 250°C poiché la matrice polimerica rammollisce, ma a temperatura ambiente la loro performance può essere eccezionale. I componenti in composito sono costosi e sono relativamente difficili da formare e saldare. Pertanto il progettista si servirà dei compositi, nonostante le loro proprietà siano attraenti, soltanto quando la performance risulti migliorata al punto da giustificare il costo maggiore.

La classificazione usata in Figura 3.1 ha il merito di raggruppare materiali che hanno alcuni elementi in comune per quanto riguarda le proprietà, le lavorazioni e gli impieghi. Essa presenta tuttavia dei rischi, particolarmente quelli della specializzazione (il metallurgista che non sa nulla dei polimeri) e del conservatorismo ("useremo acciaio perché abbiamo usato sempre acciaio"). Negli ultimi capitoli saranno esaminate le proprietà ingegneristiche dei materiali sotto un punto

di vista differente, confrontando proprietà di materiali appartenenti a tutte le classi. E' il primo passo dello sviluppo di quella libertà di pensiero che occorre al progettista.

3.3 Le definizioni delle proprietà dei materiali

Ogni materiale può essere visto come titolare di un insieme di caratteristiche: le sue proprietà. Non è un materiale *di per se* che il progettista cerca, ma una combinazione specifica di caratteristiche: un *profilo di proprietà*. Il nome del materiale è l'identificatore di un particolare profilo di proprietà.

Le proprietà stesse sono standard: densità, modulo elastico, resistenza, tenacità, conducibilità termica, e così via (Tabella 3.1). Per completezza e precisione, esse sono definite con i loro limiti nel presente paragrafo. Ciò rende noiosa la lettura. Chi pensa di conoscere le definizioni delle proprietà può passare al paragrafo seguente tornando a questo paragrafo solo quando se ne presenti la necessità.

La *densità*, ρ (unità: kg/m³) è il peso per unità di volume. Si misura oggi come fece Archimede: per pesata in aria e in un fluido di densità nota.

Il *modulo elastico* (unità: GPa oppure GN/m²) è definito come 'la pendenza della parte lineare-elastica della curva sforzo-deformazione' (Figura 3.2). Il modulo di Young, E , riguarda trazione o compressione, il modulo di taglio G riguarda le sollecitazioni tangenziali mentre il modulo di 'bulk', K , descrive l'effetto di una pressione idrostatica. Il coefficiente di Poisson, ν , è adimensionale: nel caso di sollecitazione assiale, esso è il rapporto tra la deformazione laterale e quella assiale, ϵ_2 / ϵ_1 . In verità, le misure dei moduli dalle pendenze delle curve sforzo-deformazione sono imprecise (spesso più basse di un fattore due o più rispetto al valore vero) a cause del contributo alla deformazione da parte di anelasticità, scorrimento viscoso e di altri fattori. Misure accurate sono effettuate con tecniche dinamiche: eccitando le vibrazioni naturali di una trave o di un filo, oppure misurando la velocità di onde sonore nel materiale. In un materiale isotropo, sussistono le seguenti relazioni tra i moduli elastici:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad E = \frac{3G}{1 + \frac{G}{3K}} \quad (3.1)$$

Di solito

$$\nu \approx 1/3, \quad \text{per cui} \quad G \approx (3/8)E, \quad K \approx E \quad (3.2a)$$

Gli elastomeri fanno eccezione. Per essi

$$\nu \approx 1/2, \quad \text{per cui} \quad G \approx (1/3)E, \quad K \gg E. \quad (3.2b)$$

Compilazioni e base di dati come quelli descritti nel Capitolo 13 riportano valori di tutti e quattro i moduli. Nel presente testo saranno esaminati i dati di E ; quando necessario, valori approssimati degli altri possono essere ricavati dalle equazioni (3.2).

La *resistenza* di un solido, σ_f (unità: GPa oppure MN/m²) richiede una definizione accurata. Per i metalli, la identifichiamo con il carico di snervamento allo 0.2% di deformazione permanente (plastica), $(\sigma_f)_{0.2}$ (Figura 3.2), ossia la tensione normale alla quale la curva sforzo-deformazione sotto carico assiale si scosta dello 0.2% dal tratto lineare-elastico. Nei metalli rappresenta la tensione in corrispondenza alla quale le dislocazioni cominciano a muoversi su lunghe distanze, ed ha lo stesso valore in trazione e in compressione. Nel caso dei polimeri, il valore di σ_f viene definito come la tensione normale σ_f in corrispondenza alla quale la curva sforzo-deformazione si scosta decisamente dalla linearità: tipicamente, per una deformazione dell'1% (Figura 3.3).

Tabella 3.1 Proprietà dei materiali determinanti per la progettazione ed unità SI.

Tipo	Proprietà	Simbolo	Unità
Generale	Costo	C_m	\$/kg
	Densità	ρ	kg· m ⁻³
Meccanica	Moduli elastici	E, G, K	GPa
	Resistenza	σ_f	MPa
	Tenacità	G_c	kJ· m ⁻²
	Tenacità a frattura	K_{Ic}	MPa· m ^{1/2}
Termica	Capacità di smorzamento	η	
	Limite di fatica	σ_e	MPa
	Conducibilità termica	λ	W· m ⁻¹ · K ⁻¹
	Diffusività termica	a	m ² · s ⁻¹
	Calore specifico	C_p	J· kg ⁻¹ · K ⁻¹
	Temperatura di fusione	T_f	K
	Temperatura di vetrificazione	T_m	K
Usura	Coefficiente di espansione termica	T_g	K ⁻¹
	Resistenza allo shock termico	α	K
	Resistenza al creep		
Corrosione	Costante di usura di Archard	k_A	MPa ⁻¹
Ossidazione	Velocità di corrosione	K	mm· y ⁻¹
	Costante parabolica	k_p	m ² · s ⁻¹

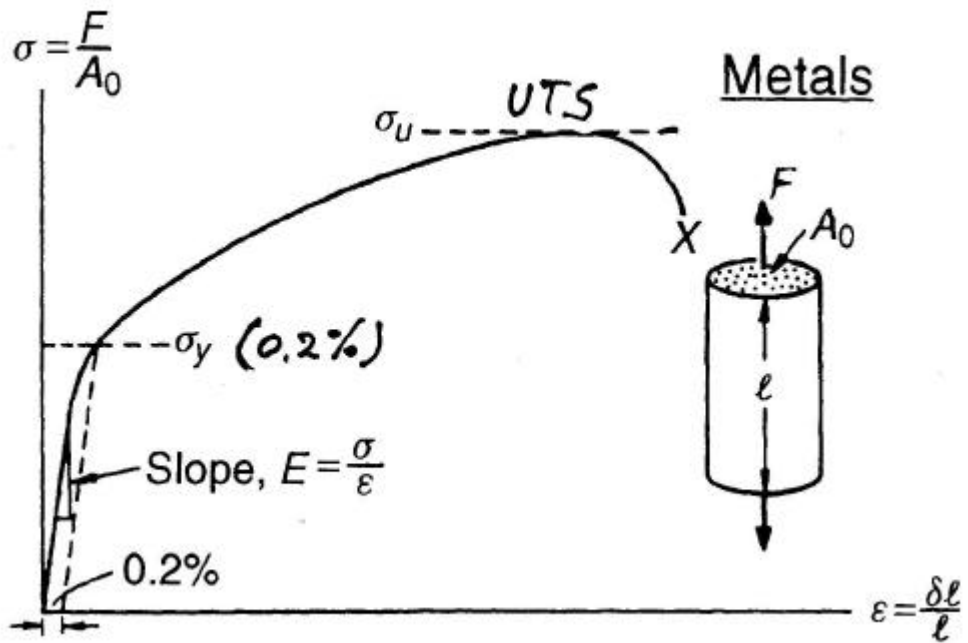
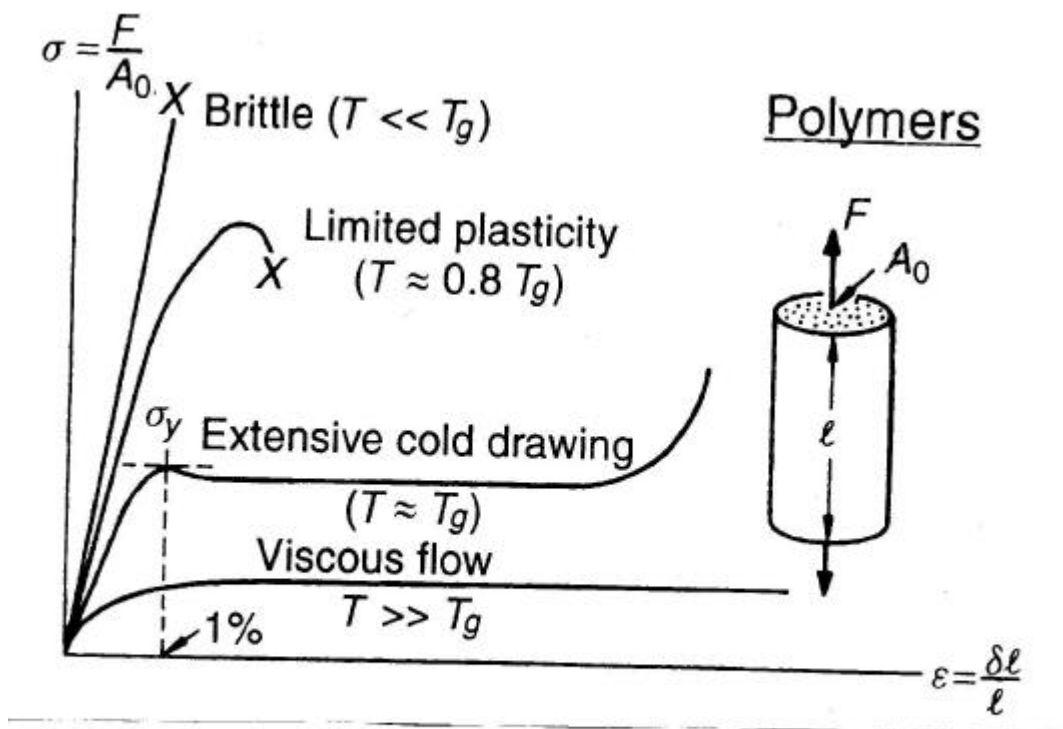


Figura 3.2 - Curva tecnologica sforzo-deformazione tipica di un metallo, in cui sono indicati il modulo elastico E , il carico di snervamento allo 0.2%, σ_y , e il carico di rottura (UTS), σ_u .



$T_g = \text{temperatura di transizione vetrosa.}$

Figura 3.3 - Curve sforzo-deformazione tipiche di un polimero, a temperature inferiori e superiori alla temperatura di transizione vetrosa, T_g .

Questo scostamento può essere dovuto a 'scorrimento tangenziale' - lo scorrimento irreversibili delle catene molecolari - oppure a 'screpolamento' - la formazione di zone a bassa densità, simili

a cricche, che diffondono la luce rendendo bianco l'aspetto del polimero. I polimeri sono leggermente più resistenti alla compressione che alla trazione (del 20% circa). Per ceramici e vetri, la resistenza dipende fortemente dalle modalità di carico (Figura 3.4). In trazione, 'resistenza' significa la resistenza alla frattura, S_f^t . In compressione, 'resistenza' significa la resistenza allo schiacciamento S_f^c , la quale è molto più alta di quella alla trazione. Tipicamente,

$$S_f^c = (10 \div 15) S_f^t.$$

Quando risulta difficile afferrare il materiale da testare (come nel caso dei ceramici) la resistenza può essere misurata a flessione. Il *modulo di rottura*, MOR (unità: MPa oppure MN/m^2) è la tensione normale massima in una trave sottoposta a flessione al momento della frattura (Figura 3.5). Ci si potrebbe aspettare che il valore così ottenuto sia esattamente uguale alla resistenza alla

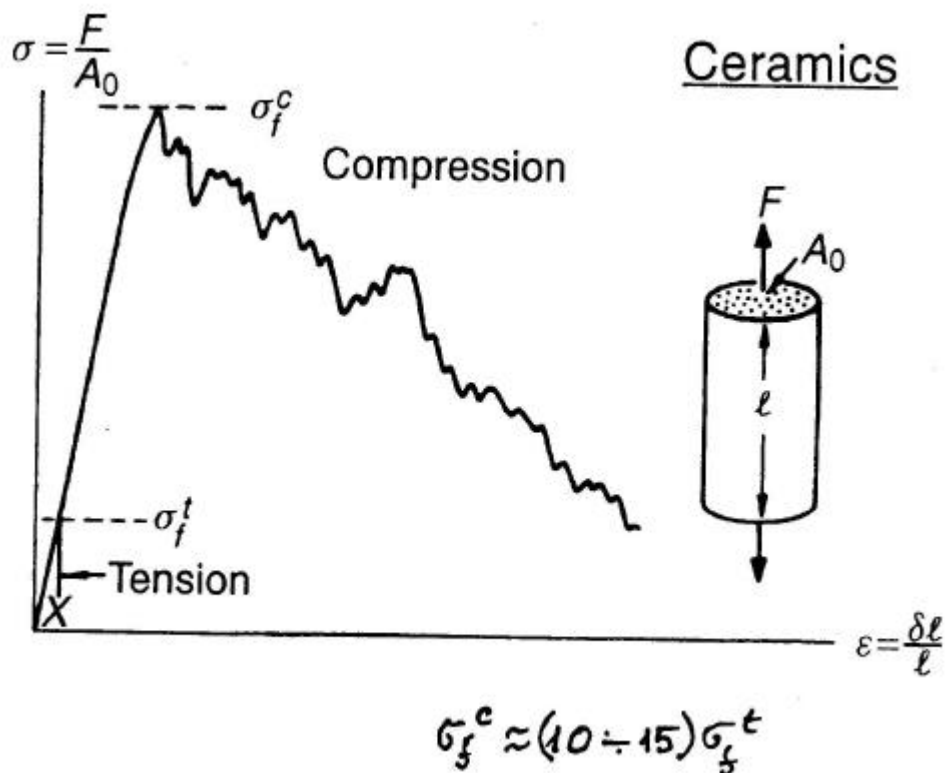


Figura 3.4 - Curve sforzo-deformazione tipiche di un ceramico, in trazione e in compressione. La resistenza a compressione, S_c , è da 10 a 15 volte maggiore della resistenza a trazione, S_t .

trazione, ma per i ceramici esso è più elevato (circa di un fattore 1.3) poiché il volume di materiale sottoposto a questa tensione massima è ridotto e la probabilità che in esso s'innesci una cricca è pure ridotta; nella tensione semplice tutto il volume è soggetto alla tensione massima.

La resistenza di un composito è definita al meglio da una 'deviazione' dal comportamento lineare-elastico, talora fissata allo 0.5%. Compositi che contengano fibre (inclusi i compositi naturali come il legno) sono un po' meno resistenti alla compressione che alla trazione (del 30% circa) poiché le fibre si piegano. Nei capitoli che seguono, per i compositi S_f^t significa resistenza alla trazione.

Quindi, la resistenza dipende dalla classe dei materiali e dalle modalità di applicazione del carico. Sono possibili altri modi di sollecitazione, ad es. il taglio. Lo snervamento sotto

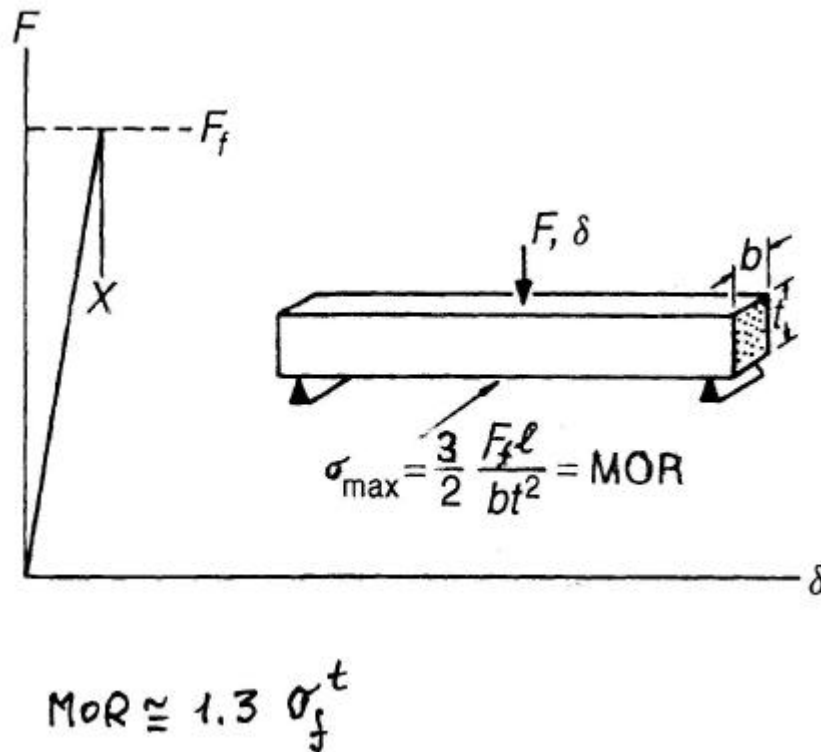


Figura 3.5 - Il modulo di rottura (MOR) è il valore della tensione normale al cedimento per flessione. Esso è uguale, o leggermente superiore, al valore del carico di rottura in trazione.

sollecitazioni multiassiali è legato a quello in trazione monoassiale da una relazione. Nel caso dei metalli, una buona relazione è data dal criterio di Von Mises:

$$(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2)^2 + (\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_3)^2 - (\mathbf{s}_3 - \mathbf{s}_1)^2 = 2\mathbf{s}_f^2 \quad (3.4)$$

ove \mathbf{s}_1 , \mathbf{s}_2 e \mathbf{s}_3 sono le tensioni principali, positive nei casi di trazione; per convenzione, \mathbf{s}_1 è la maggiore, o la più positiva, \mathbf{s}_3 la minore, o la minima. Nel caso dei polimeri la funzione di snervamento cambia per includere l'effetto della pressione:

$$(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2)^2 + (\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_3)^2 - (\mathbf{s}_3 - \mathbf{s}_1)^2 = 2\mathbf{s}_f^2(1 + \mathbf{b} p/K)^2 \quad (3.5)$$

ove K è il modulo di 'bulk' del polimero, \mathbf{b} (≈ 2) è un coefficiente numerico che caratterizza la dipendenza dalla pressione della resistenza allo scorrimento, mentre la pressione p è definita dalla

$$p = -(\mathbf{s}_1 + \mathbf{s}_2 + \mathbf{s}_3)/3$$

Per i ceramici viene usata una relazione di Coulomb per lo scorrimento:

$$\mathbf{s}_1 - B\mathbf{s}_3 = C \quad (3.6)$$

ove B e C sono costanti.

Il *carico di rottura a trazione* (ultimate tensile strength; unità: MPa) è il valore nominale di tensione normale al quale una barra cilindrica del materiale, sollecitata a trazione, subisce rottura completa (Figura 3.2). Nel caso di solidi fragili - ceramici, vetri e polimeri fragili - esso coincide con la resistenza alla rottura in trazione. Per metalli, polimeri duttili e per la maggior parte dei compositi, esso è maggiore della resistenza di un fattore compreso tra 1.1 e 3, a causa dell'incrudimento o (nel caso dei compositi) del trasferimento del carico alla fase di rinforzo.

La *resilienza*, R (unità: J/m^3), misura il valore massimo di energia sotto forma di lavoro che può essere immagazzinata in campo elastico senza danni per il materiale, e che viene restituita scaricando il materiale stesso. In pratica si tratta dell'area sottesa dalla parte elastica della curva sforzo-deformazione:

$$R = \mathbf{s}_f \cdot \mathbf{e}_f / 2 = \mathbf{s}_f^2 / 2E$$

ove \mathbf{s}_f è la resistenza definita come visto in precedenza, \mathbf{e}_f la corrispondente deformazione ed E il modulo di Young. Con materiali caratterizzati da valori elevati di R si fanno buone molle.

La *durezza* di un materiale, H (unità: MPa) è una misura grossolana della resistenza meccanica. Viene misurata premendo una punta di diamante o una sfera di acciaio duro contro la superficie del materiale. La durezza viene definita come il rapporto tra la forza applicata all'indentatore e l'area di base dell'impronta (proiettata nel piano della superficie in esame). Essa è legata alla quantità prima definita con \mathbf{s}_f dalla relazione

$$H \cong 3\mathbf{s}_f \quad (3.7)$$

La durezza viene spesso misurata con altre unità, la più comune delle quali è il grado Vickers H_V , corrispondente alle unità kg/mm^2 . Quest'ultima durezza è correlata alla H come qui è stata definita dalla

$$H = 10 H_V$$

La *tenacità*, G_c (unità: kJ/m^2), e la *tenacità a frattura*, K_c (unità: $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ oppure $\text{MN/m}^{1/2}$) misurano la resistenza di un materiale alla propagazione di una cricca. La tenacità a frattura viene misurata sollecitando un campione che contiene una cricca di lunghezza $2c$ introdotta deliberatamente nel materiale (Figura 3.6), e registrando la tensione a trazione \mathbf{s}_c a cui la cricca si propaga. La quantità K_c viene poi calcolata dalla

$$K_c = Y \frac{\mathbf{s}_c}{\sqrt{\mathbf{p} \cdot c}} \quad (3.8)$$

e la tenacità dalla

$$G_c = \frac{K_c^2}{E(1 + \mathbf{n})} \quad (3.9)$$

in cui Y è un fattore geometrico con valore prossimo all'unità e che dipende dalla geometria del campione in esame, E è il modulo di Young, \mathbf{n} il coefficiente di Poisson. Misurati in questo modo, K_c e G_c hanno valori ben definiti per i materiali fragili (ceramici, vetri e molti polimeri).

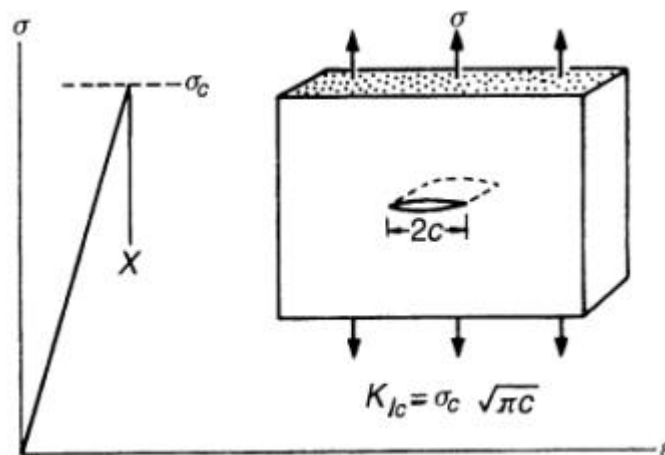


Figura 3.6 - La tenacità a frattura, K_c , misura la resistenza del materiale alla propagazione di una cricca. La resistenza \mathbf{s}_f di un solido fragile che contenga una cricca di lunghezza $2c$ vale $\mathbf{s}_f = Y K_c (\mathbf{p})^{1/2}$, ove Y rappresenta una costante con valore prossimo all'unità.

Nei materiali duttili, all'apice della cricca si sviluppa una zona plastica che cambia le condizioni di propagazione della cricca stessa, per definire le quali è necessaria una caratterizzazione più approfondita. Ciò nonostante, valori di K_c e di G_c vengono ugualmente riportati e sono utili per stabilire una graduatoria tra materiali.

Il *coefficiente di perdita*, h (una quantità adimensionale), misura la capacità del materiale di dissipare energia vibrazionale (Figura 3.7). Un materiale caricato in campo elastico fino ad una tensione s_{max} immagazzina un'energia elastica per unità di volume data dalla

$$U = \int_0^{s_{max}} s \cdot de = \frac{1}{2} \frac{s_{max}^2}{E}$$

Un materiale caricato e poi scaricato dissipa un'energia data dalla

$$\Delta U = \oint s \cdot de$$

Il coefficiente di perdita è dato dalla

$$h = \frac{\Delta U}{2pU} \quad (3.10)$$

Il ciclo di sollecitazioni può essere applicato in diversi modi - alcuni veloci, altri lenti. Il valore di h dipende di solito dalla scala dei tempi e dalla frequenza del ciclo di sollecitazioni. Altre misure dello smorzamento includono la *capacità specifica di smorzamento*, $D = \Delta U/U$, il *decremento logaritmico*, \mathbf{D} (il logaritmo del rapporto tra ampiezze successive delle vibrazioni naturali), il *ritardo di fase*, \mathbf{d} fra tensione e deformazione, ed il *fattore Q* o *fattore Q di risonanza*. Nei casi in cui lo smorzamento è piccolo ($h < 0.01$) queste misure sono legate dalla relazione

$$h = \frac{D}{2p} = \frac{\Delta}{p} = \tan \mathbf{d} = \frac{1}{Q} \quad (3.11)$$

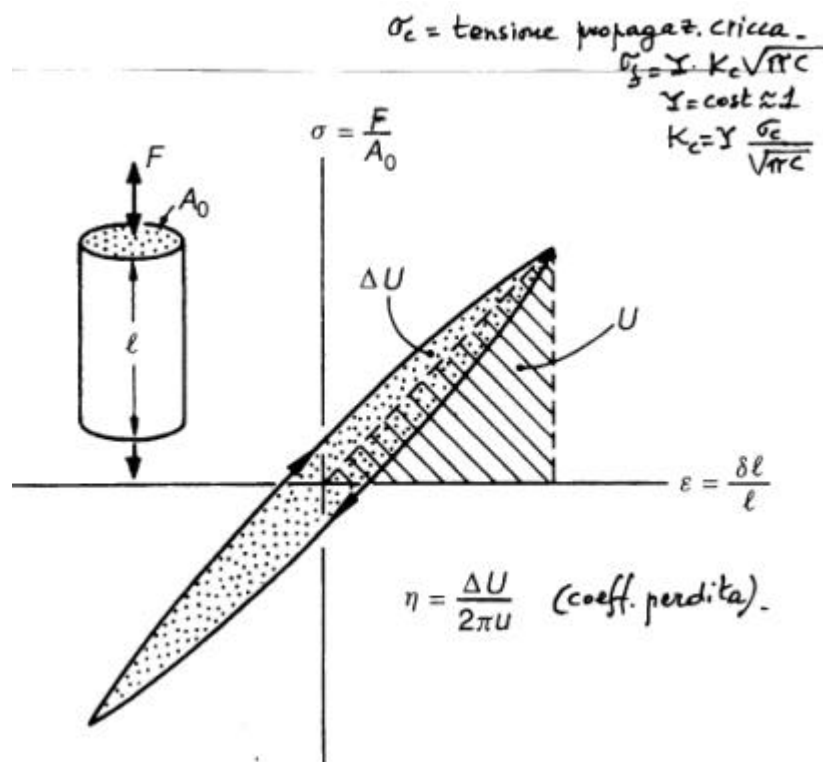


Figura 3.7 - Il coefficiente di perdita, h , misura la frazione di energia dissipata in un ciclo sforzo-deformazione.

La relazione non vale più quando lo smorzamento è alto.

La sollecitazione ciclica causa non solo dissipazione di energia, ma anche una nucleazione e propagazione di cricche che culmina nel cedimento per fatica. Per molti materiali esiste un limite di fatica: un'ampiezza di tensione al disotto della quale la frattura non avviene, oppure avviene solo dopo un numero di cicli molto alto ($>10^7$). Questa informazione è contenuta nel *rapporto di fatica*, f (una quantità adimensionale); si tratta del rapporto tra limite di fatica e resistenza S_f .

La velocità con cui il calore viene trasmesso attraverso un solido in condizioni stazionarie (nel senso che il profilo di temperatura non cambia nel tempo) è misurata dalla *conducibilità termica*, \mathbf{I} , (unità: W/mK). La Figura 3.8 mostra come viene fatta la misura: viene registrato il flusso di calore q (W/cm²) che passa nel materiale da una superficie a temperatura T_1 ad una a temperatura T_2 , distante X dall'altra. In base alla legge di Fourier:

$$q = -\mathbf{I} \frac{dT}{dX} = \frac{(T_1 - T_2)}{X} \quad (3.12)$$

Quando il flusso di calore è transitorio, il flusso stesso dipende invece dalla *diffusività termica*, a (unità: m²/s), definita dalla

$$a = \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{r} \cdot C_p} \quad (3.13)$$

in cui \mathbf{r} è la densità e C_p il *calore specifico a pressione costante* (unità: J/kg·K). La diffusività termica può essere misurata direttamente dal decadimento dell'impulso di temperatura quando

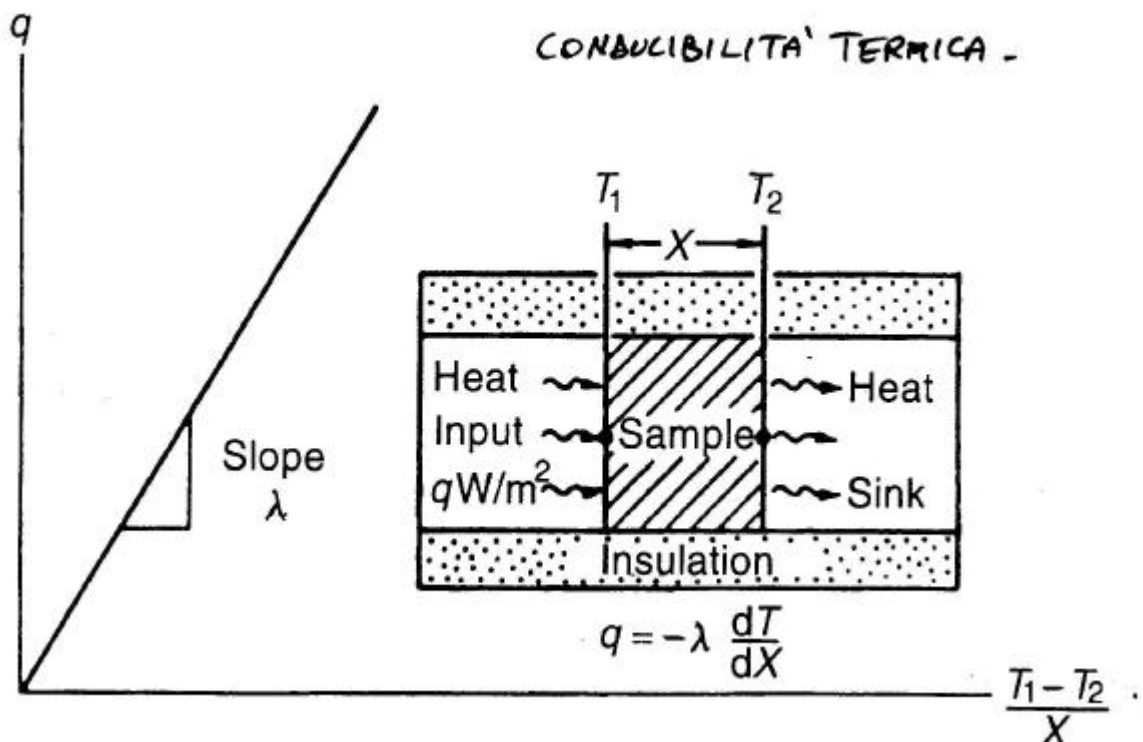


Figura 3.8 - La conducibilità termica, \mathbf{I} , misura il flusso di calore prodotto da un gradiente di temperatura dT/dX .

una sorgente di calore, applicata al materiale, è interrotta; oppure può essere calcolata da \mathbf{I} , usando l'equazione qui sopra riportata. Allo scopo è necessario disporre del valore di C_p (per i

solidi virtualmente identico al valore C_v a volume costante). I valori di calore specifico vengono misurati con tecnica calorimetrica, che rappresenta anche il metodo standard per misurare la *temperatura di fusione*, T_m , e la *temperatura di transizione vetrosa*, T_g (unità di entrambe: K). Questa seconda temperatura è una caratteristica dei solidi non cristallini, che non presentano un punto di fusione preciso; la temperatura caratterizza la transizione dallo stato solido allo stato di liquido molto viscoso. nella progettazione ingegneristica è utile definire due altre temperature: la temperatura massima di esercizio, T_{max} , e la temperatura di rammollimento, T_s (unità di entrambe: K). La prima indica la temperatura più alta a cui un materiale può essere impiegato ragionevolmente senza che ossidazione, trasformazioni chimiche o scorrimento viscoso diventino un problema; la seconda fornisce il valore di temperatura necessario affinché il materiale fluisca facilmente ai fini delle operazioni di formatura.

La maggior parte dei materiali si espande quando riscaldata (Figura 3.9). La deformazione termica per unità di variazione della temperatura viene misurato dal *coefficiente di espansione termica lineare*, α (unità: K^{-1}). Se il materiale è termicamente isotropo l'espansione volumetrica per grado è 3α . In caso contrario, sono necessari due o più coefficienti e l'espansione volumetrica diventa la somma delle deformazioni termiche principali.

La *resistenza allo shock termico* (unità: K) è la massima differenza di temperatura sotto cui un materiale può essere raffreddato bruscamente senza danni. Questa resistenza e la *resistenza allo scorrimento viscoso* sono importanti nella progettazione di componenti per alte temperature. Lo scorrimento viscoso è la deformazione lenta, dipendente dal tempo, che avviene quando i materiali sono scaldati al di sopra di circa $(1/3)T_m$ o $(2/3)T_g$ (Figura 3.10). Essa è caratterizzata da un insieme di *costanti dello scorrimento*: un esponente n (adimensionale), un'energia di attivazione Q (unità: kJ/mole), un fattore cinetico k_o (unità: s^{-1}) e una tensione di riferimento s_o (unità: MPa o MN/m^2). La velocità $d\epsilon/dt$ dello scorrimento alla temperatura T per effetto di una tensione s è data dall'equazione

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \dot{\epsilon}_o \left(\frac{s}{s_o} \right)^n \exp\left(-\frac{Q}{RT} \right) \quad (3.14)$$

in cui R è la costante dei gas (8.314 J/mole· K).

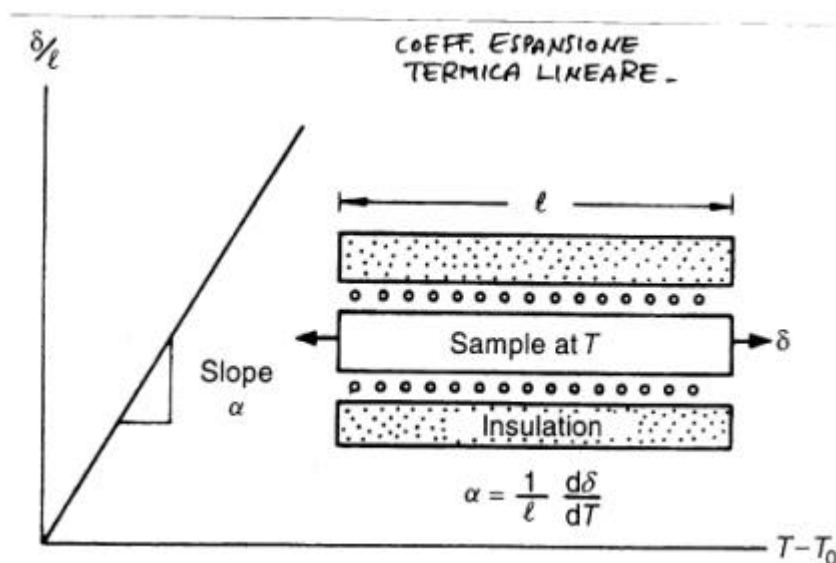


Figura 3.9 - Il coefficiente di espansione termica lineare misura l'allungamento (per unità di lunghezza) che il materiale subisce per effetto di un aumento di temperatura.

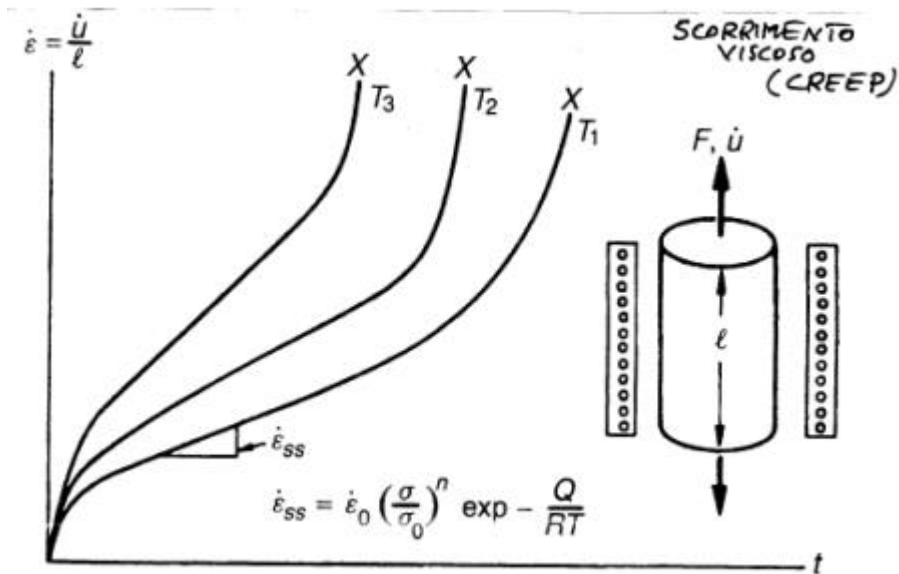


Figura 3.10 - Lo scorrimento viscoso (creep) è la deformazione lenta nel tempo sotto sforzo costante, ed è caratterizzata dalle costanti $\dot{\epsilon}_0$, σ_0 e Q .

L'usura, l'ossidazione e la corrosione sono difficili da quantificare, in parte per il fatto che sono processi di superficie, e non di volume, e in parte per il fatto che essi implicano interazioni tra due materiali, e non soltanto le proprietà di un materiale solo. Quando i solidi strisciano uno sull'altro (Figura 3.11) il volume di materiale perso dalla superficie di uno di essi, per unità di percorso di strisciamento, è definito come tasso di usura, W . La resistenza all'usura della superficie è caratterizzata dalla *costante di usura di Archard*, k_A (unità: m/MN o MPa), definita dall'equazione

$$\frac{W}{A} = k_A P \tag{3.15}$$

in cui A è l'area della superficie di contatto e P la pressione di contatto (ossia, forza per unità di area). Dati di k_A sono disponibili, ma devono essere interpretati come una proprietà della coppia strisciante, e non di un solo elemento della coppia.

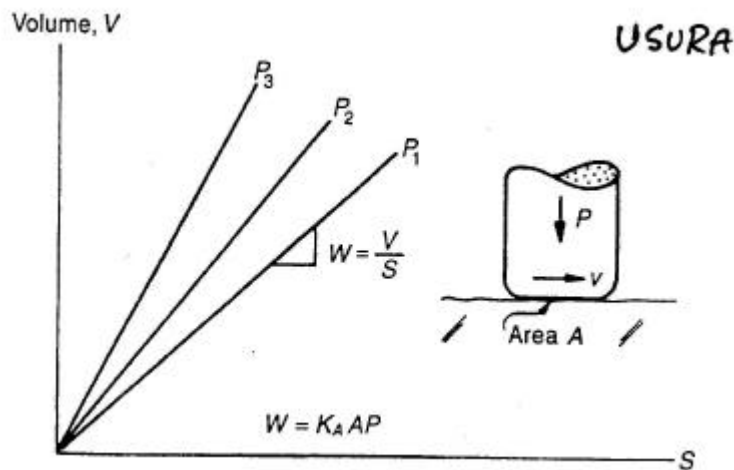


Figura 3.11 - L'usura è la perdita di materiale dovuta, nell'esempio, a strisciamento tra le superfici di due solidi. La resistenza all'usura è misurata dal valore della costante di usura di Archard, K_A .

La *corrosione secca* è dovuta alla reazione chimica di una superficie solida con gas secchi (Figura 3.12). E' tipica la reazione di un metallo M con l'ossigeno, O₂, per dare origine a uno strato superficiale di ossido: $M + O_2 \rightleftharpoons MO_2$. Se l'ossido è protettivo e forma sulla superficie un film continuo, privo di cricche, spesso x , la reazione rallenta nel tempo secondo la

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k_p}{x} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3.16)$$

da cui, integrando,

$$x^2 = k_p \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \cdot t$$

con R costante dei gas, T temperatura assoluta, k_p *costante parabolica di ossidazione* (unità: m²/s), Q energia di attivazione (unità: kJ/mole).

La corrosione umida - in acqua, acqua marina, acidi o alcali - è un processo molto più complicato e non può essere schematizzata con equazioni in cui compaiano costanti dal significato semplice. E' più comune una catalogazione della resistenza alla corrosione mediante una scala semplice, da A (molto buona) a E (molto scarsa).

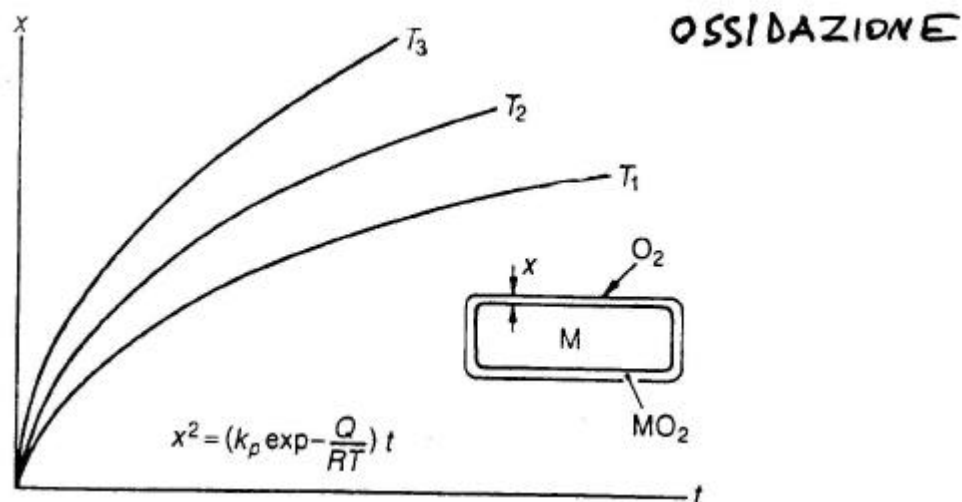


Figura 3.12 - La corrosione è dovuta a reazioni delle superfici del materiale con gas o liquidi - di solito soluzioni acquose. Talora il processo può essere descritto quantitativamente con una relazione di forma semplice, ma più spesso ciò non è possibile essendo il processo stesso molto complicato.

3.4 Sommario e conclusioni

Esistono sei classi importanti di materiali per la progettazione meccanica: metalli, polimeri, elastomeri, ceramici, vetri e compositi, i quali ultimi combinano proprietà di due o più materiali delle altre classi. All'interno di ciascuna classe sussistono elementi comuni ai diversi materiali: i ceramici costituiscono una classe di materiali duri, fragili e resistenti alla corrosione; i metalli costituiscono una classe di materiali duttili, tenaci e buoni conduttori di corrente elettrica; i polimeri costituiscono una classe di materiali leggeri, facili da formare, buoni isolanti elettrici; e così via - il che rende utile la classificazione. Ma nella progettazione si cerca di liberarsi dai vincoli di una classe, e di pensare invece al nome di un materiale come a un identificatore di un determinato profilo di proprietà - un profilo che, nei prossimi capitoli, sarà messo a confronto con un profilo 'ideale' indicato dal progetto e che guida la nostra scelta. A tale fine, in questo

capitolo sono state definite le proprietà importanti per la progettazione termomeccanica. Nel prossimo capitolo sarà sviluppato un metodo di presentare le proprietà in modo da rendere massima la libertà di scelta.

3.5 Altre letture

Definizioni delle proprietà dei materiali possono essere trovate in numerosi testi di tipo generale sui materiali di interesse ingegneristico, e tra essi quelli qui sotto citati.

Ashby M.F. and Jones D.R.H., *Engineering Materials*, Parts 1 and 2, 2nd Editions, Pergamon Press, Oxford, 1997, 1998.

Charles J.A., Crane F.A.A. and Furness J.A.G., *Selection and Use of Engineering Materials*, 3rd Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1987.

Farag M.M., *Selection of Materials and Manufacturing Processes for Engineering Design*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1989.

Fontana M.G. and Greene N.D, *Corrosion Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1967.

Hertzberg R.W., *Deformation and Fracture of Engineering Materials*, 3rd Edition, Wiley, New York, 1989.

Van Vlack L.H., *Materials for Engineering*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1982.