



Principi di bioingegneria

Lezione 14

Materiali e proprietà meccaniche

Gabriele Maria Fortunato

gabriele.fortunato@unipi.it



Cos'è un materiale?

- Si definisce *materiale* una qualità di *materia* solida adatta alla costruzione.
- Generalmente il materiale è costituito da un insieme di più *sostanze* (qualità di materia di composizione chimica ben definita).

Caratteristiche dei materiali

- I materiali da costruzione devono essere adatti a:
 - assumere forma e dimensioni di progetto con tolleranze definite (essere lavorabili),
 - resistere a sollecitazioni meccaniche e termiche, ad usura e corrosione,
 - subire deformazioni contenute (avere una certa rigidezza),
 - mantenere caratteristiche costanti al variare del tempo (non essere soggetti ad invecchiamento).
- Queste caratteristiche dipendono dalle proprietà meccaniche, termiche e tecnologiche del materiale.

Caratteristiche dei materiali

- Altre caratteristiche d'interesse, sono:
 - peso (dipendente dalla proprietà fisica densità),
 - affidabilità,
 - durata,
 - costo (che comprende quello del materiale e della sua lavorazione),
 - caratteristiche estetiche,
 - sostenibilità ecologica (riciclabilità, impatto ambientale, possibilità di smaltimento).
- Le caratteristiche meccaniche di un elemento dipendono, oltre che dalle proprietà del materiale utilizzato, dal processo di costruzione e dalla sua geometria (forma e dimensioni).
- Le principali cause di danneggiamento degli elementi meccanici sono la rottura per fatica e il deterioramento delle superfici.

Classi di materiali

- **metallici**: costituiti da elementi a carattere metallico; hanno struttura cristallina; buona resistenza meccanica, densità elevata; sono malleabili, duttili, conduttori calore ed elettricità, poco trasparenti alla luce.
 - Acciai e ghise, alluminio e leghe, rame e leghe (bronzi e ottoni), magnesio e leghe, nichel e leghe, titanio e leghe, zinco e leghe.
- **ceramici**: ossidi e/o silicati; hanno struttura cristallina (a parte il vetro); sono duri e fragili, resistenti a corrosione e usura, non conduttori di calore ed elettricità, con elevate temperature di fusione.
 - Ceramiche tradizionali (cemento, vetri, laterizi, piastrelle, porcellana, pietre naturali, gesso), ceramiche speciali.
- **polimerici**: composti organici macromolecolari, sintetici o naturali; la struttura è costituita da catene di molecole; hanno densità bassa, scarsa stabilità dimensionale; sono amorfi, facilmente modellabili, rammolliscono o bruciano per effetto della temperatura.
 - Naturali (gomma, legno, adesivi, vernici, bitumi), artificiali (termoplastici, plastiche termoindurenti, elastomeri).

Materiali compositi

- Miscela di due o più materiali mutuamente insolubili: uno costituisce la **matrice** (legante) e l'altro la **carica** (rinforzo o riempitivo)
- Matrice: materiale polimerico, ceramico o metallico
- Carica: fibre lunghe/corte o particelle (vetro, carbonio, Kevlar)
- I materiali ridotti in fibre di diametri dell'ordine dei 5-15 μm (vetro, carbonio, Kevlar) o dei 100-200 μm (boro), presentano proprietà meccaniche molto più elevate grazie alla minore presenza di difetti nella struttura cristallina

Microstruttura

- I materiali metallici e ceramici hanno struttura cristallina nella quale gli atomi si dispongono ordinatamente assumendo una *struttura geometricamente definita*.
- I materiali polimerici hanno invece struttura *amorfa*.
- Materiali **omogenei** (costituiti da una sola sostanza o più sostanze solubili allo stato solido) o **eterogenei** (costituiti da componenti non solubili)
- Omogenei: rame puro, bronzo da lavorazione
- Eterogenei: acciai, laterizi, porcellane

Isotropia e anisotropia

- Un materiale si definisce isotropo se le sue proprietà sono uguali in tutte le direzioni.
- Il singolo cristallo di materiale è tipicamente anisotropo, tuttavia i materiali costituiti da aggregati di cristalli possono risultare isotropi, poiché questi ultimi si dispongono con orientazione casuale.
- I materiali amorfi sono generalmente isotropi perché il disordine molecolare si riproduce statisticamente in tutte le direzioni.
- Lavorazioni come laminazione, trafilatura e forgiatura possono rendere anisotropo un materiale, perché provocano un orientamento preferenziale dei grani cristallini.
- I materiali compositi sono spesso volutamente anisotropi, grazie alle differenti proprietà meccaniche di matrice e fibre.

Deformabilità ed assorbimento di energia

In generale:

- Sottoposto ad una sollecitazione il materiale si deforma;
- All'aumentare della sollecitazione la deformazione è dapprima elastica, poi plastica ed infine si formano nuove superfici (rottura del materiale)
- Nelle varie fasi di deformazione il materiale assorbe energia elastica, plastica, di formazione di nuove superfici

Proprietà fisiche di interesse

Proprietà meccaniche

- Descrivono il comportamento del materiale assoggettato a forze statiche o dinamiche:
 - comportamento sforzi-deformazioni (elastico, plastico, viscoelastico) e resistenza statica (tipicamente quantificata mediante le tensioni di snervamento e rottura),
 - comportamento sforzi-deformazioni e resistenza statica ad alta temperatura,
 - resistenza all'indentazione, alla scalfitura e all'abrasione (durezza),
 - resistenza agli urti (resilienza),
 - resistenza a frattura (tenacità a frattura),
 - resistenza a fatica.

Proprietà fisiche di interesse

Proprietà termiche

- Descrivono il comportamento del materiale assoggettato a variazioni di temperatura:
 - dilatazione termica,
 - capacità termica,
 - conduttività termica,
 - resistenza allo shock termico.

Proprietà fisiche di interesse

Proprietà termiche

- dilatazione termica
 - Nei solidi, all'aumentare della temperatura, la distanza tra gli atomi (distanza interatomica) aumenta; questo si traduce in un incremento delle dimensioni. La deformazione conseguente è esprimibile secondo la relazione:

$$\varepsilon_{i=x,y,z} = \alpha_i (T - T_0) = \alpha_i \Delta T$$

Proprietà fisiche di interesse

Proprietà termiche

- capacità termica
 - La capacità termica viene quantificata tramite il calore specifico c_p [$\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$], che è la quantità di energia necessaria ad aumentare di un grado la temperatura di una massa di un Kg del materiale a pressione costante.

Proprietà fisiche di interesse

Proprietà termiche

- conduttività termica
 - Nei materiali l'energia termica viene trasportata dai punti a temperatura più elevata a quelli a temperatura più bassa. Tale trasporto è definito conduzione. Il flusso di calore J (quantità di calore ad unità di superficie) in un corpo è proporzionale al gradiente di temperatura secondo la seguente espressione

$$J = -K \frac{dT}{dx}$$

- Dove K [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$] è la conduttività o conducibilità termica.

Proprietà fisiche di interesse

Proprietà termiche

- Resistenza allo shock termico
 - Una brusca variazione di temperatura può provocare in un solido elevati gradienti di temperatura ai quali si associano elevati gradienti di deformazione e conseguentemente di tensione. Se tali tensioni superano i valori limite si può verificare la rottura.
 - La capacità di Resistenza allo Shock Termico (RST) è data da:

$$RST \cong \frac{\kappa}{\alpha} \frac{\sigma_r}{E}$$

Proprietà fisiche di interesse

Temperatura di fusione e transizione vetrosa

- T_f è la temperatura alla quale il materiale passa dallo stato solido a quello liquido.
- Le temperature di esercizio dei componenti meccanici devono essere convenientemente minori di essa.
- Per i polimeri è altrettanto importante la temperatura di transizione vetrosa T_g , che è la temperatura al di sotto della quale i polimeri diventano rigidi e fragili come il vetro.
- Le plastiche rigide hanno T_g di circa 100°C . Le plastiche flessibili e gli elastomeri gommosi hanno T_g inferiori alla temperatura ambiente.

Proprietà fisiche di interesse

Densità

- La densità ρ è definita come rapporto tra la massa del materiale e il volume occupato, tipicamente espressa in kg/m^3 .
- Nei casi in cui il peso di un componente ha rilevanza, si può parlare di resistenza specifica del materiale, intendendo il rapporto tra la grandezza che identifica la resistenza e la densità (ad esempio la resistenza specifica a rottura è il rapporto tra la tensione di rottura e la densità).

Proprietà fisiche di interesse

Proprietà elettriche

- La principale proprietà elettrica d'interesse dei materiali da costruzione è la conduttività (o il suo opposto, la resistività), che è l'attitudine a trasmettere la corrente elettrica.

Proprietà tecnologiche

- Le proprietà tecnologiche descrivono l'attitudine di un materiale a essere lavorato per produrre dei manufatti o a essere trattato per acquisire determinate proprietà.
 - Duttilità/malleabilità
 - Fusibilità
 - Saldabilità
 - Temprabilità

Proprietà tecnologiche

Duttilità/Malleabilità

- Attitudine di un materiale a essere lavorato a freddo per deformazione plastica. La duttilità e la malleabilità si riferiscono rispettivamente all'attitudine a essere ridotto in fili mediante trazione e in lamine mediante compressione.

Fusibilità

- Attitudine di un materiale a passare dallo stato solido a quello liquido mediante riscaldamento, per essere poi raffreddato in modo da assumere la forma desiderata. La fusibilità di un materiale cresce al diminuire della temperatura di fusione.

Proprietà tecnologiche

Saldabilità

- Attitudine di un materiale a essere saldato, cioè la proprietà in base alla quale pezzi del materiale possono essere uniti ad altri pezzi dello stesso o di altri materiali, se portati a temperature prossime (ma inferiori) al loro punto di fusione.

Temprabilità

- Attitudine di un materiale ad acquistare maggiore durezza e resistenza meccanica attraverso il processo di tempra, costituito da un riscaldamento a temperatura elevata ma minore di quella di fusione, e un successivo raffreddamento brusco.

Categorie di materiali

MATERIALE	Legame	Microstruttura	Vantaggi	Svantaggi
Metalli e leghe Acciai e ghise Alluminio e leghe Rame e leghe Magnesio e leghe Nichel e leghe Titanio e leghe Zinco e leghe	Metallico	Grani cristallini	Resistenza Rigidezza Duttilità Conduc. Elettrica	Peso Corrosione
Polimeri Naturali (gomma, legno, vernici, bitumi, adesivi) Artificiali (termoindurenti, termoplastici, elastomeri)	Catene di molecole	Catene di molecole	Costo Leggerezza Resist. Corrosione	Resist. Meccanica Resist. Temperatura Rigidezza Scorrimento Invecchiamento
Ceramici Tradizionali (cemento, mattoni, gesso, piastrelle, porcellana, pietre naturali) Vetro Speciali	Ionico Covalente Amorfo	Grani cristallini Amorfo	Resist. Meccanica Resist. Temperatura Resist. Corrosione Rigidezza Durezza	Fragilità
Compositi A matrice polimerica A matrice metallica A matrice ceramica	Vari	Matrice e fibre	Resist. meccanica Rigidezza Leggerezza	Costo Resist. Temperatura Delaminazione

Proprietà di alcuni materiali

MATERIALE	E [GPa]	σ_r [MPa]		ρ [g/cm ³]	T_f [°C]	ν
Diamante	1.000	750		3,515		0,1
Acciai	190÷215	200÷2.500		7,87	1.530	0,28÷0,3
Ghise	170÷190	100÷700		7,87	1.530	0,28÷0,3
Leghe di nichel	177	480÷750		8,90	1.453	0,34
Leghe di titanio	85÷130	270÷1.450		4,51	1.668	0,36
Leghe di rame (Ottoni)	120÷150	240÷400		8,96	1.083	0,35
Leghe di rame (Bronzi)	100	300÷760		8,96	1.083	0,35
Leghe di alluminio	70÷80	140÷550		2,70	660	0,35
Leghe di magnesio	40÷45	150÷380		1,74	650	0,29
Ceramici	60÷70	trazione 50÷580	compressione 560÷3.500	2,4÷5,8	700÷2.800	0,18÷0,22
Plastiche	0,1÷6,0	10÷200		0,9÷2	110÷640	0,33÷0,34
Elastomeri	0,01÷0,1	9÷25			T esercizio 80÷250	
Resine poliuretaniche, viniliche epossidiche, fenoliche, siliconiche	3,0÷5,0	25÷100			110÷640	0,33÷0,37
Fibre vetro, carbonio, boro, kevlar	70÷400	2.300÷3.800		1,7÷2,6		0,2÷0,35
Composito resina e fibre	45÷320	1.100÷1.700		1,3÷2		0,25÷0,34
Composito resina e fibre +	1,2÷11	30÷45				
Legno Longitudinale	6÷16	trazione 40÷200	compressione 20÷100	0,3÷1	-	0,29 _{LR}
Legno Radiale +	0,5÷1	3,5÷5			-	0,02 _{RL}

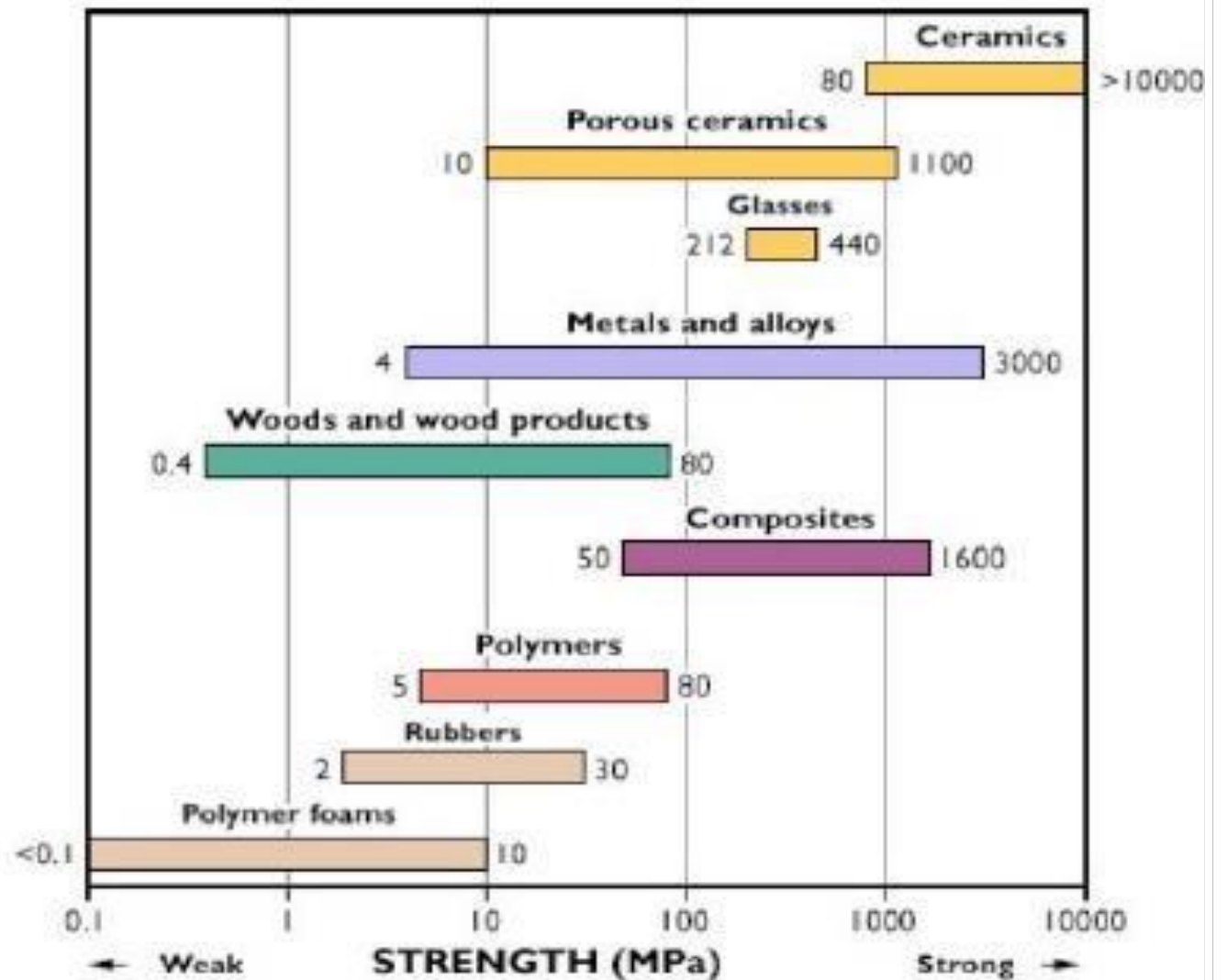
Proprietà meccaniche

- Indicano l'attitudine del materiale a sopportare l'azione di sollecitazioni esterne, **statiche** o dinamiche, che tendono a romperlo e/o a deformarlo.
- Descrivono il comportamento del materiale assoggettato a forze statiche o dinamiche:
 - **comportamento sforzi-deformazioni (elastico, plastico, viscoelastico) e resistenza statica** (tipicamente quantificata mediante le tensioni di snervamento e rottura),
 - ***comportamento sforzi-deformazioni e resistenza statica ad alta temperatura,***
 - **resistenza all'indentazione, alla scalfittura e all'abrasione (durezza)**
 - resistenza agli urti (resilienza),
 - resistenza a frattura (tenacità a frattura),
 - resistenza a fatica.

N.B. *Le proprietà meccaniche possono essere modificate con appropriati trattamenti termici e/o meccanici.*

Proprietà meccaniche

- L'effetto dell'applicazione di forze sui materiali è di indurre deformazioni transitorie e permanenti
- Le relazioni tra carichi applicati e deformazioni determinano il comportamento meccanico di un materiale
- Lo studio del comportamento meccanico di un materiale permette di dimensionare le parti di un dispositivo in fase di progettazione



Caratterizzazione meccanica

- Esiste notevole numero di prove meccaniche atte alla caratterizzazione del comportamento strutturale dei materiali
- Lo scopo è definire i limiti di utilizzabilità di ciascun materiale
Le prove devono essere affidabili e ripetibili
- Scopo delle normative è rendere i risultati indipendenti dai laboratori
- Esistono inoltre prove sui materiali atte a determinarne le caratteristiche e prove tecnologiche dedicate allo studio del comportamento dei manufatti nelle reali condizioni di utilizzo

Prove di trazione o di compressione, prove di durezza, prove di fatica, ...

Prove di piegatura, resistenza alla punzonatura, prove di carico, ...

Prove statiche

Le caratteristiche meccaniche vengono misurate su provini di forma semplice (senza intagli, salvo prove particolari) e di dimensioni standard, in modo da ridurre al minimo l'influenza della forma e della dimensione, misurando così le caratteristiche meccaniche del materiale. Alcune prove forniscono proprietà del materiale che sono direttamente impiegabili nei calcoli tecnici.

Tra queste le principali sono:

1. **Prova di trazione statica**: fornisce il valore della resistenza a trazione e dello snervamento, della rigidezza elastica e dà indicazioni sul comportamento duttile o fragile del materiale;
2. **Prova di compressione statica**;
3. **Prova di torsione**;
4. **Prova di taglio**;
5. **Prova di flessione statica**;

Altre prove producono informazioni non direttamente utilizzate nella progettazione, ma in grado di classificare i materiali, cioè paragonarne le caratteristiche meccaniche. Ad esempio.

1. **Prove di durezza**;
2. **Prove di resilienza**: forniscono dati sulla resistenza all'urto, e danno anche indicazioni sul comportamento più o meno duttile del materiale (es. prova del pendolo di Charpy a diverse temperature per valutare la temp. di transizione fragile/duttile tipica di molti materiali).

Prove dinamiche

- Nelle prove dinamiche i carichi vengono applicati in tempi dell'ordine dei millisecondi durante i quali nel materiale si destano effetti dinamici, cioè forze di inerzia dovute all'accelerazione delle masse e forze di natura viscoelastica proporzionali alla velocità di deformazione.
- Le prove dinamiche più tipiche sono quelle di impatto, ma varie prove dinamiche vengono eseguite utilizzando procedure uguali a quelle delle prove statiche con appropriate velocità di applicazione del carico.

Prove di durata

- Nelle prove di durata i carichi vengono applicati per tempi prolungati dell'ordine di ore-mesi. Le prove di durata più importanti sono
 - le prove di fatica (a flessione rotante, a trazione alternata, prove di propagazione della frattura),
 - le prove di scorrimento.

Altre modalità di prove

- Altre prove meccaniche possono essere effettuate con modalità simili alle precedenti
 - variando le condizioni ambientali di prova per simulare le condizioni di esercizio (temperatura, umidità, ambiente aggressivo),
 - variando le caratteristiche geometriche del provino introducendo intagli che riproducano i valori del fattore di concentrazione delle tensioni del componente reale.
- Altre prove meccaniche vengono effettuate applicando una combinazione di carichi in modo da provocare nel materiale uno stato tensionale multiassiale, di solito biassiale.

Comportamento sforzi/deformazioni

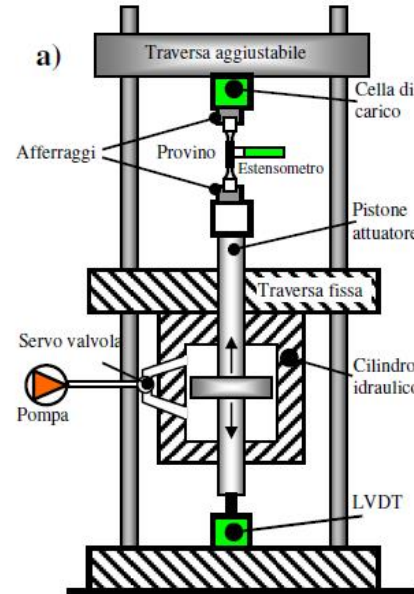
- Il comportamento del materiale per ciò che concerne il rapporto tra le tensioni cui è soggetto e le deformazioni che si destano è definito:
 - *lineare* se la deformazione è direttamente proporzionale alla tensione applicata,
 - *elastico* se le deformazioni si annullano al cessare delle tensioni applicate,
 - *plastico* se rimangono deformazioni permanenti al cessare delle tensioni applicate.

Comportamento sforzi/deformazioni

- La **deformazione elastica** è legata allo stiramento dei legami interatomici nei solidi che cessa al cessare delle tensioni
- La **deformazione plastica** è legata allo slittamento tra piani di atomi nei grani cristallini che accade in modo incrementale a causa del movimento delle dislocazioni sotto tensioni elevate. Per questa natura fisica, la deformazione plastica non provoca variazioni di volume nel materiale.

Macchine di prova universali

- Nelle macchine universali di prova si distinguono:
 - la parte fissa, costituita dal telaio,
 - l'elemento mobile (traversa o pistone attuatore),
 - il meccanismo di movimento con velocità regolabile (elettromeccanico o idraulico, es. pompa),
 - gli afferraggi,
 - il pannello di controllo.



Macchine di prova universali

- Le caratteristiche meccaniche di maggiore interesse di una macchina sono il *carico massimo* che può essere applicato (o portata), la *velocità massima di applicazione del carico* e lo *spostamento massimo* (corsa) dell'elemento mobile.
- Le macchine di prova universali vengono distinte in base all'elemento motore in *elettromeccaniche* e *servoidrauliche*.
- Nelle prime il meccanismo di movimento è un motore elettrico collegato alla traversa mobile tramite ingranaggi; nelle seconde è una pompa idraulica dalla quale il fluido in pressione viene fatto fluire in cilindro in modo da spingere il pistone attuatore; controllando la portata del fluido tramite una valvola si applica la forza desiderata.

Macchine di prova universali

- Le macchine elettromeccaniche generalmente hanno corse dell'elemento mobile molto più lunghe, mentre la velocità di applicazione del carico è generalmente inferiore a quella delle servoidrauliche. Le macchine elettromeccaniche non si prestano alle prove dinamiche e a quelle di fatica, al contrario delle servoidrauliche.
- Le macchine servoidrauliche generalmente sono costruite per portate elevate, maggiori di 20KN, di conseguenza se si effettuano prove statiche con bassi livelli di carico le macchine elettromeccaniche risultano più convenienti.

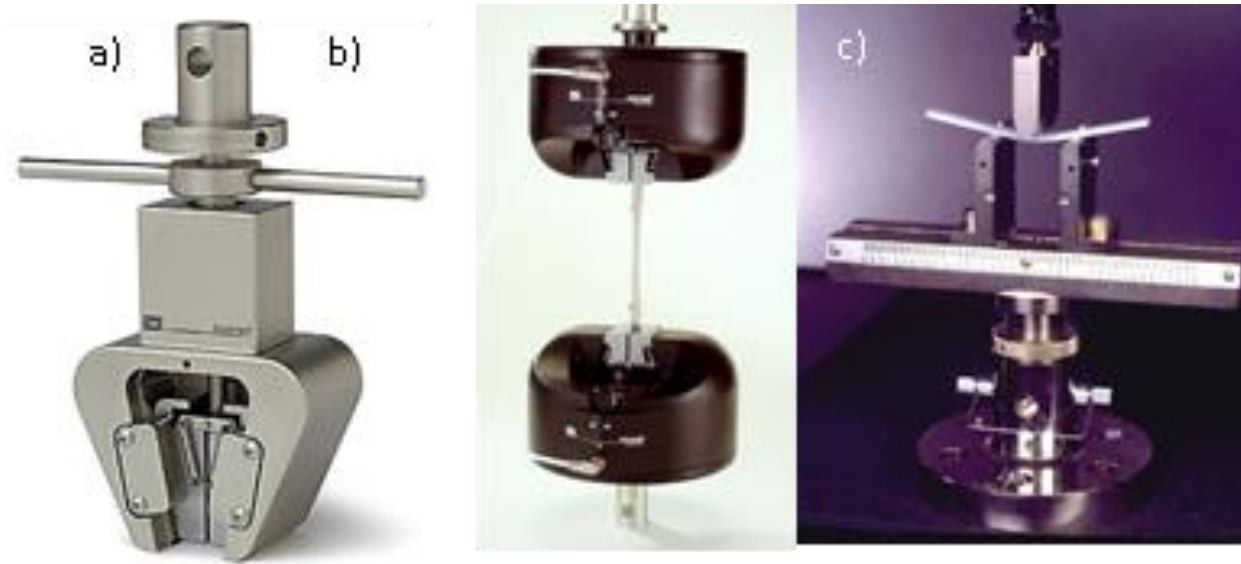
MACCHINE Caratteristiche tipiche	Elettromeccaniche	Servoidrauliche
Portata P	$P < 4 \text{ KN}$	$P > 20 \text{ KN}$
Corsa massima c_m	$c_m > 500 \text{ mm}$	$100 \div 200 \text{ mm}$
Carichi statici	***	**
Carichi dinamici	NO	SI
Possibilità di controllo	*	***
Sicurezza	***	*
Ingombro	***	*

Controllo del carico applicato

- Il carico viene trasmesso al provino dall'elemento mobile della macchina tramite gli afferraggi, e nell'esecuzione viene controllato lo spostamento della traversa o dell'attuatore.
- Poiché la forza applicata, lo spostamento e, in alcuni casi, la deformazione vengono costantemente misurati, il movimento della traversa/attuatore può essere effettuato in controllo di:
 - spostamento,
 - carico,
 - deformazione.
- La traversa (o l'attuatore) viene movimentata in modo che nei tre casi, rispettivamente, la posizione h della traversa stessa, la forza applicata e la deformazione misurata in un punto del provino, seguano una funzione imposta.

Afferraggi

- Gli afferraggi hanno lo scopo di trasmettere la forza dalla macchina al provino: lo sforzo può essere trasmesso tangenzialmente alla superficie del provino per attrito o normalmente per pressione.



Afferraggi

- Nel primo caso, come nelle prove di trazione o alcune prove di compressione, il provino viene stretto in ciascun afferraggio tra due superfici (ammorsato). L'ampiezza della superficie di contatto, le caratteristiche di tali superfici su afferraggi e provini e la pressione applicata determinano l'efficacia dell'ammorsaggio.
- Nel secondo caso, come in alcune prove di compressione e quelle di flessione, il carico viene trasmesso dall'estremità dell'afferraggio per pressione sulla superficie del provino.
- Nel caso delle prove di flessione, il provino viene appoggiato su un apparato che fornisce due appoggi con distanza regolabile e viene poi pressato da un cuneo cilindrico o da una coppia di cunei solidali alla traversa mobile.

Afferraggi

- Esistono numerosi tipi di afferraggi per la trasmissione di forze tangenziali, ma essi possono essere distinti in meccanici pneumatici; nei primi il serraggio viene effettuato stringendo manualmente un meccanismo a vite mentre in quelli pneumatici viene effettuato tramite la pressione dell'aria o di un fluido.
- In quest'ultimo tipo di afferraggi, nettamente più costosi, la pressione può essere controllata per ottenere la forza di serraggio richiesta.
- Le superfici degli afferraggi destinate al contatto con il provino sono generalmente seghettate e le superfici dei provini devono essere ben pulite.

Afferraggi

- L'ammorsaggio del provino in molti casi è l'operazione più critica della prova. I più comuni problemi sono lo slittamento del provino negli afferraggi e la rottura in corrispondenza della zona di ammorsaggio.
- Lo slittamento accade più frequentemente utilizzando morse meccaniche azionate a vite con superfici piate.
- La rottura all'afferraggio accade quando il campione dentro le morse è danneggiato da eccessive forze di serraggio o da superfici seghettate che incidono troppo profondamente.

Afferraggi

- Soluzioni per il problema dello slittamento
 - La superficie dell'afferraggio dovrebbe essere abbastanza larga da coprire tutta l'estensione del provino ad esso destinata.
 - Si può coprire la superficie con nastro adesivo o vari gradi di carta smerigliata.
 - Si possono utilizzare differenti superfici di contatto; ad esempio una piana, una coperta di gomma e una seghettata.
 - Nelle prove ad elevata temperatura è preferibile usare facce rivestite di materiale di copertura resistente ad alte temperature piuttosto che gomma.

Afferraggi

- Soluzioni per il problema della rottura all'afferraggio
 - Nelle morse a vite l'operatore potrebbe applicare una forza eccessiva durante il serraggio. Utilizzare una chiave dinamometria o passare a morse pneumatiche.
 - Usando morse pneumatiche, abbassare la pressione mantenendosi appena al di sopra del valore che causa lo scivolamento.
 - Usando superfici seghettate, passare a superfici aventi più dentelli per unità di superficie meno profondi.
 - Usando superfici seghettate, coprire con nastro adesivo o materiali simili. Questo attenuerà il morso prevenendo il danneggiamento del provino.

Apparati di misura e dispositivi

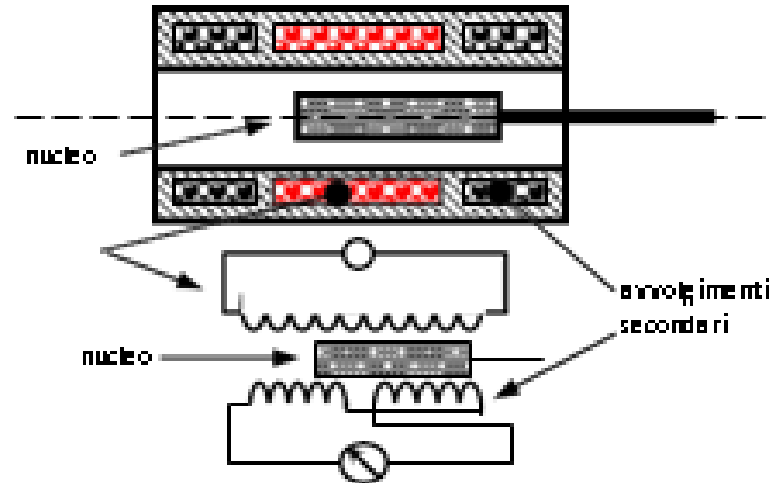
- La forza applicata e lo spostamento e/o la deformazione di uno o più punti del provino/prototipo mediante appositi trasduttori che traducono le grandezze meccaniche in segnale elettrico.
- I trasduttori sono caratterizzati dai seguenti parametri:
 - la risoluzione, cioè la variazione minima della grandezza che il trasduttore è in grado di misurare,
 - il valore di fondo scala, cioè il valore massimo della grandezza il trasduttore è in grado di misurare,
 - l'incertezza, cioè la semiampiezza dell'intervallo attorno al valore letto sullo strumento entro cui il valore reale è compreso col 95% di probabilità.

Apparati di misura e dispositivi: forza

- La forza viene misurata con un trasduttore denominato cella di carico collegata ad uno degli afferraggi. Esso è costituita da un elemento elastico la cui deformazione sotto l'azione del carico, viene misurata da estensimetri opportunamente disposti. Dal valore della deformazione si ricava la tensione agente e da essa il carico applicato.
- La cella di carico è caratterizzata fondamentalmente dal valore di fondo scala o capacità, cioè dal carico massimo che può sopportare. Se si effettuano prove a valori della forza inferiori al 20% della capacità della cella può essere opportuno passare ad una cella di minore capacità, mentre se le prove vengono effettuate a valori inferiori al 2% della capacità della cella l'utilizzo di una cella di minore capacità è necessaria.
- La misura della forza è generalmente molto precisa, con incertezza inferiore allo 0.03%.

Apparati di misura e dispositivi: spostamento

- Lo spostamento della traversa può essere misurato tramite un trasduttore chiamato Linear Variable Differential Transformer o LVDT
- Esso è basato sul principio con cui funzionano i trasformatori elettrici ed è costituito da un avvolgimento primario sottoposto ad una tensione alternata, due avvolgimenti secondari disposti in opposizione di fase a cui capi la tensione viene misurata e da un nucleo magnetico coassiale agli avvolgimenti che si muove solidalmente al punto il cui spostamento deve essere misurato.



Apparati di misura e dispositivi: spostamento

- Quando il nucleo è in posizione centrale rispetto agli avvolgimenti secondari le tensioni nei secondari risultano uguali e opposte.
- Quando il nucleo si sposta varia la mutua induttanza di ciascun avvolgimento secondario rispetto al primario e di conseguenza il voltaggio indotto.
- Le variazioni di tensione nei due avvolgimenti in opposizione di fase si sommano e vengono misurate.
- L'incertezza dell'LVDT è dell'ordine dello 0.25%, ma la misura dello spostamento della traversa è affetta da errori dovuti all'assestamento degli afferraggi, allo slittamento del provino tra i medesimi e alla deformazione della macchina.

Apparati di misura e dispositivi: deformazione

- La misura della deformazione del provino viene effettuata in alcuni punti mediante estensimetri o estensometri meccanici o ottici.
- Gli estensometri meccanici presentano 2 coltelli che vengono posti a contatto col provino, dei quali uno è mobile o flessibile. Durante la deformazione lo spostamento del coltello mobile o la deformazione di quello flessibile vengono misurate utilizzando rispettivamente un principio analogo a quello dell'LVDT o della cella di carico.
- Gli estensometri possono essere utilizzati numerose volte, anche se sono alquanto vulnerabili poiché, a seguito della rottura del provino, possono cadere e, in alcuni casi, essere distrutti dall'attuatore
- Il costo tipico di un estensometro meccanico è dell'ordine dei 3000 €.
- Il fondo scala tipico degli estensometri meccanici è dell'ordine del 100% ($\varepsilon=1$) mentre nel caso di quelli ottici si può arrivare al 2000%. La precisione è analoga a quella di LVDT e celle di carico.



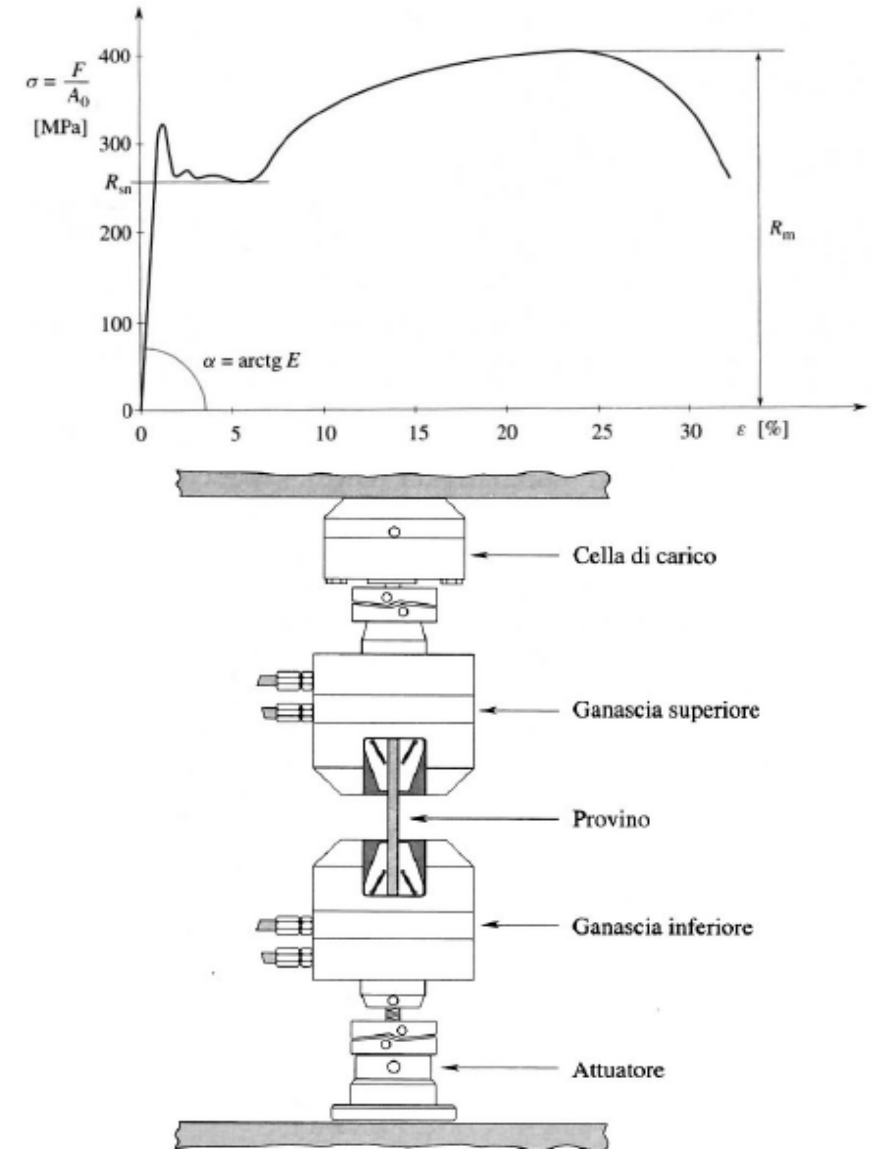
Apparati di misura e dispositivi: deformazione

- Gli estensimetri sono costituiti da una griglia di materiale dotato di resistenza elettrica posto su un supporto che viene incollato al provino.
- A seguito della deformazione la resistenza della griglia si modifica e la deformazione può essere ricavata valutando la variazione stessa di resistenza mediante un circuito tipo ponte di Wheatstone.
- La deformazione massima misurabile con un estensimetro è dell'ordine del 3-5%
- Non sono riutilizzabili e la loro installazione richiede competenza. Il costo tipico è dell'ordine dei 5 €.

TRASDUTTORI DI DEFORMAZIONE	Estensimetri	Estensometri
Precisione	1 %	*****
Fondo scala	3÷5 % 10÷20 %	100 %
Calibrazione	***	*
Installazione	*	***
Vulnerabilità	***	*
Riutilizzabile	NO	SI
Costo	5	3000

Prova di trazione

- E' il tipo più diffuso di metodo di caratterizzazione delle proprietà strutturali di un materiale. Consiste nell'applicare monoassialmente un carico di trazione lungo l'asse di un provino di forma trabeiforme (a sezione circolare, trapezoidale, rettangolare, ecc..), realizzando quindi uno stato di tensione prettamente monoassiale nella zona del provino lontana dalle ganasce (o afferraggi, morse, grips) e per valori di tensione-deformazione che non producono deformazioni plastiche tali da modificare la forma trabeiforme del provino (es. strizione plastica).
- Dalla misura del carico (mediante celle di carico) e della deformazione (mediante estensimetri o estensometri applicati nella zona centrale del provino (gauge area), si ricavano i valori per la costruzione del diagramma σ - ϵ .



Comportamento elastico di un materiale

□ L'applicazione di una forza ad una qualunque struttura crea una sollecitazione che causa deformazione.

Si definisce **sforzo** (*stress*):

$$\sigma = F/A_0$$

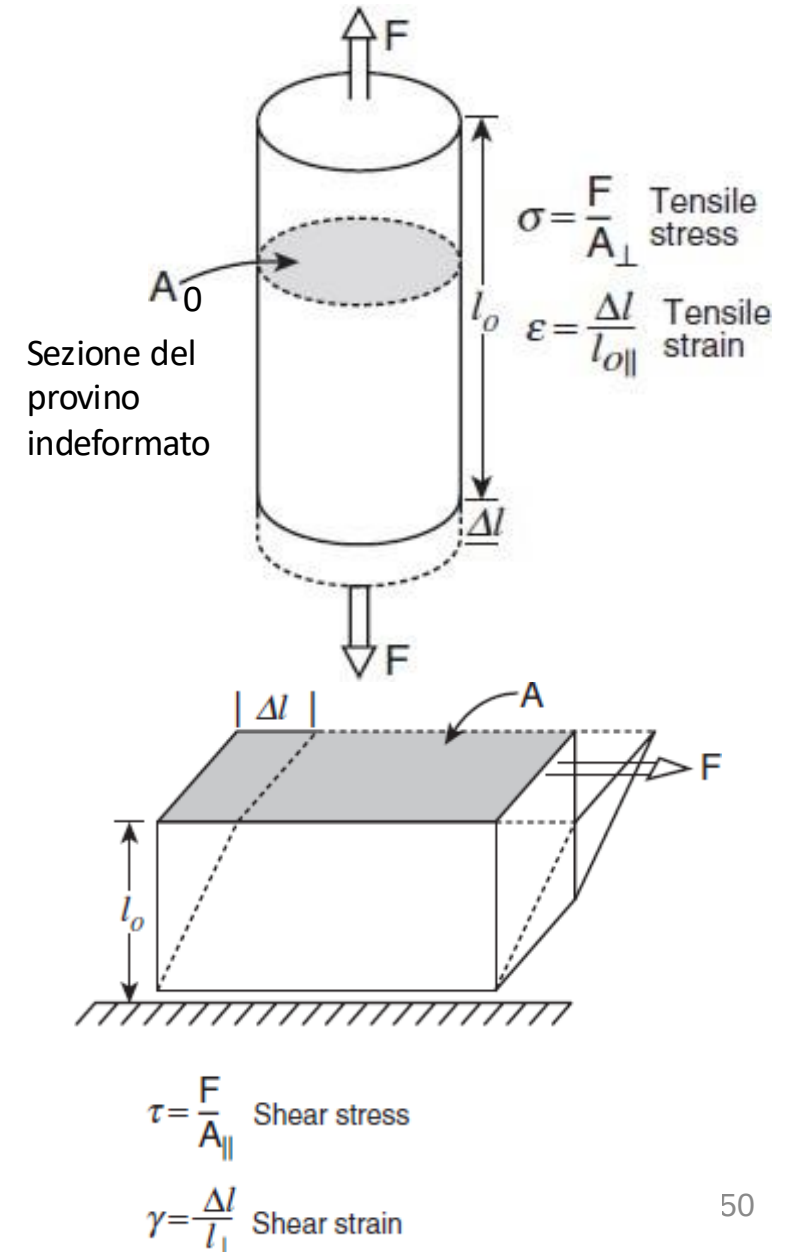
□ Esistono tre tipi di sollecitazione statica:

- **Trazione:** sollecitazione ortogonale alla superficie
- **Compressione:** sollecitazione ortogonale alla superficie
- **Taglio:** sollecitazione parallela alla superficie

□ Unità di misura: Pa = N/m² ; MPa = 10⁶ Pa

□ La **deformazione** (*strain*) dipende dalla forza applicata, dalle caratteristiche del materiale e dalla forma dell'oggetto. Si usano provini dalla forma definita (cilindrica). Essa è definita:

$$\varepsilon = (l_f - l_0)/l_0 = \Delta l/l_0$$



Sforzo nominale (σ_n)

Consideriamo un corpo di **sezione resistente A_0** e **lunghezza l_0** sottoposta ad una **forza F** , che si allunga fino a raggiungere la lunghezza l :

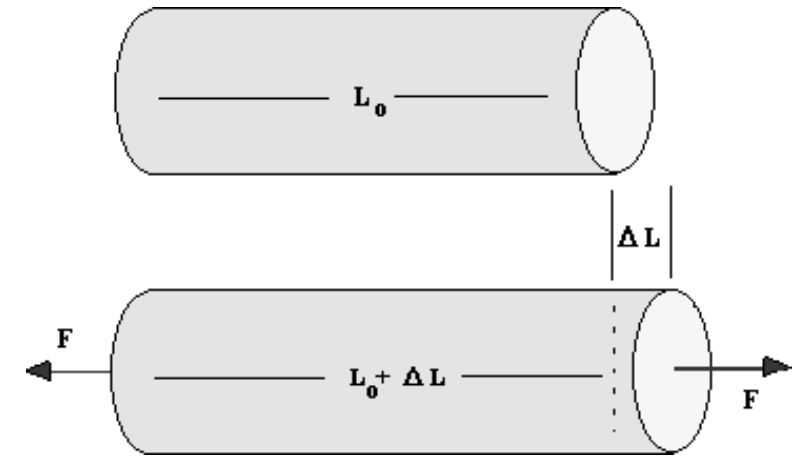
$$\text{sforzo (nominale)} = \frac{\text{forza}}{\text{sezione (iniziale)}} \quad \sigma_n = \frac{F}{A_0}$$

Unità di misura (sistema SI)

• forza	Newton	N
• sforzo	Pascal (Pa)	N/m ²
spesso...	MPa	MN/m ² o N/mm ²

Deformazione nominale (ε_n)

Consideriamo un corpo di **sezione resistente A_0** e **lunghezza l_0** sottoposta ad una **forza F** , che si allunga fino a raggiungere la lunghezza **l** , la risposta del materiale allo sforzo applicato è data da:



deformazione (nominale) =
$$\frac{\text{lunghezza finale} - \text{lunghezza iniziale}}{\text{lunghezza (iniziale)}}$$

$$\varepsilon_n = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \varepsilon_n \% = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100 = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100$$

Unità di misura (sistema SI)

- adimensionale m/m mm/mm

Allungamento e riduzione area

Allungamento percentuale:
$$L\% = \frac{L_{finale} - L_0}{L_0} \cdot 100$$

Riduzione di area percentuale:

$$A\% = \frac{A_0 - A_{fin}}{A_0} \cdot 100$$

Riduzioni anche del 50 % sono usuali negli acciai

Modulo di Poisson (ν)

Sottoponendo un materiale ad una forza lungo l'asse z , esso subisce una **deformazione positiva (allungamento) (+ ϵ_z)** lungo tale direzione ed una **deformazione negativa (contrazione)** lungo gli assi x (**- ϵ_x**) ed y (**- ϵ_y**).

Viceversa se si ha deformazione negativa lungo l'asse z (**- ϵ_z**) si ha deformazione positiva lungo gli assi x (**+ ϵ_x**) ed y (**+ ϵ_y**).

Nel caso di un solido isotropo ϵ_x ed ϵ_y sono uguali.

$$\nu = - \frac{\epsilon_{laterale}}{\epsilon_{longitudinale}} = - \frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = - \frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$

Si definisce Modulo di Poisson (ν) il rapporto invertito di segno tra la deformazione laterale (ϵ_x oppure ϵ_y) e la deformazione longitudinale (ϵ_z).

Unità di misura (sistema SI)

• adimensionale

Valori del modulo di Poisson (ν)

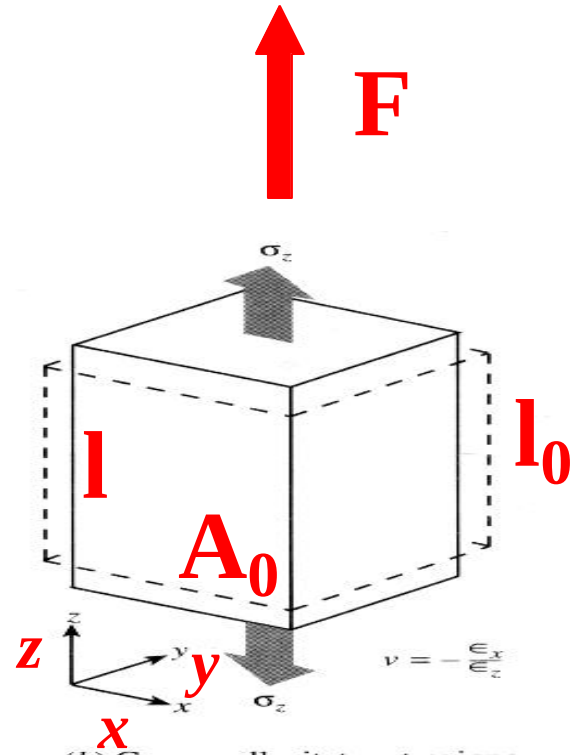
Nel caso di materiali “ideali” (deformazione senza variazione di volume) il valore di ν sarebbe 0.5.

Se $\nu < 0.5$ il corpo aumenta di volume, la contrazione laterale è minore di quella trasversale.

materiali metallici..... ν circa 0.3-0.35

materiali polimerici..... $\nu > 0.4$

elastomeri (o gomme)..... $\nu = 0.5$



(b) Corpo sollecitato a trazione

$$\sigma_n = \frac{F}{A_0}$$

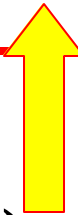
$$\epsilon_n = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$$\nu = -\frac{\epsilon_{laterale}}{\epsilon_{longitudinale}} = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$

Relazione sforzo-deformazione

Per piccole deformazioni, la deformazione è proporzionale allo sforzo applicato (**legge di Hook**).

Il coefficiente di proporzionalità è il **MODULO di YOUNG** e misura la resistenza dei materiali alla deformazione elastica per stati di sforzo di **trazione o compressione semplice**.

$$\sigma_n = E \varepsilon_n$$


σ = sforzo applicato (MPa)

ε = deformazione (adimensionale)

E = modulo elastico o di Young (MPa o GPa)

Valori del modulo di Young (E)

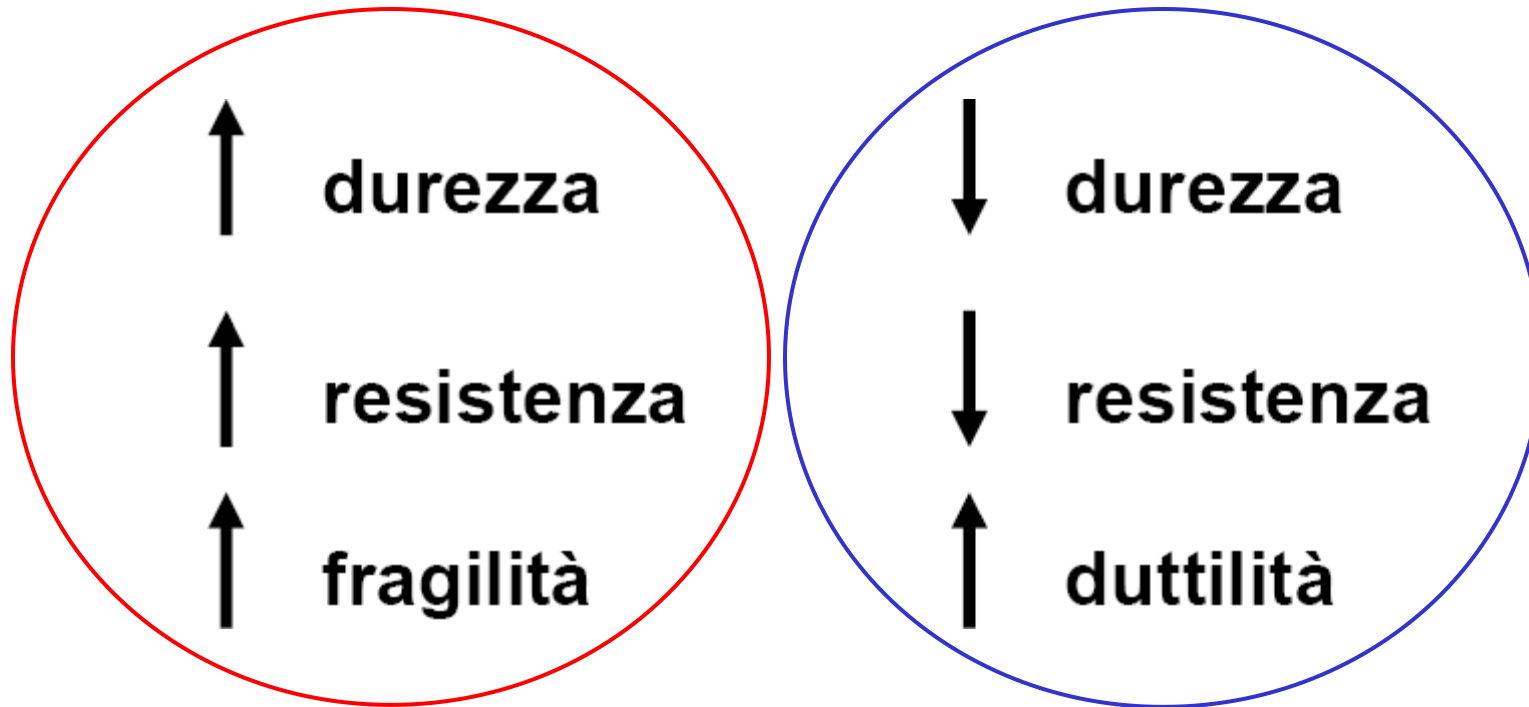
- **La deformazione** che un materiale subisce dipende dal **tipo di materiale**.

La conoscenza del valore di **E** è fondamentale per prevedere il **comportamento in esercizio di un materiale**.

- **Valori tipici di E:**

metalli.....	70-230	GPa
ceramici.....	10-400	GPa
diamante.....	1000	GPa
polimeri.....	2-8	GPa
legno.....	10-30	GPa

In generale...

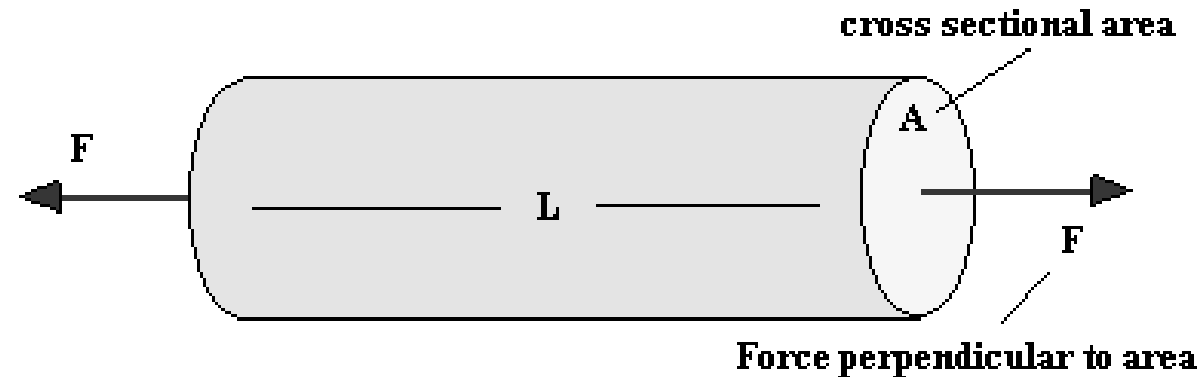


Trazione e compressione semplice

Stato di sforzo determinato da **due forze** applicate lungo la **stessa direzione, uguali ed opposte**.

TRAZIONE: il corpo tende ad allungarsi

COMPRESSIONE: il corpo tende ad accorciarsi



Taglio

Stato di sforzo determinato da una **coppia di forze (S)** che agisce in senso opposto su **due superfici parallele di area A**.

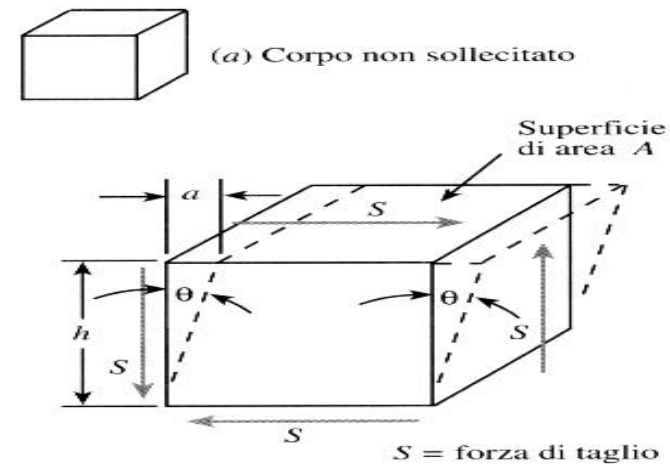
Sforzo di taglio = $\frac{\text{forza di taglio}}{\text{sezione}}$

$$\tau = \frac{Fs}{A}$$

Unità di misura (sistema SI)

• sforzo Pa N/m²

• sforzo MPa MN/m²



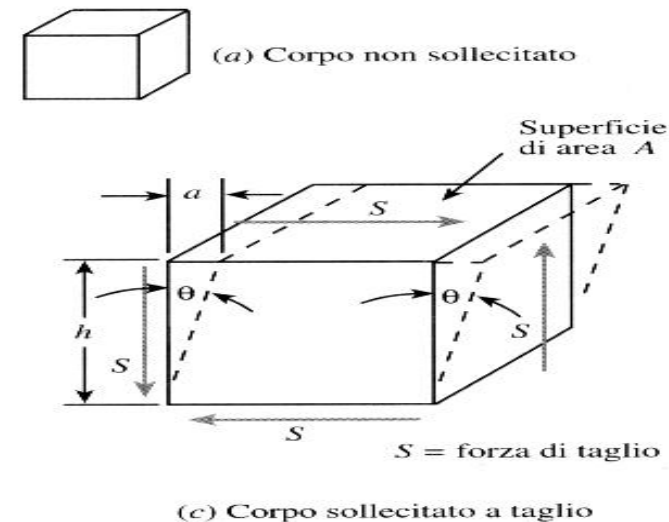
Deformazione di taglio

Il materiale soggetto ad uno sforzo di taglio si deforma spostando uno rispetto all'altro i due piani.

Il rapporto tra lo **spostamento a** che si verifica tra due piani a **distanza h** è definita **deformazione di taglio (γ)**.

$$\gamma = \frac{a}{h} = \operatorname{tg}\theta$$

θ (radianti) angolo di scostamento tra le due superfici (per angoli piccoli $\gamma = \theta$)



Unità di misura (sistema SI)

• adimensionale m/m mm/mm

Relazione sforzo-deformazione

Anche nel caso del taglio, vale, nel campo delle piccole deformazioni, la legge di Hooke che correla lo **sforzo di taglio (τ)** alla **deformazione (γ)** :

$$\tau = \mathbf{G} \gamma$$



Modulo elastico di taglio

Dipendenza dalla microstruttura

Comportamento elastico

Legge di Hooke (1678) $F = kx$

Diagrammi stress – strain

Tensile tests

Tensione – compressione

Sollecitazione al taglio

Un solido esibisce comportamento elastico se, sottoposto a sollecitazione meccanica, si deforma in maniera reversibile, proporzionalmente alla forza applicata.

La curva sforzo-deformazione risultante dipende dalle interazioni nel solido, e dalle modalità di produzione.

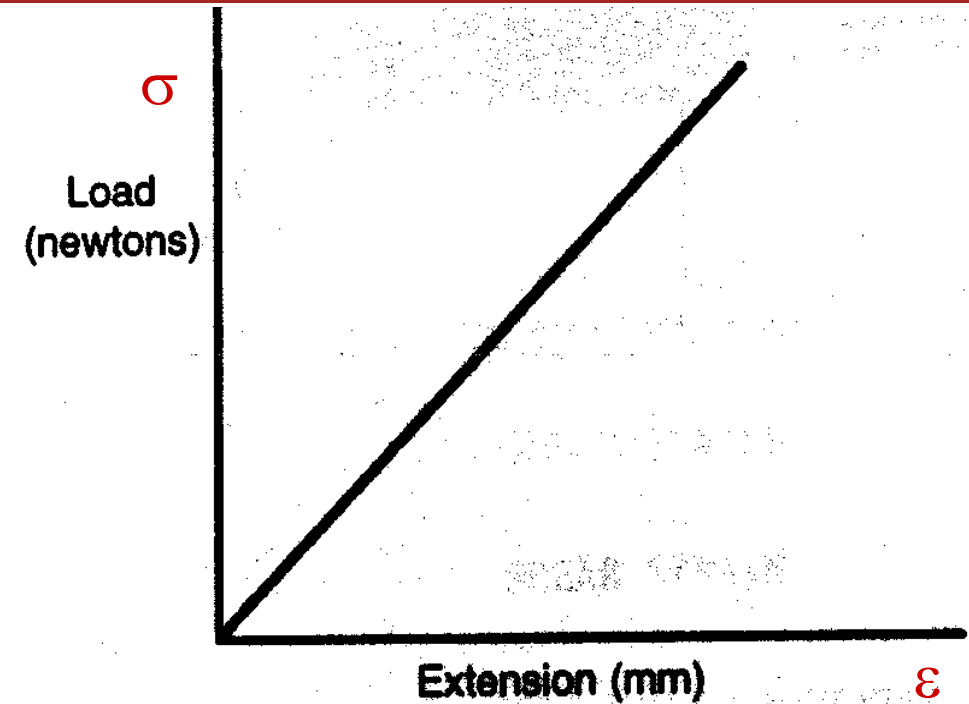


FIG. 3. Extension is proportional to load according to Hooke's law.

COMPORTAMENTO ELASTICO

$$\sigma = E \epsilon$$

$$\tau = G \gamma$$

proporzionalità tra elongazione e forza di tensione

Prova di trazione

Si usano provini cilindrici o rettangolari.

σ si misura con un dinamometro
e si corregge per la STRIZIONE.

Δl si misura con un micrometro o con
metodi più accurati.

$$\sigma = E \varepsilon$$

Modulo di
Young

$$\tau = G \gamma$$

Modulo di
taglio

E e G sono l'analogo della costante elastica di una molla.
Si misurano dal coefficiente angolare della tangente al
punto iniziale della curva σ vs ε (τ vs γ).

Si possono applicare carichi in modo da misurare
la resistenza a TORSIONE e PIEGAMENTO

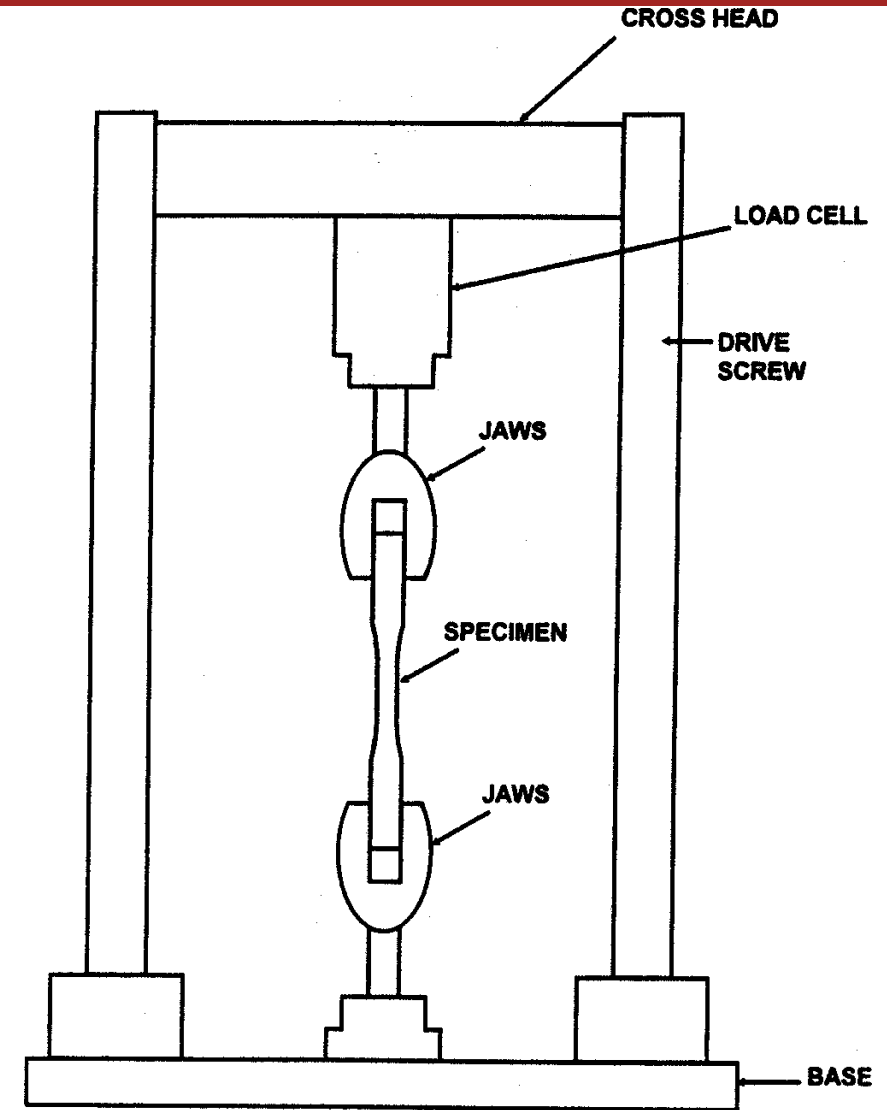


FIG. 7. Mechanical testing machine.

Comportamento elastico di un materiale

□ Se la deformazione è istantanea e indipendente dal tempo, e se una volta rimossa la forza il materiale riprende la dimensione iniziale, il comportamento è detto ELASTICO

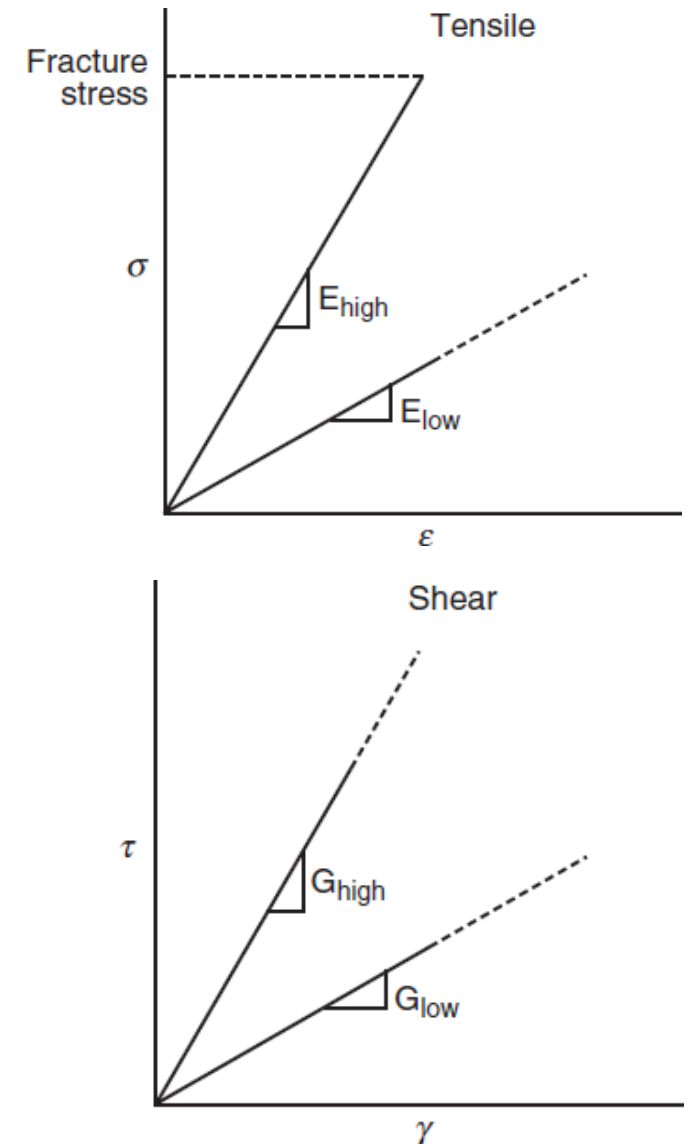
Tutti i materiali hanno, allo stato solido, un campo di deformazione LINEARE entro il quale hanno comportamento elastico

Il comportamento elastico lineare e' descritto dalla legge di HOOKE: in caso di carichi piccoli esiste proporzionalità diretta tra sforzo e deformazione

Tens. o compr.
Taglio

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$
$$\tau = G \cdot \gamma$$

E: Modulo elastico o di Young
G: Modulo di taglio

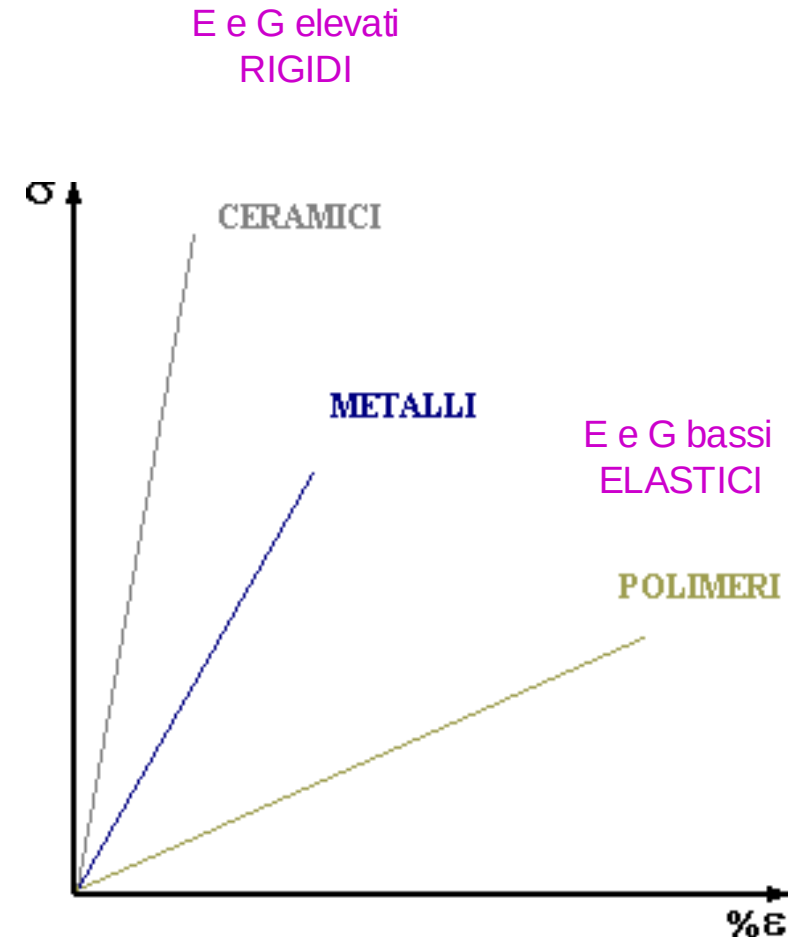


Comportamento elastico di un materiale

□ E e G sono costanti elastiche caratteristiche di ciascun materiale e sono la manifestazione macroscopica del tipo di legami interatomici

□ Le deformazioni elastiche macroscopiche derivano dalla variazione delle distanze interatomiche. **Materiali con legami molto forti** (es. diamante, ceramiche) sono poco deformabili e hanno **E e G elevati**. **Materiali con legami deboli** (es. polimeri) inter-molecolari sono deformabili e presentano **E e G bassi**. Rimossa la forza esterna gli atomi ritornano nelle posizioni di equilibrio.

□ Se i materiali sono ISOTROPI (proprietà uguali in tutte le direzioni) esiste solo un valore per E e G. Se ANISOTROPI, cioè non uguali in tutte le direzioni, (es. monocristalli, polimeri, osso, legamenti) i valori di E e G dipendono dalla direzione in cui si applica la forza.



Moduli elastici

I moduli misurano la **resistenza** del materiale **alla deformazione elastica**.

I materiali di modulo elevato sono rigidi e quindi poco deformabili: se sottoposti ad uno **sforzo** essi subiscono piccole **deformazioni**.

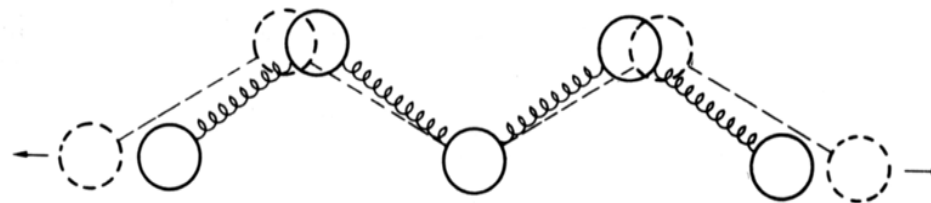
Il modulo elastico dipende dalla forza dei **legami interatomici** e dalla **struttura** del materiale.

Comportamento elastico

Le **forze** che tengono uniti gli atomi (**legami interatomici**) agiscono come piccole **molle**.

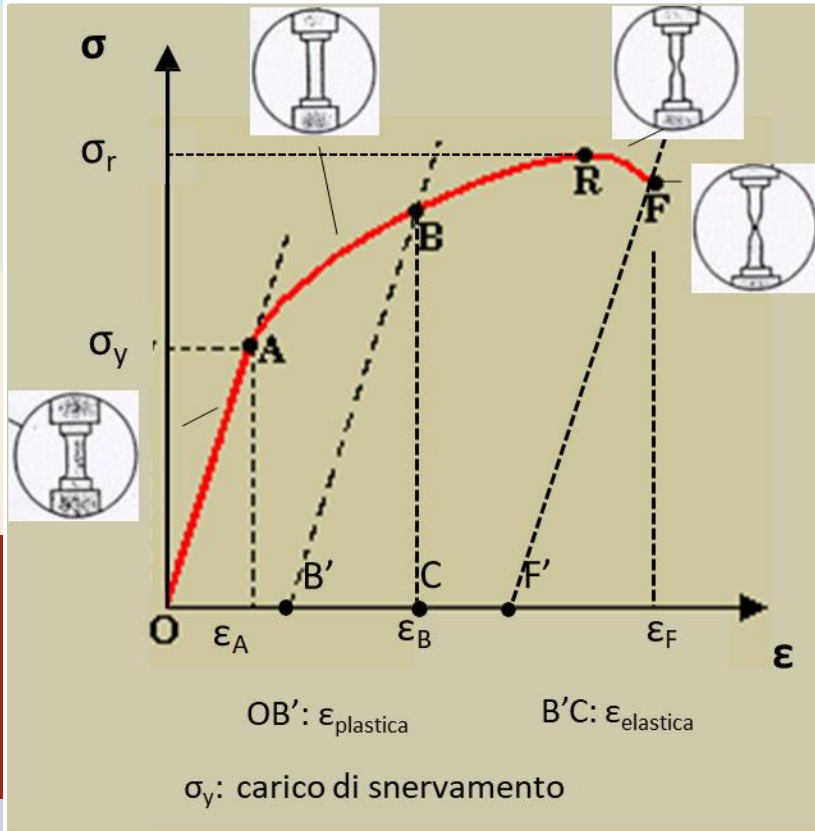


La **struttura** è determinata dalla **(1) disposizione degli atomi** e **(2) dal numero di legami per unità di volume**.



Prova di trazione

Curva sforzo/deformazione per un metallo



La prova di trazione deforma il provino a velocità costante, tramite un carico di trazione ortogonale alla sua sezione.

Si costruiscono i **diagrammi σ vs ϵ (stress-strain)**.

CAMPO ELASTICO (OA). All'inizio, quando il carico è basso, il materiale si allunga elasticamente, e può riprendere la sua lunghezza originaria se il carico scompare.

CAMPO PLASTICO (ABR). Oltre A il provino si deforma plasticamente, se viene tolto il carico in B il provino si scarica e mantiene a riposo una *deformazione plastica permanente* ϵ_B . In questo modo parte dell'energia di deformazione, quella relativa alla deformazione (B'C), è restituita (triangolo BCB'), e la restante è dissipata plasticamente (area OABB').

La deformazione plastica inizialmente è uniforme, il materiale diventa più resistente, lo stress per Deformarlo cresce fino ad un valore massimo σ_r (carico massimo sopportabile), che misura la resistenza a trazione.

STRIZIONE (RF). In R si ha una localizzata e Significativa riduzione della superficie resistente.

ROTTURA (F). Dopo la strizione si forma una cricca che romperà il provino in corrispondenza dello stress di rottura σ_F

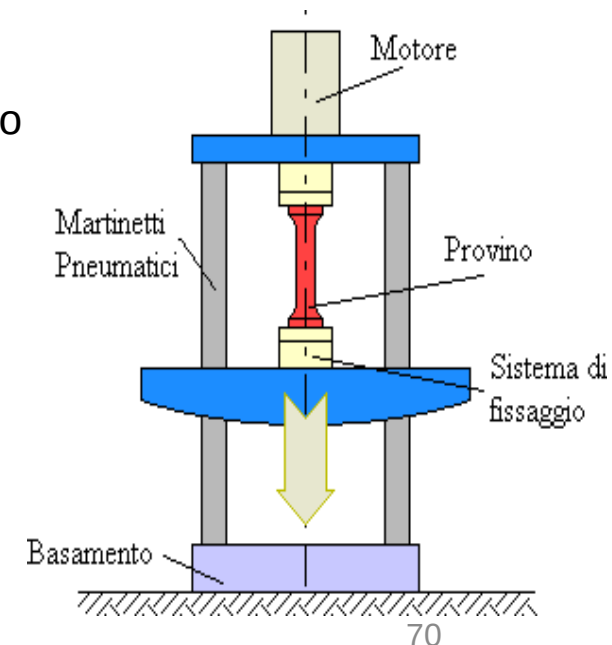


Diagramma sforzo-deformazione

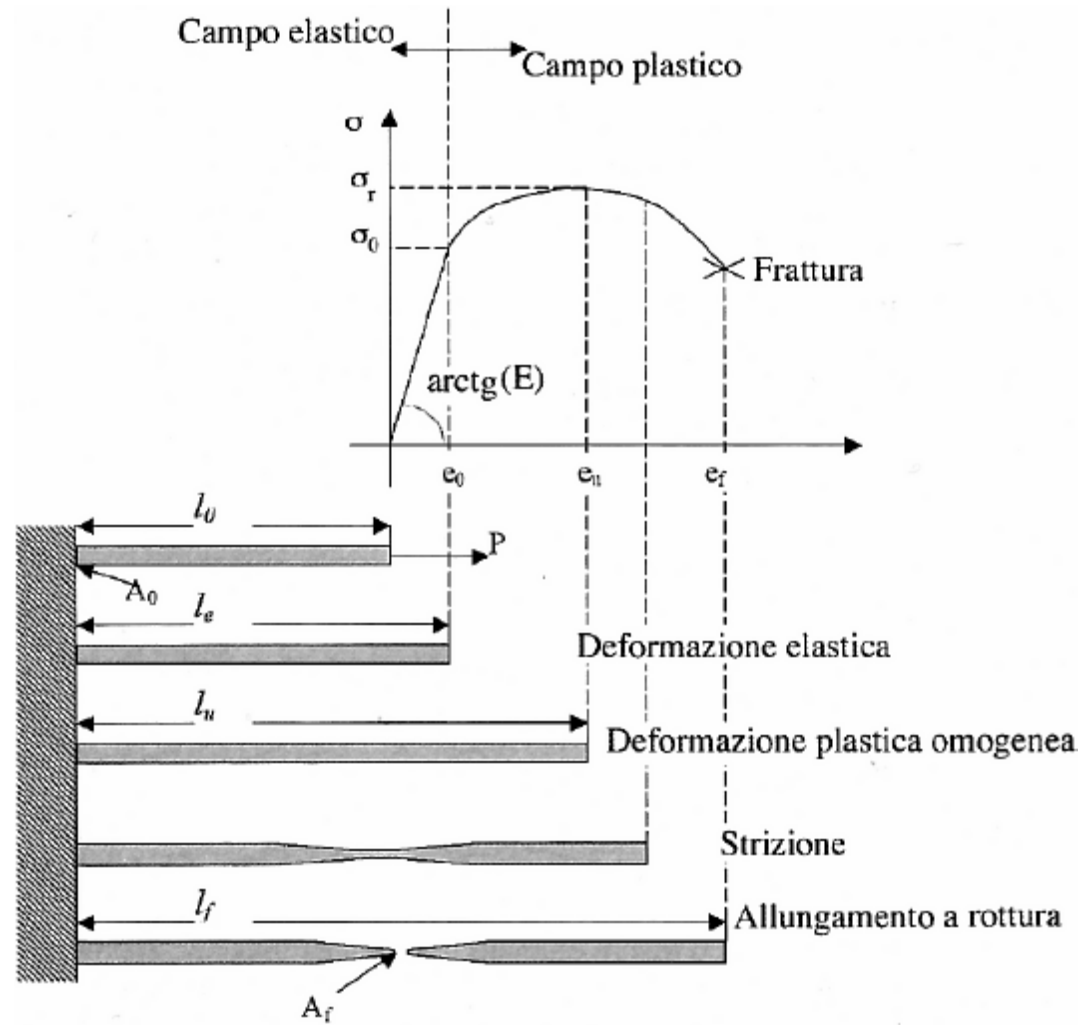


Diagramma sforzo-deformazione

ULTIMATE TENSILE STRENGTH

Carico massimo sopportabile dal materiale

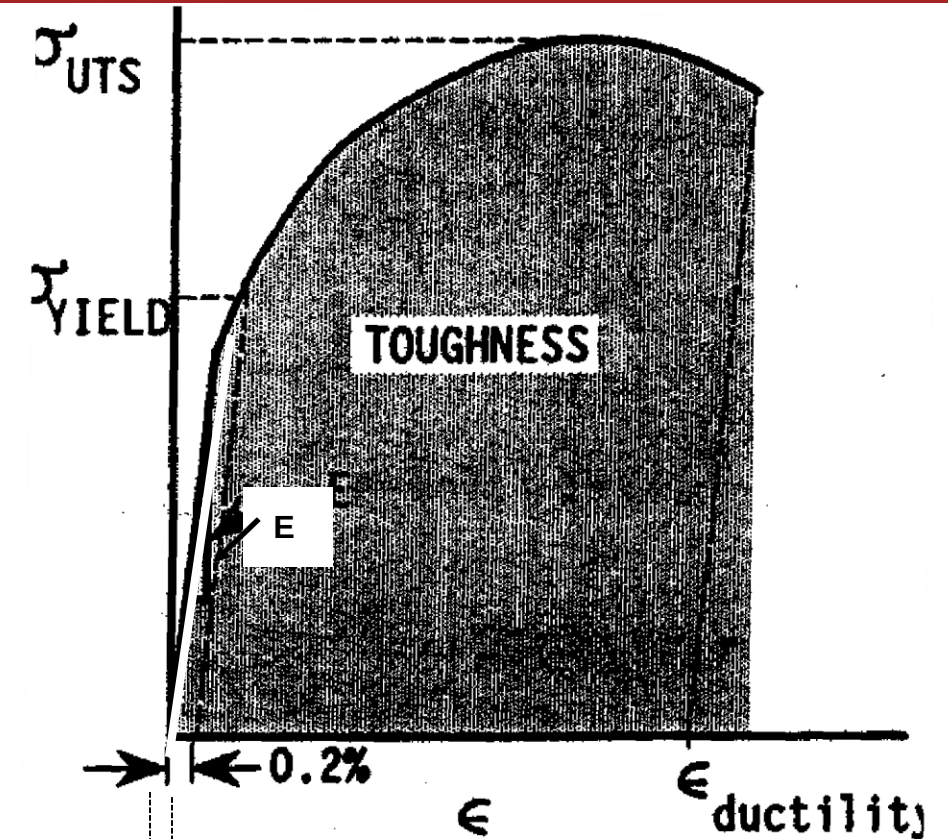
YIELD STRENGTH

Sforzo di snervamento, stress al quale il materiale si deforma (elasticamente) dello 0.2 %.

Aumenta se: si riducono le dimensioni dei grani e se il materiale è lavorato a freddo.

TENACITA' E' il lavoro necessario per la deformazione (J/m³).

DUTTILITA' E' l'elongazione totale permanente del materiale al momento della frattura.



8. Stress versus strain for a ductile material.

Deformazione elastica.
REVERSIBILE ($\epsilon < 0.2\%$).

Deformazione plastica. IRREV.
Spostamento su larga scala di
atomi. Avviene nei metalli e nei
polimeri a $T > T_g$.

Parametri che influenzano la prova di trazione

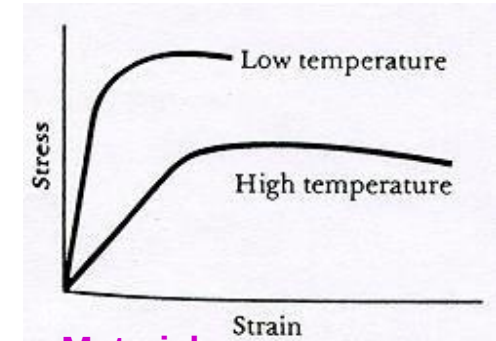
❑ TEMPERATURA. In particolare σ_y , σ_r ed E diminuiscono all'aumentare di T , mentre la deformazione al momento della rottura aumenta con T .

❑ TIPO DI MATERIALE. Al contrario dei materiali **duttili**, quelli **fragili** (brittle) possono presentare una piccola deformazione plastica prima della rottura: nella loro curva sforzo-deformazione σ_r coinciderà con σ_f e, nei casi estremi (come per i materiali ceramici), anche con σ_y

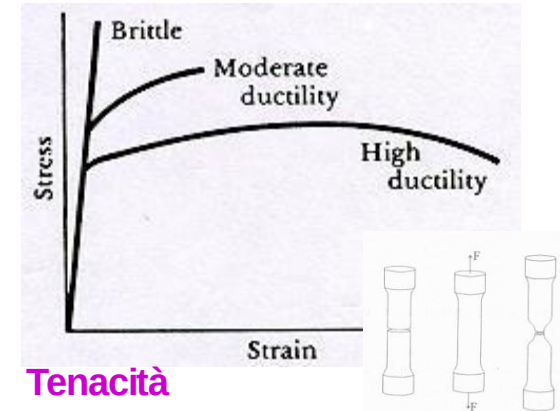
❑ La **tenacità** (toughness) quantifica la capacità di un materiale di assorbire energia sino alla rottura; il suo valore è pari all'area sottesa dalla curva $\sigma - \epsilon$ sino alla rottura, e si misura in J/m^3 . Affinché un materiale sia tenace, esso deve essere sia resistente sia duttile, quindi i materiali duttili sono più tenaci di quelli fragili (Area $AB'C' \gg$ Area ABC). Aumenta con T .

❑ La **duttilità** è la massima deformazione plastica prima della rottura ($\epsilon_{F'}$). Aumenta con T .

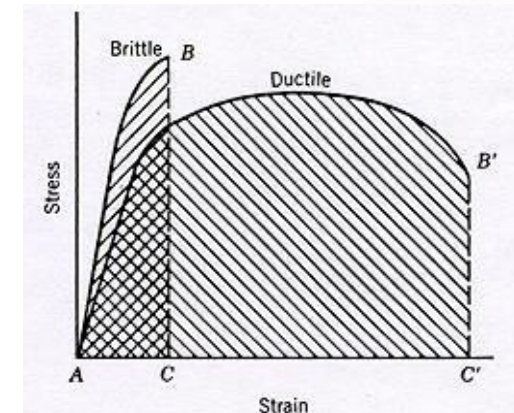
Temperatura



Materiale



Tenacità



Duttilità e fragilità

MATERIALI DUTILI

- ✓ Presentano rottura associata ad alti valori di deformazione
- ✓ Assorbono una buona quantità di energia prima di fratturarsi
- ✓ Presentano una rilevante deformazione plastica
- ✓ L'aspetto della frattura è fibroso

MATERIALI DUTILI

- ✓ Il meccanismo di rottura è dominato dallo scorrimento
- ✓ La rottura produce una grande quantità di calore

MATERIALI FRAGILI

- ✓ Presentano rottura per bassi valori di deformazione
- ✓ Assorbono una scarsa quantità di energia prima di fratturarsi
- ✓ La deformazione plastica è così ridotta che si possono quasi ricongiungere i pezzi rotti riprendendo forma originale

MATERIALI FRAGILI

- ✓ L'aspetto della rottura presenta una serie di faccette quasi lucide
- ✓ Il meccanismo di rottura è dominato dal clivaggio (distacco)
- ✓ La rottura avviene in modo improvviso

Duttilità e fragilità

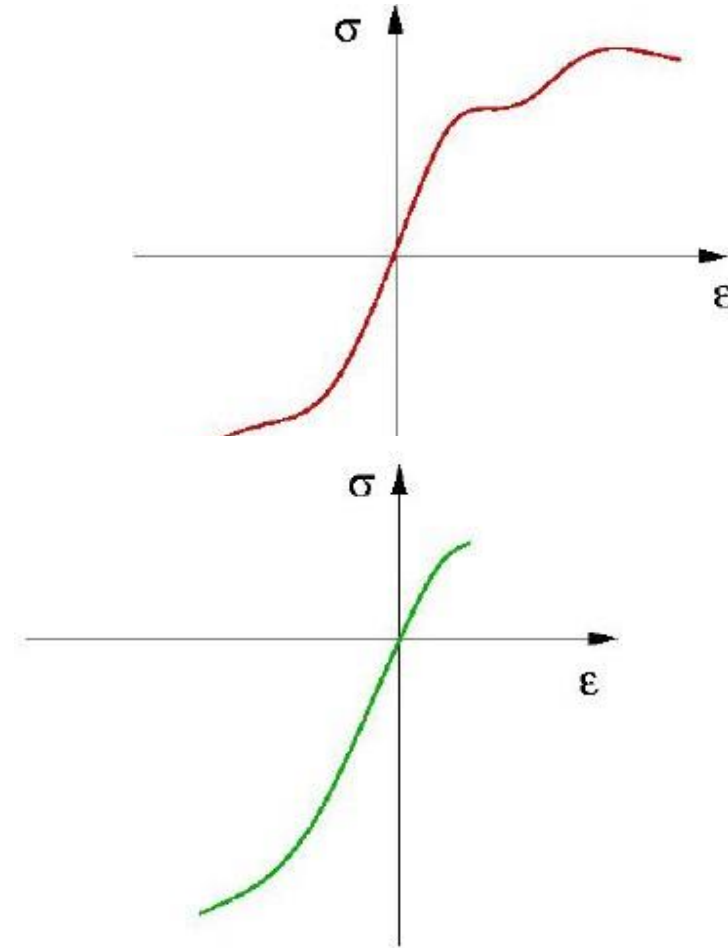
Due tipi di rottura:

Duttile: avviene dopo che si sono sviluppate considerevoli deformazioni plastiche (metalli).

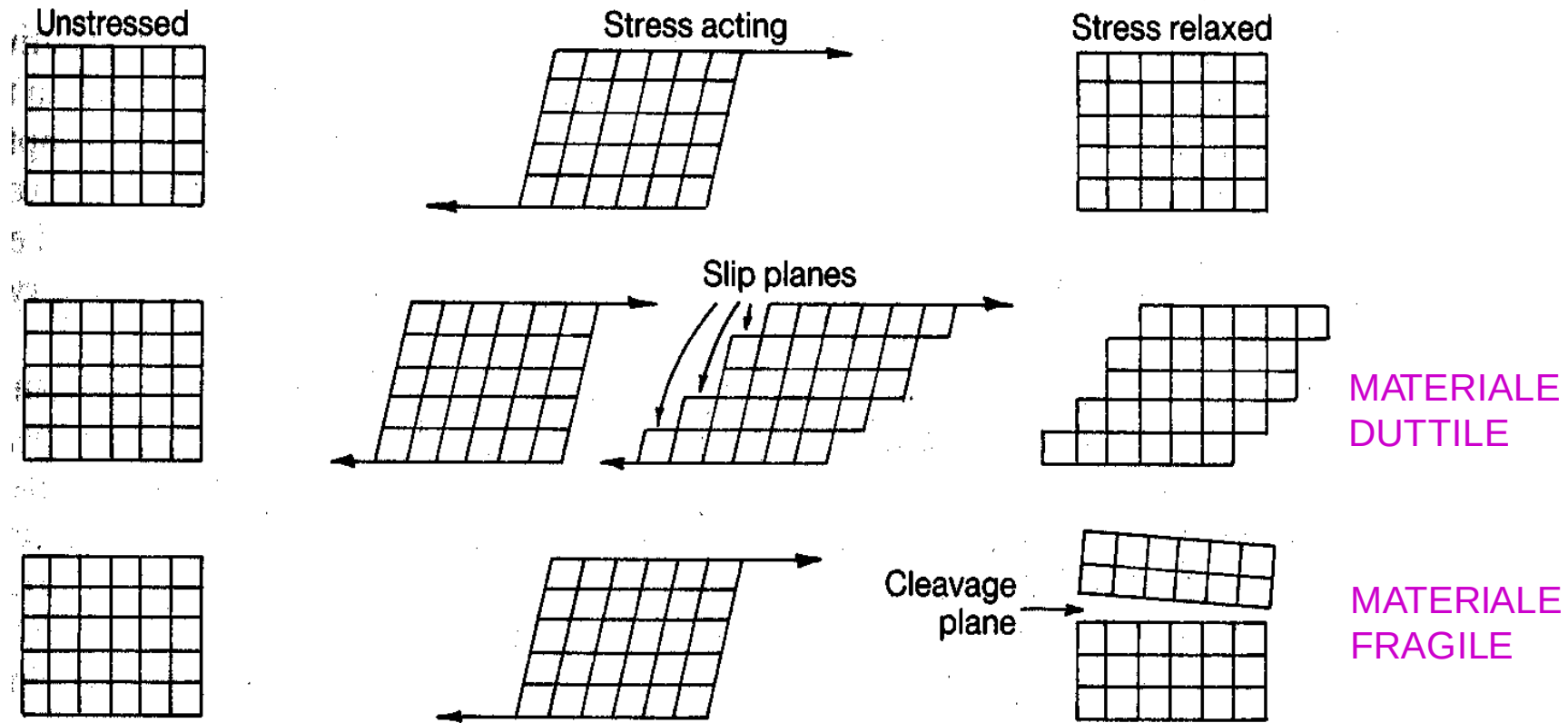
Il comportamento a trazione e a compressione è simmetrico.

Fragile: avviene immediatamente a seguito dell'esaurimento delle risorse elastiche.

In genere il comportamento a compressione è molto diverso da quello a trazione.



Duttilità e fragilità



Grazie ai difetti di linea (dislocazioni), si può avere lo slittamento relativo di due parti del reticolo. Il movimento delle dislocazioni avviene progressivamente per successiva rottura e riformazione dei legami, un filare per volta.

La deformazione non avviene per spostamento contemporaneo di tutta una parte del reticolo, ma si propaga al suo interno lungo un determinato PIANO DI SCORRIMENTO, per azione di uno sforzo di taglio sufficiente a rompere i legami sullo spigolo della dislocazione. Maggiore è il numero di dislocazioni presenti nel reticolo, maggiori sono le possibilità di scorrimento, quindi di deformazione.

Duttilità e fragilità

La **duttilità**, in particolare, rende i materiali metallici **poco fragili**, pertanto, nel caso in cui si superi il **carico di snervamento**, non si arriva generalmente alla **rottura**, ma solo alla **deformazione plastica** della struttura.



Duttilità e fragilità

- La duttilità viene quantificata mediante la deformazione al momento della rottura:

$$\varepsilon_r = \frac{L_r - L_0}{L_0}$$

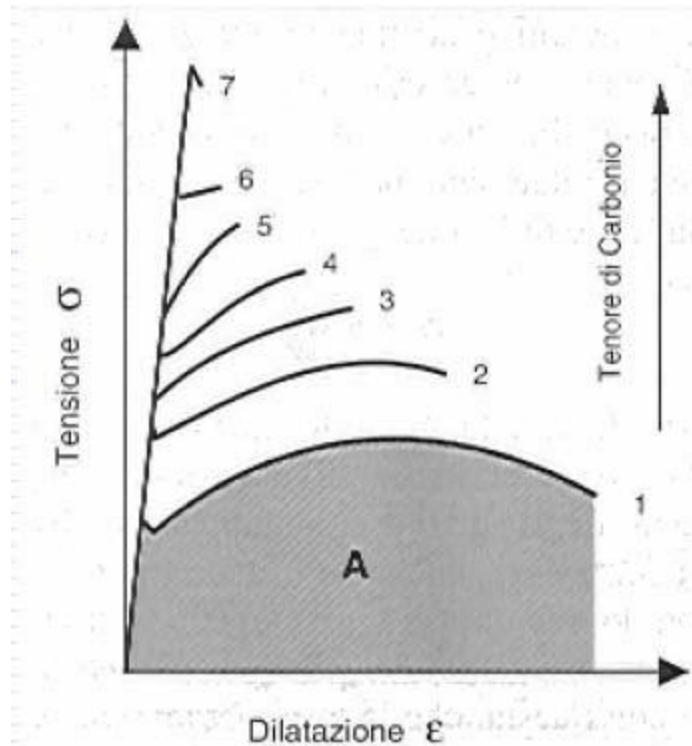
- Usualmente si ammette che al di sotto del 5% di allungamento il materiale sia fragile, al di sopra duttile
- Una misura alternativa della duttilità è data dalla riduzione percentuale della sezione, chiamata %RA:

$$\%RA = 100 \frac{A_0 - A_r}{A_0} = 100 \frac{d_0^2 - d_r^2}{d_0^2}$$

- L'analoga grandezza misurata mediante una prova di compressione viene definita *malleabilità*

Esempio

Per esempio per gli acciai Uno dei parametri chimici che più influenzano il comportamento strutturale degli acciai è il **tenore di carbonio**, aumentandolo l'acciaio diventa più *duro* (si alza la tensione di snervamento e diminuisce il rapporto snervamento / rottura)



Curve sforzo-deformazione per materiali diversi

❑ **POLIMERI** sono costituiti da lunghe catene aggrovigliate di unità monomeriche ripetute all'infinito.

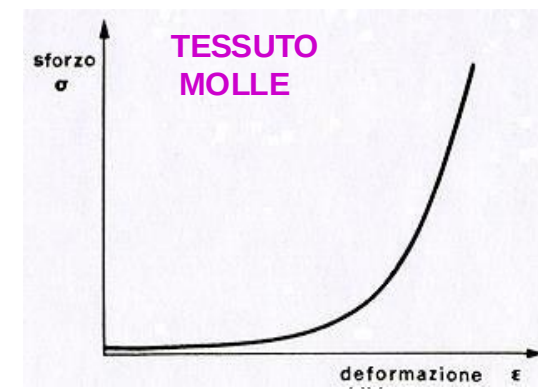
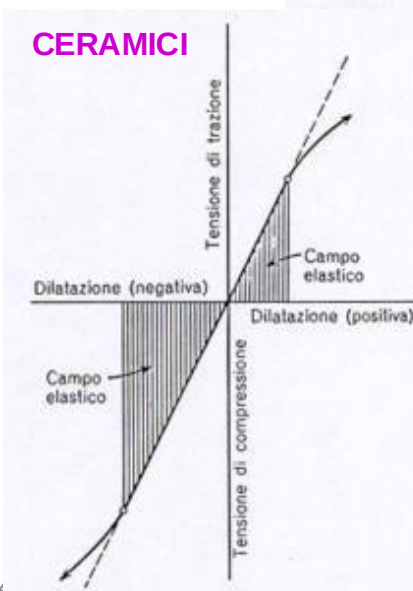
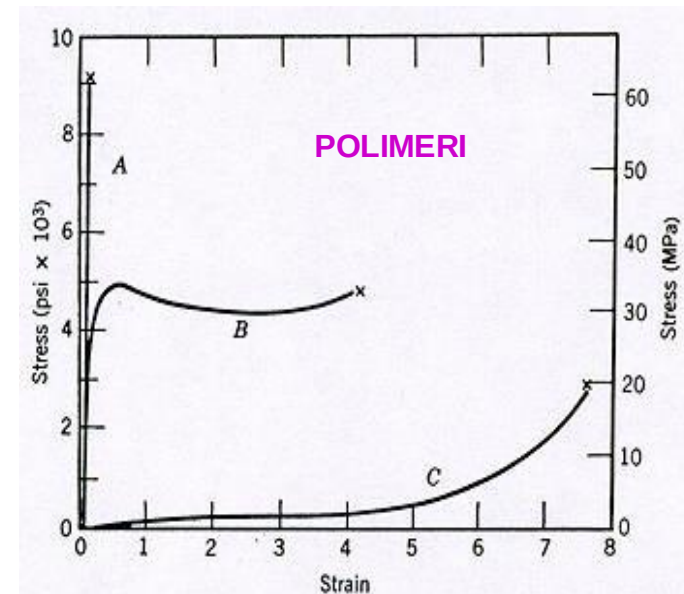
fragili (A) si rompono mentre si deformano elasticamente;

plastici (B) la iniziale deformazione elastica è seguita da snervamento e da deformazione plastica;

elastici (C) sono **elastomeri**, cioè si allungano fino a alcune volte la lunghezza originaria, poi tornano alla dimensione iniziale.

❑ **CERAMICI**. Sono cristallini e hanno comportamento tipicamente **fragile**, e presentano solo deformazione elastica (relazione lineare $\sigma - \epsilon$) se sottoposti a trazione o a compressione, fino a rottura. Mentre la resistenza a trazione è bassa e imprevedibile, quella a compressione può raggiungere valori elevati.

❑ **TESSUTI BIOLOGICI MOLLI**. Presentano un particolare comportamento elastico tale da permettere loro di resistere anche quando severamente deformati.



Deformazioni e tensioni reali

- La tensione reale (*true stress*) è definita semplicemente dal rapporto tra la forza applicata e l'area della sezione corrente (deformata) del provino A:

$$\sigma_R = F/A$$

- La tensione reale risulta generalmente maggiore di quella nominale (*engineering stress*) poiché generalmente è $A < A_0$ a causa della strizione. Sperimentalmente si osserva, inoltre, che la tensione reale cresce sempre durante la prova.

Deformazioni e tensioni reali

- Le deformazioni nominali sono valori medi rispetto alla lunghezza di riferimento e, per la loro valutazione, l'allungamento complessivo ΔL viene riferito alla lunghezza iniziale L_0 .
- L'allungamento complessivo ΔL può essere visto come la somma di incrementi istantanei di lunghezza dL_i ciascuno dei quali avviene mentre il provino ha lunghezza istantanea L_i maggiore di quella iniziale.
- La deformazione reale istantanea è data dal rapporto dL_i/L_i e la deformazione totale all'istante i -esimo è data dall'integrale di tale rapporto tra la configurazione iniziale e quella nell'istante considerato:

$$\varepsilon_R = \int_{L_0}^L \frac{dL_i}{L_i} = \ln \frac{L}{L_0} \quad \xrightarrow{L=L_0+\Delta L} \quad \varepsilon_R = \ln(\varepsilon + 1)$$

Deformazioni e tensioni reali

- In campo elastico le tensioni e deformazioni reali risultano praticamente coincidenti, mentre in campo plastico le deformazioni reali ottenute sono inferiori a quelle nominali.
- È bene notare che la relazione precedente è utilizzabile solo in assenza di strizione, perché nella definizione di deformazioni reali devono essere introdotti gli allungamenti locali della sola zona soggetta a deformazione e non quelli relativi a tutta la lunghezza utile del provino.
- Le deformazioni reali nei materiali duttili risultano maggiori di quelle nominali.

Deformazioni e tensioni reali

- Poiché gli allungamenti reali nella zona deformata sono difficili da misurare è spesso necessario sfruttare la costanza del volume del materiale in campo plastico.
- Trascurando le modeste variazioni di volume dovute alla deformazione elastica, la costanza del volume del provino può essere espressa dalla seguente relazione: $A_0 L_0 = AL$
- $A = A_0 L_0 / L$
- Da cui

$$\sigma_R = \sigma (\varepsilon + 1)$$

$$\varepsilon_R = \ln A_0 / A = \ln d_0 / d$$

Resilienza – Tenacità a trazione

- L'energia totale di deformazione immagazzinata nel volume V del provino nell'istante i di prova (pari al lavoro compiuto dalla forza applicata) è data dalla seguente espressione:

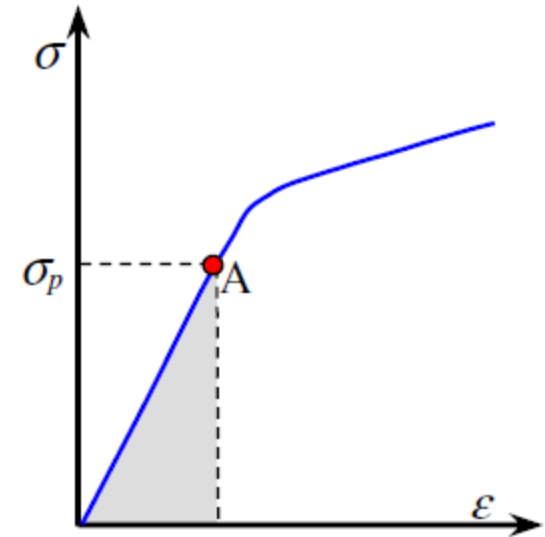
$$U_i = \int_V \int_0^{\varepsilon_i} \sigma d\varepsilon dV \approx V \int_0^{\varepsilon_i} \sigma d\varepsilon$$

- In campo elastico esso è pari al lavoro compiuto dalla forza applicata sul provino, mentre in campo plastico una grande quantità di questo lavoro è dissipato in forma di calore.

Resilienza – Tenacità a trazione

- La resilienza è la capacità di assorbire energia nel campo elastico. Il modulo di resilienza è l'energia di deformazione ad unità di volume immagazzinata nel materiale quando la tensione è al limite di proporzionalità; ponendo $V=1$, $\sigma = \sigma_p$ e considerando che in campo elastico $\varepsilon_p = \sigma_p/E$ si ottiene:

$$U_p = \frac{\sigma_p^2}{2E}$$



Resilienza – Tenacità a trazione

- La tenacità a trazione (da non confondere con la tenacità a frattura) è la capacità di assorbire energia prima della rottura. Essa si quantifica misurando l'energia di deformazione totale alla rottura rappresentata da tutta l'area sottesa dalla curva σ - ϵ .
- Se la curva è tendenzialmente piatta dopo il valore di snervamento, come accade per i materiali duttili, una buona approssimazione dell'energia è data da questa espressione:

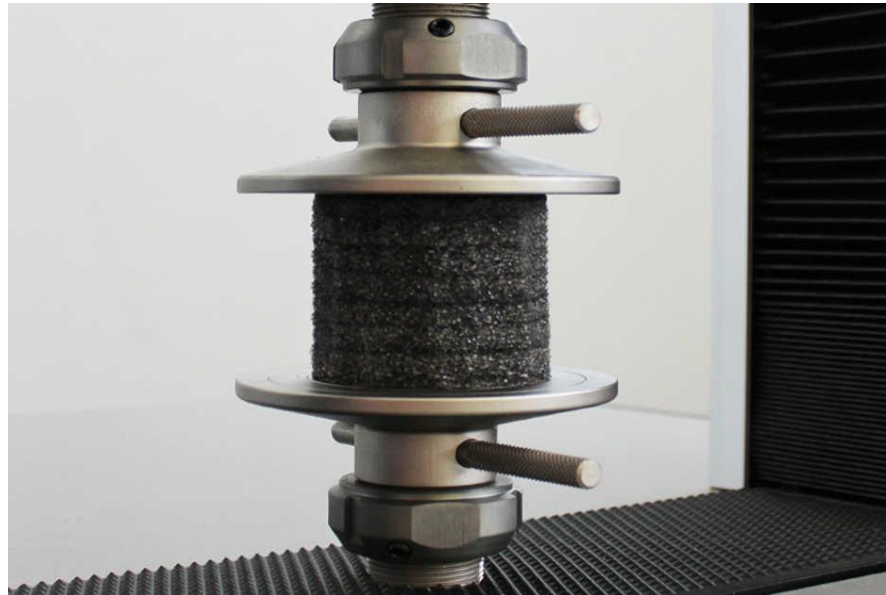
$$U_{ten} = \frac{\sigma_s + \sigma_r}{2} \epsilon_r$$

- In materiali fragili per i quali la curva ha un andamento parabolico si può utilizzare la seguente espressione:

$$U_{ten} \approx \frac{2}{3} \sigma_r \epsilon_r$$

Prova di compressione

- Vari materiali impiegati nella costruzione di elementi meccanici hanno proprietà differenti se sottoposti a trazione o a compressione.
- Tipicamente i materiali fragili hanno un carico di rottura a compressione nettamente superiore a quello di trazione.
- Le tensioni di trazione tendono a fare propagare le discontinuità nel materiale (fratture, difetti) mentre quelle di compressione tendono a chiuderle.



Prova di compressione

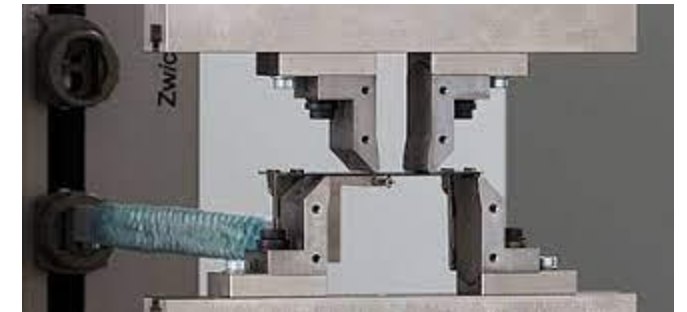
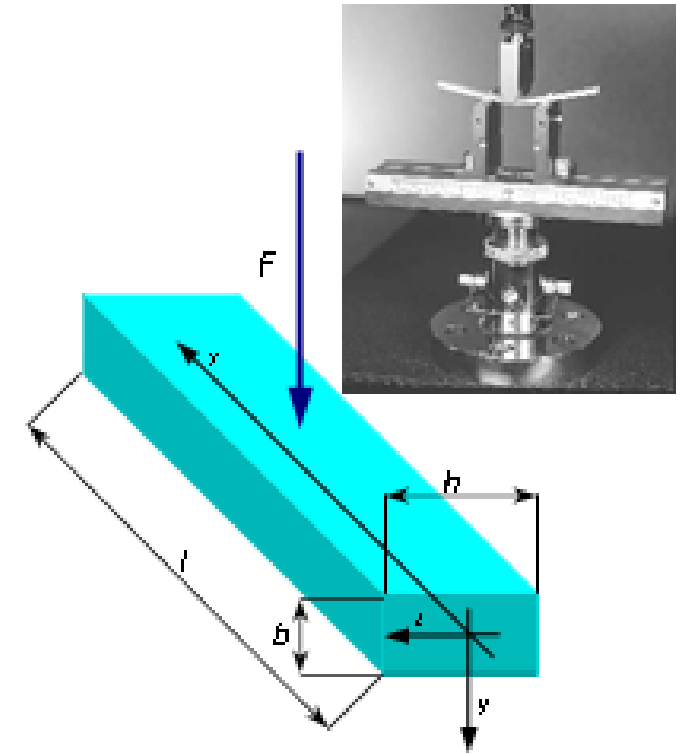
- I provini di compressione hanno geometrie diverse da quelli di trazione, infatti, se il provino é troppo lungo si può indurre una flessione spuria o si può verificare un caso d'instabilità, se é corto, l'attrito alle estremità può rendere lo stato di tensione più complesso di quello monoassiale necessario per la determinazione della curva sforzo-deformazione.
- Il compromesso migliore si raggiunge con provini cilindrici con rapporto $l/d \cong 3$.

Prova di compressione

- Nel caso di materiali duttili la tensione di rottura in compressione non può essere determinata poiché nella regione plastica l'incremento della superficie diminuisce notevolmente la tensione agente a parità di carico applicato.
- All'aumentare del carico il materiale si schiaccia e tende a ridursi ad un disco piatto; a differenza della trazione, non vi é un valore di tensione ben definito nel quale si ha una variazione di sezione.
- I risultati delle prove sono rappresentati da un diagramma tensione-deformazione in modo simile alle prove di trazione. Le prove di trazione e compressione devono essere eseguite separatamente, diversamente si assume che il materiale ha la stessa resistenza nei due casi.

Prova di flessione

- La prova di flessione permette di determinare il modulo di Young e stimare la tensione di rottura di materiali fragili; tale tensione deve essere indicata come tensione di rottura a flessione σ_{rf} .
- Nella prova a tre punti i provini vengono vincolati con due appoggi nella parte inferiore e caricati al centro da un cuneo solidale alla traversa mobile della macchina.
- Nella prova a quattro punti la traversa mobile spinge due cunei disposti simmetricamente rispetto alla mezzeria del provino. Nel corso della prova si misurano lo spostamento della traversa Y , coincidente con la freccia in mezzeria, e il carico applicato F .



Prova di flessione

- La prova di flessione presenta i seguenti vantaggi:
 - semplicità d'afferraggio ed esecuzione,
 - semplice geometria del provino generalmente a sezione rettangolare,
 - spostamenti ampi di misurazione più precisa.
- Poiché la tensione varia linearmente lungo lo spessore, lo snervamento viene raggiunto inizialmente solo in un sottile strato superficiale; superato il campo elastico, inoltre, gli spostamenti misurati non possono essere utilizzati per calcolare le deformazioni e l'unica informazione utile è la forza a rottura F_r .

Prova di flessione

- La prova di flessione risulta, quindi, poco sensibile per la determinazione dell'inizio dello snervamento ed è adatta alla caratterizzazione di materiali fragili con comportamento lineare.
- La geometria del provino è descritta dai seguenti parametri:
 - l =lunghezza utile (la parte tra gli appoggi),
 - b =larghezza della sezione,
 - h =altezza della sezione.
- La tensione massima agisce in mezzzeria sulla superficie del lato teso ($x=l/2$, $y=h/2$). Nel caso di flessione a tre punti essa può essere espressa mediante la formula di Navier come segue:

$$\sigma = \frac{h}{2} \frac{M}{I} = \frac{h}{2} \frac{Fl/4}{bh^3/12} = \frac{3}{2} \frac{l}{bh^2} F$$

Prova di flessione

- La deformazione massima, a sua volta, può essere espressa in funzione della freccia nel seguente modo

$$\varepsilon = 6 \frac{h}{l^2} Y \qquad Y = \frac{1}{4} \frac{l^3}{b h^3} \frac{F}{E}$$

- Il modulo di Young potrebbe essere valutato con una qualsiasi coppia di valori F , Y misurati in campo elastico mediante la seguente relazione

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{1}{4} \frac{l^3}{b h^3} \frac{F}{Y}$$

Prova di flessione

- Una migliore precisione può essere ottenuta utilizzando due punti sperimentali nel seguente modo:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{1}{4} \frac{l^3}{b h^3} \frac{\Delta F}{\Delta Y}$$

- In particolare, utilizzando i punti $F_1 = F_r/10$, Y_1 e $F_2 = F_r/2$, Y_2 si ottiene:

$$E = \frac{1}{4} \frac{l^3}{b h^3} \frac{F_r/2 - F_r/10}{Y_2 - Y_1} \quad \text{da cui} \quad E = \frac{1}{10} \frac{l^3}{b h^3} \frac{F_r}{Y_2 - Y_1}$$

Prova di flessione

- Le formule precedenti possono essere riscritte utilizzando la pendenza K della retta $F(Y)$ che descrive l'andamento del carico in funzione della freccia in campo elastico $K=F/Y=\Delta F/\Delta Y$ ottenendo:

$$E = \frac{1}{4} \frac{l^3}{b h^3} K$$

- Questa relazione permette di calcolare E nel caso in cui K può essere stimato dai dati sperimentali $F-Y$ nella zona lineare, ad esempio mediante una regressione lineare.

Prove di durezza

- La durezza è l'attitudine degli strati superficiali di un materiale a resistere all'indentazione (creazione di una impronta sulla superficie), alla scalfittura, all'abrasione e alla deformazione per compressione.
- La durezza si determina creando un'impronta sulla superficie del materiale mediante un elemento penetratore (indentatore), che viene pressato ortogonalmente alla superficie in modo statico con un valore di carico F prefissato, e misurando una dimensione caratteristica dell'impronta stessa.
- Esistono vari metodi (Brinell, Rockwell, Vickers e Knopp) che si differenziano per la forma del penetratore e per il modo di misurare l'impronta. Le prove di durezza non sono distruttive e possono essere eseguite direttamente sul componente.

Durezza Brinell

- La prova di durezza Brinell viene effettuata con una sfera con diametro $D=10\text{mm}$ e carichi F pari a 500, 1500 o 3000 Kg applicati per un periodo superiore a 15 sec.
- La durezza Brinell Hb è espressa con un numero risultante dal rapporto tra il carico e l'area dell'impronta costituita da un segmento di sfera di diametro d in millimetri, ottenuto mediante la seguente equazione:

$$HB = \frac{2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

- può essere usato per ottenere una stima della resistenza a trazione degli acciai o delle ghise; rispettivamente si ha (tensioni in MPa):

$$\sigma_r = 3.1Hb$$

$$\sigma_r = 1.58Hb - 86$$

Durezza Rockwell

- La prova di durezza Rockwell viene effettuata con due diversi tipi di indentatori e vari valori di forza. Le combinazioni danno luogo a diverse scale di misura e i valori ottenuti possono essere confrontati solo se appartengono alla stessa scala.
- La grandezza che viene misurata nella prova Rockwell è la profondità di penetrazione h determinata come differenza tra l'affondamento h_1 ottenuto ad un valore di carico iniziale, detto carico minore pari a 10kg, e l'affondamento h_2 ottenuto al carico di prova finale, detto carico maggiore.
- Gli indentatori sono un diamante conico con angolo al vertice di 120° (indentatore di Brale) e sfere con diametri tra 1.588 e 12.7 mm. I carichi variano tra $F=60\text{Kg}$ e $F=150\text{ Kg}$.

Durezza Rockwell

- Il valore della durezza si ottiene mediante la seguente relazione

$$HRX = Max - \frac{h}{0.02}$$

- nella quale ad X deve essere sostituita la lettera relativa alla scala e Max è il valore massimo della scala stessa.

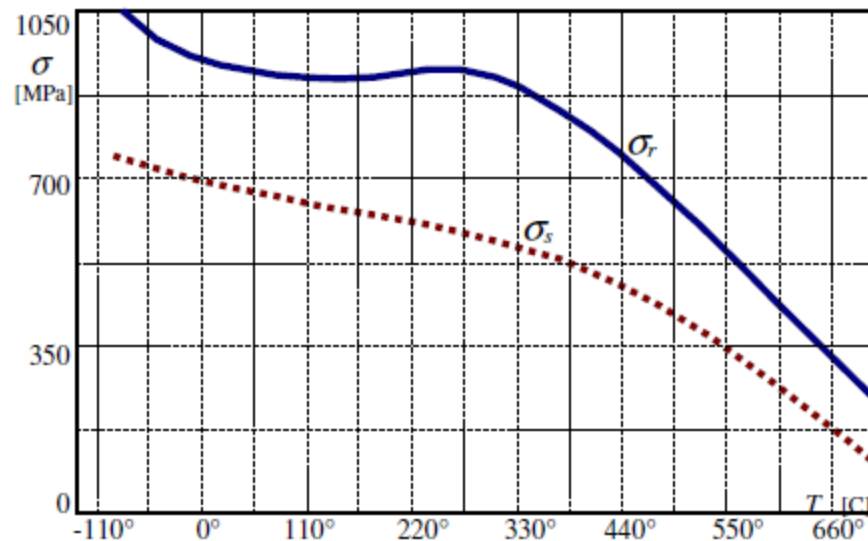
Scala X	Indentatore	Carico [kg]	Max	Applicazione
A	Brale	60	100	Materiali per utensili
B	Brale	100	130	Ghise, lastre metalliche
C	Brale	150	100	Acciai, leghe di alluminio, ghise dure
D	1.588	100	100	Acciai teneri, leghe di alluminio e rame
E	3.175	100	130	Metalli teneri, polimeri rinforzati
M	6.350	100	130	Metalli molto teneri, polimeri con alto modulo
R	12.70	60	130	Metalli molto teneri, polimeri con basso modulo

Proprietà alle alte temperature e scorrimento (creep)

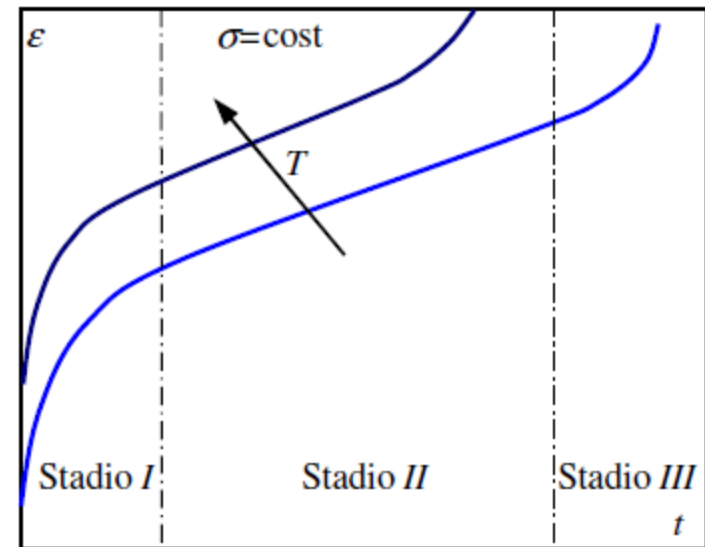
- Le proprietà meccaniche dei materiali, che vengono ordinariamente determinate a temperatura ambiente, subiscono notevoli variazioni al variare della temperatura stessa.
- Frequentemente gli elementi di macchina operano a temperature differenti da quella ambiente; ad esempio componenti metallici di aerei e macchine sottomarine spesso lavorano a temperature inferiori allo zero, mentre componenti di turbine a gas operano a temperature elevate.

Proprietà meccaniche al variare della temperatura

- La resistenza a trazione all'aumentare della temperatura rispetto a quella ambiente raggiunge un valore massimo oltre il quale comincia a diminuire molto rapidamente.
- La resistenza degli acciai alle alte temperature può essere aumentata da alcuni elementi in lega, in particolare Mo, Cr, Ni, Mn. Per le basse temperature è utile il Ni.



1 Resistenza degli acciai al variare della temperatura.



Andamento della deformazione in funzione del tempo t e della temperatura T .

Scorrimento

- Si definisce scorrimento (creep) la deformazione che si verifica al variare del tempo t sotto carico costante; spesso tale fenomeno è associato alla presenza di uno stato tensionale in condizioni di temperatura T elevata.
- Provini di materiale ferroso (e ceramici cristallini) sottoposti a tensione costante per lunghi periodi di tempo ad elevate temperature, risultano, infatti, deformati permanentemente anche se la tensione effettiva è minore di quella di snervamento alla stessa temperatura.
- In generale si ha che la deformazione dipende dalla tensione applicata, dalla temperatura e dal tempo, cioè $\varepsilon = \varepsilon(\sigma, T, t)$

Scorrimento

- Nella progettazione in presenza di scorrimento, la scelta del materiale è un fattore critico: nei metalli sono utili elementi in lega come Cr, Ni, e Co; i materiali ceramici offrono interessanti opportunità di applicazione, mentre i polimeri hanno severe limitazioni di impiego.
- La temperatura alla quale inizia lo scorrimento, definita T_s , è tanto più alta quanto maggiore è la temperatura di fusione T_f del materiale; tipicamente si ha $T_s = 0.3 \div 0.6 T_f$.
- In materiali con bassa temperatura di fusione il fenomeno dello scorrimento si può verificare anche a temperatura ambiente. Per i polimeri si deve considerare la temperatura di transizione vetrosa T_g in luogo di quella di fusione.
- Si dice che un materiale ha temperatura di scorrimento alta se $T_s > 0.5 T_f$.

Scorrimento

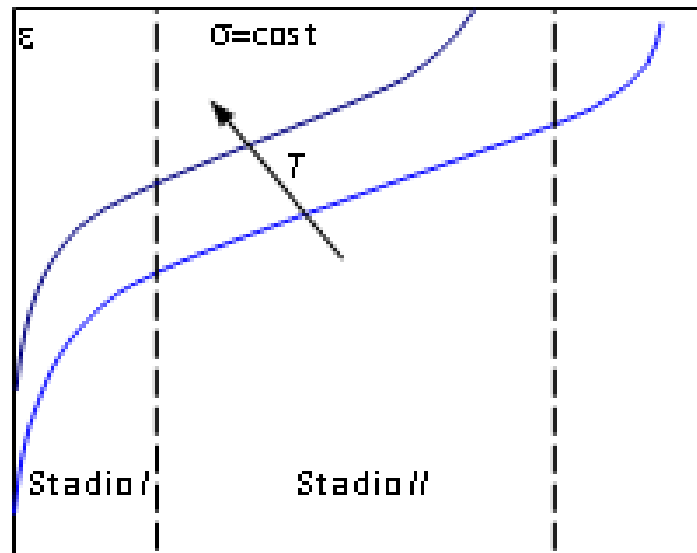
- Il meccanismo fisico dello scorrimento differisce molto per le varie classi di materiali. In generale esso è legato al movimento di atomi, molecole, dislocazioni e vacanze (difetti nella struttura cristallina dati dall'assenza di atomi in posizioni normalmente occupate), che avviene lentamente con il tempo in presenza di una sollecitazione di trazione e facilitato dalla temperatura elevata. L'insieme di questi fenomeni è detto *diffusione*.
- Nei metalli il meccanismo fisico dello scorrimento è legato al flusso delle vacanze che provoca una variazione della geometria del cristallo e contribuisce alla deformazione macroscopica. Nei polimeri, a temperature maggiori di T_g , le catene di molecole slittano una dopo l'altra al variare del tempo

Scorrimento

- Il problema del progetto di elementi soggetti ad elevate temperature è quello di evitare che la loro deformazione superi un valore ritenuto accettabile o la rottura.
- Nel caso di elementi che hanno una breve vita di esercizio l'esecuzione di prove che forniscano le informazioni necessarie non è difficile. In altri casi, poiché non è pratico eseguire prove di durata paragonabile alla vita prevista per l'elemento, i risultati sperimentali devono essere estrapolati in modo da fornire le necessarie informazioni di progetto.

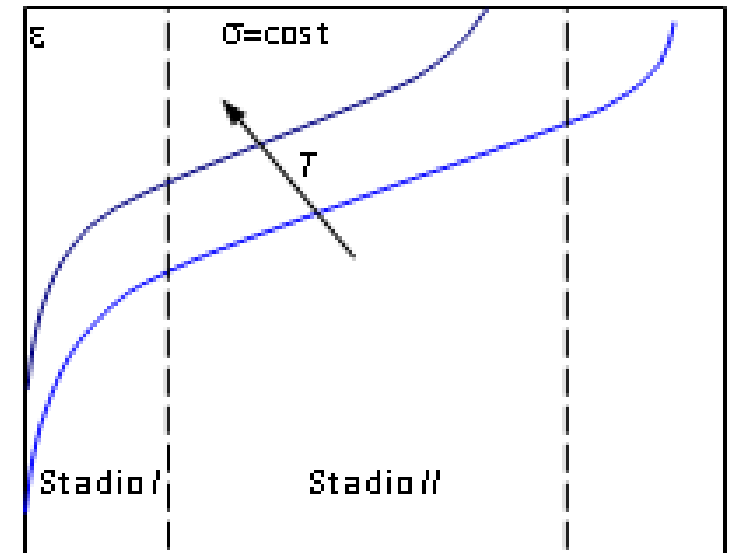
Scorrimento

- Una prova utile è quella di scorrimento con carico e temperatura costanti, nella quale si assoggettano vari provini ad un differente valore di tensione di trazione per un periodo di tempo che può variare da un minuto a diversi anni: per ciascuno provino si ha $\sigma = \text{cost}$, $T = \text{cost}$, $\varepsilon = \varepsilon(t)$.
- La figura mostra la curva deformazione-tempo tipica di questo tipo di prova. In ciascun punto la pendenza della curva è la velocità di deformazione o di scorrimento ε'_s .



Scorrimento

- Le curve ottenute esibiscono tre differenti regioni:
 1. stadio primario o transitorio, nel quale sono presenti sia una deformazione elastica che plastica; esso mostra una velocità di scorrimento decrescente dovuta alla deformazione di incrudimento;
 2. stadio secondario o stazionario, che mostra una velocità di scorrimento costante $\dot{\epsilon}_s$ e di valore minimo causato dalla ricottura del materiale;
 3. stadio terziario o instabile, nel quale il provino mostra una considerevole riduzione della sezione resistente che provoca un aumento della tensione reale e un aumento della velocità di scorrimento che porta alla rottura.



Scorrimento

- Le prove di scorrimento sono usualmente estese in modo da completare il primo stadio o da effettuare parte del secondo. All'aumentare della tensione l'ampiezza temporale delle tre fasi diminuisce.
- I risultati possono essere riassunti fornendo le seguenti quantità: tensione di prova σ , temperatura T , velocità di scorrimento stazionario ϵ'_s e, se raggiunta, tempo alla rottura tr .
- Questi dati possono essere riassunti in vari diagrammi: per temperatura assegnata, la tensione rispetto alla velocità di deformazione stazionaria $\sigma - \epsilon'_s$ oppure la tensione rispetto al tempo alla rottura $\sigma - tr$.

Scorrimento

- In alternativa, nei manuali è possibile trovare informazioni sul materiale relativamente a durate pari a 10.000 ore (14 mesi) e 100.000 ore (11 anni) per temperature assegnate.
- Sono disponibili valori delle tensioni che causano rispettivamente la rottura e una deformazione permanente pari all'1% per le durate citate
- Se, come è probabile, la durata richiesta a rottura o deformazione t_d è intermedia fra le due disponibili (10.000 e 100.000 ore), è necessario ricorrere ad una interpolazione che deve essere effettuata in coordinate bilogaritmiche, supponendo che, in tali coordinate, la relazione tra tensione e durata sia lineare.
- In alcuni casi può essere necessario limitare la deformazione ε_{sr} ad un livello diverso da quello assegnato (1%). La velocità di deformazione può essere considerata costante e pari a

$$d\varepsilon/dt = \varepsilon_{sr} / t_d$$

T [°C]	10.000 ore		100.000 ore	
	σ_r	σ_l	σ_r	σ_l
450	370	260	290	200
500	220	170	150	120
550	105	80	50	40
600	50	30	20	10

Caratteristiche meccaniche
dell'acciaio 14CrMo3 ad elevate temperature
($\sigma_r=500$ MPa, $\sigma_s=280$ MPa per T ambiente).

Nanoindentazione

- La nanoindentazione (chiamata anche indentazione strumentata) è una tecnica di caratterizzazione meccanica dei materiali.
- Questa tecnica sta suscitando un notevole interesse nel campo dei film sottili, dei micro-oggetti e dei tessuti biologici.

Principio di funzionamento

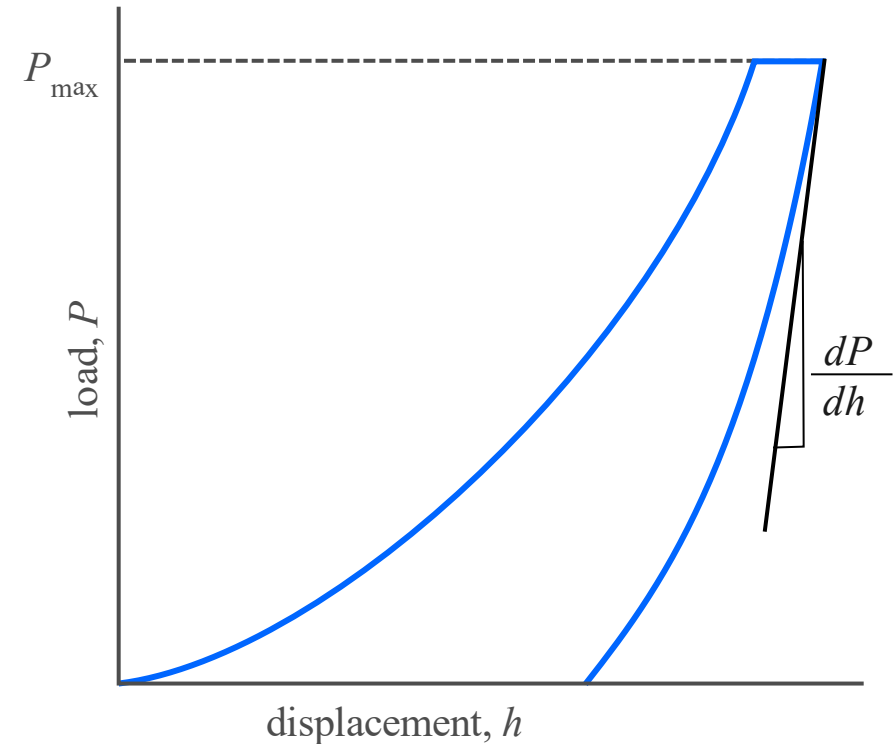
- Si dice che questa tecnica di caratterizzazione sia strumentata quando la forza applicata al contatto e la profondità di penetrazione che genera vengono misurate continuamente.
- La prova di indentazione consiste nel far penetrare un punto, detto anche penetratore, di geometria e proprietà meccaniche note, in un materiale (se possibile piano) per dedurne le proprietà meccaniche.
- La tecnica di nanoindentazione inventata negli anni '70 consente di superare questa limitazione applicando carichi dell'ordine di dieci micronewton (μN) per profondità comprese tra poche decine di nanometri (nm) e pochi micrometri (μm).

Principio di funzionamento

- La nanoindentazione offre un'ampia gamma di applicazioni per la caratterizzazione meccanica dei materiali: durezza, modulo di Young, creep, adesione, ecc. La durezza e il modulo di Young sono le proprietà più studiate.
- Gli indentatori sono spesso fatti di diamante o zaffiro. Esistono molte geometrie del penetratore:
 - penetratore Berkovich;
 - penetratore sferico;
 - penetratore conico;
 - indentor Vickers;
 - penetratore cubo d'angolo;
 - pugno piatto.

Principio di funzionamento

- Il nanoindentatore segue continuamente l'evoluzione della rientranza della punta con il carico di indentazione durante le fasi di carica e scarica al fine di osservare la risposta plastica ed elastica del materiale. Il risultato è una curva della profondità di carica che mostra il ciclo di carica-scarica applicato.
- La curva di indentazione ha due parti distinte.
- La prima parte del carico corrisponde alla depressione del punto di impronta fino alla massima penetrazione h_{max} , rappresentando sia i contributi elastici che plastici e quindi non può essere sfruttata direttamente per il calcolo della durezza.
- La seconda porzione di rilievo rappresenta la rimozione della punta della rientranza lasciando una rientranza residua di profondità h_f .
- La curva di scarico rappresenta la restituzione elastica del materiale la cui pendenza iniziale (all'inizio dello scarico) presenta la rigidità di contatto $dP / dh = S$.



Principio di funzionamento

1) Definizione dei parametri sperimentali

- L'utente definisce un ciclo di carico che generalmente consiste in una fase di carico (carico che aumenta), attesa (carico invariato) e scarico (carico che diminuisce).
- È quindi possibile specificare le velocità di carico e scarico, e definire l'esperimento in base al carico massimo o alla profondità massima di penetrazione. Un esperimento può essere controllato in base al carico o alla penetrazione, mediante un loop di feedback rapido.
- La forma della curva di carico dipende fortemente dal campione, e fornisce informazioni fondamentali sulle proprietà del materiale. Polimeri e materiali molto morbidi di solito richiedono sessioni di creep molto più lunghe. Pertanto è necessario prevedere fasi di attesa più lunghe per ridurre al minimo l'esponente di creep, che può quindi essere trascurato durante la fase di scarico. Anche il carico massimo e la profondità di penetrazione massima influenzeranno i risultati. Un fenomeno che si chiama "effetto della dimensione nell'indentazione".

Principio di funzionamento

2) Calcolo della durezza e del modulo elastico

- Il nanoindentatore acquisisce continuamente la profondità di indentazione prima di toccare il campione e, dopo averlo toccato, registra un contatto superficiale in base a una modifica della rigidità del contatto.
- Il carico viene quindi aumentato ad una velocità predefinita, con conseguente aumento della profondità di indentazione. Una volta che la punta ha raggiunto l'obiettivo preimpostato dell'esperimento (un carico massimo o una profondità massima), il carico massimo raggiunto può essere mantenuto per analizzare le proprietà di creep. Successivamente il carico viene rimosso dal campione, lasciando un'indentazione.

Principio di funzionamento

- Pharr e Bolshakov descrivono la risposta convenzionale di carico-spostamento in una arbitraria geometria d'indentazione.
- Questo metodo calcola la profondità di contatto della punta, con l'aiuto della rigidità del contatto $S = dP / dh$ e del fattore di correzione specifico della sonda ϵ :

$$h_c = h_{\max} - \epsilon * \frac{P_{\max}}{S}$$

- La durezza del materiale è definita come il quoziente di carico di picco e l'area di contatto proiettata:

$$H = \frac{P_{\max}}{A_c}$$

Principio di funzionamento

- Il modulo elastico ridotto viene tuttavia calcolato in questo modo:

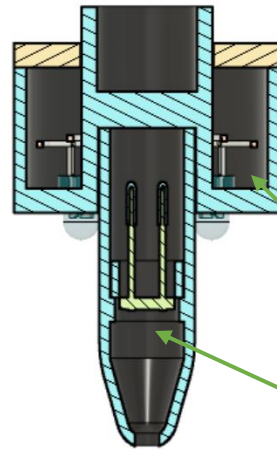
$$Er = S * \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{Ac}}$$

- L'uso del modulo Young e del coefficiente di Poisson, sia del materiale della punta che del campione, dà come risultato:

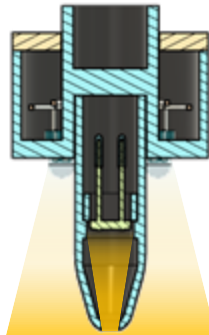
$$E_{IT} = \frac{1 - (\nu_s)^2}{\frac{1}{Er} - \frac{1 - (\nu_i)^2}{E_i}}$$

Esempio

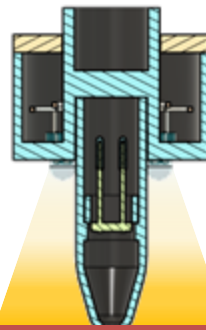
- Sonda a contatto con sensore di luce



LEDs per mantenere
illuminazione
ambientale costante
Sensore di luce

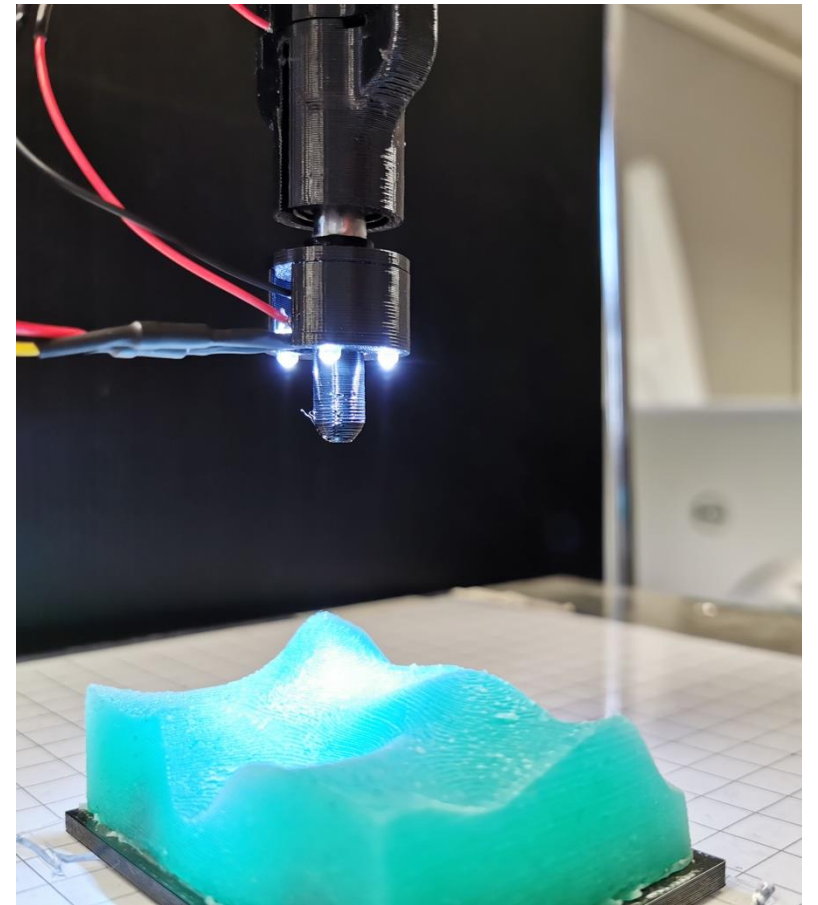


Luce > soglia



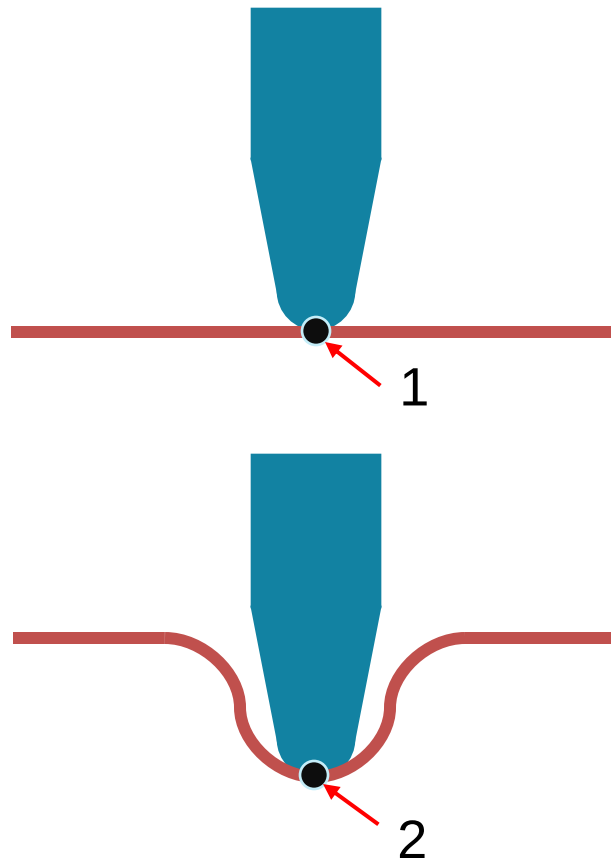
Luce < soglia

Principi di Bioingegneria - A.A. 2023/24



Esempio

- Principio di funzionamento

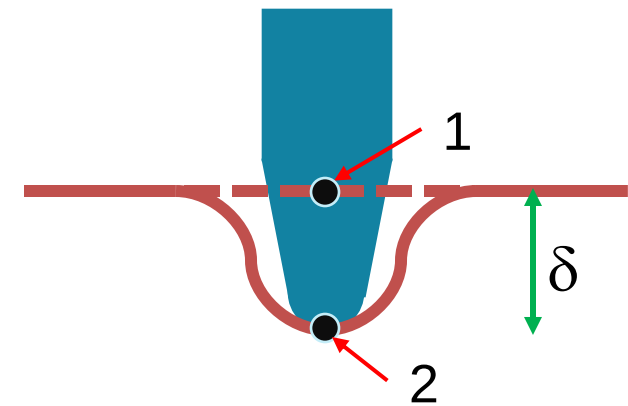


Acquisizione
coordinate punto
1 quando luce <
soglia

Acquisizione
coordinate punto
2 quando scatta
la molla

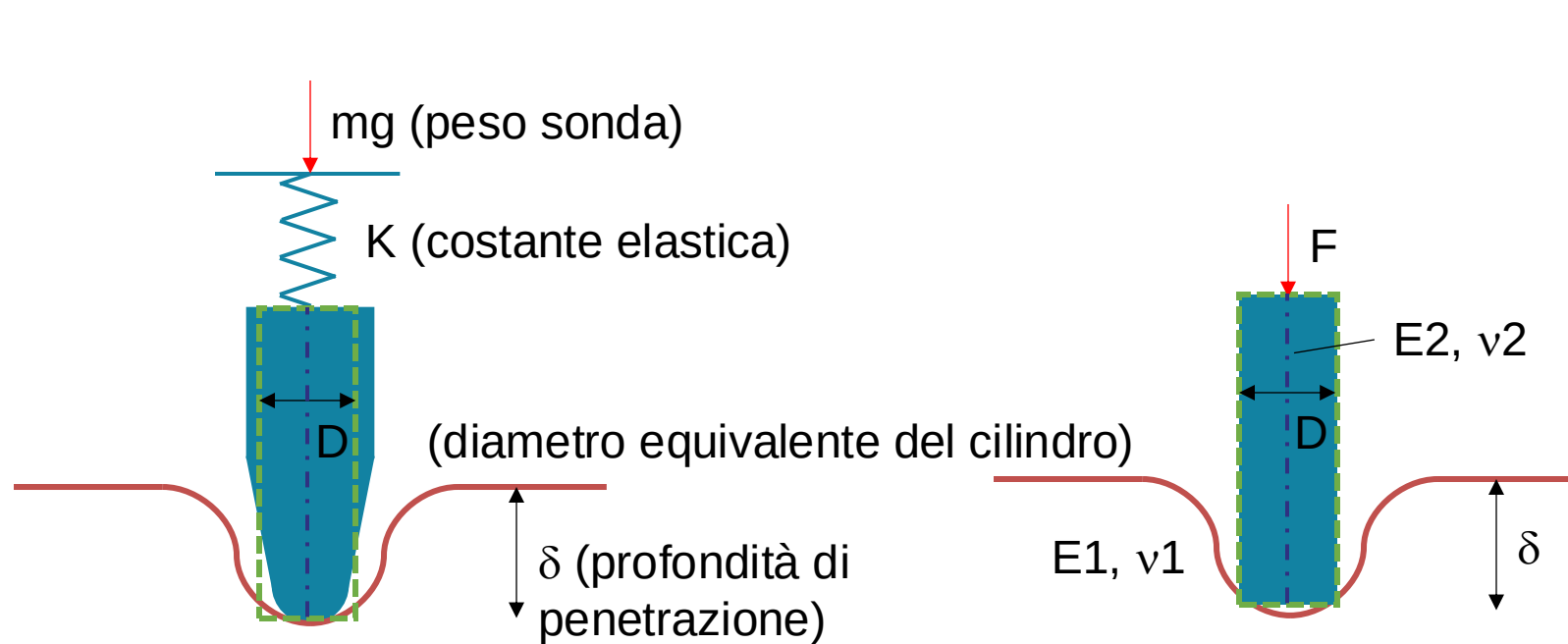


$Z_1 - Z_2 =$ profondità di
penetrazione δ



Esempio

Relazione teorica tra forza e profondità di penetrazione per indentatore cilindrico



Compressione della molla

$$F = E_{eq} D \delta = Kx + mg$$
$$\frac{1}{E_{eq}} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \approx \frac{1-\nu_1^2}{E_1}$$

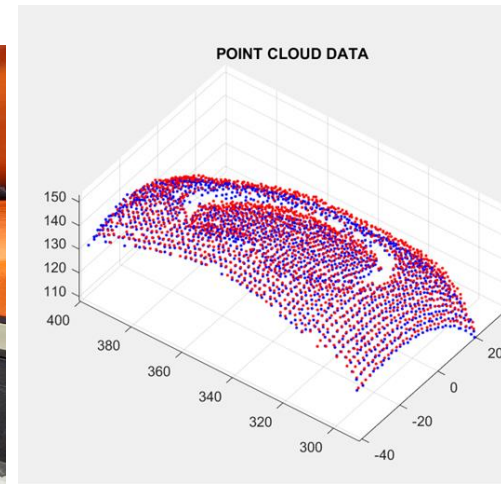
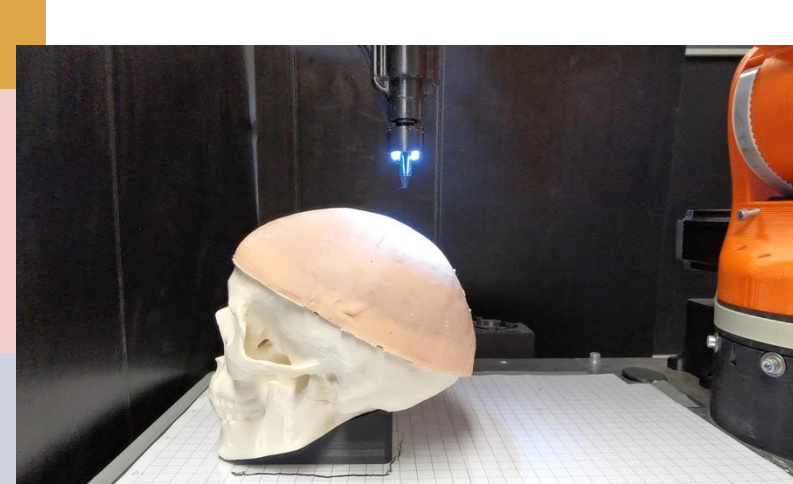
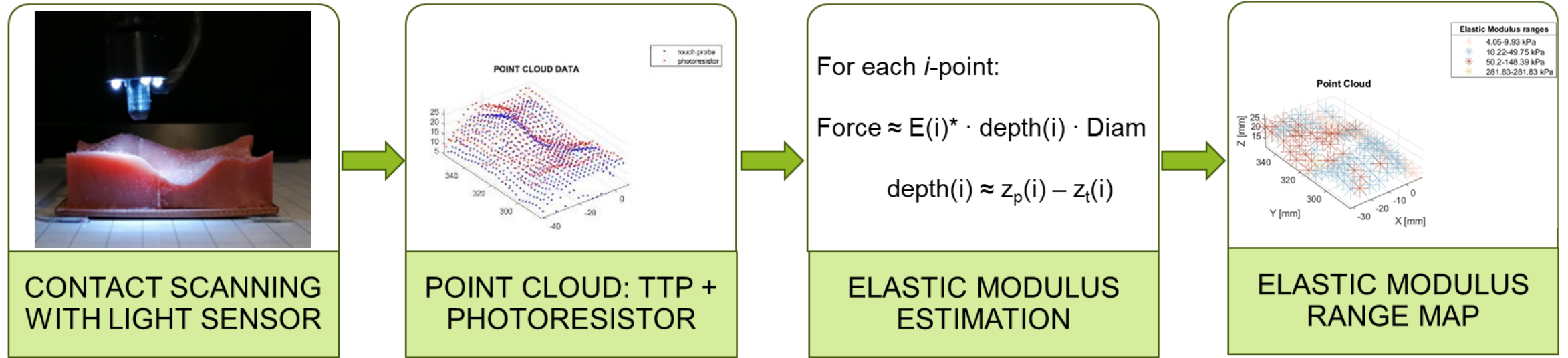
$E_2 \text{ (GPa)} \gg E_1 \text{ (kPa)}$

0.485 (Silicone)

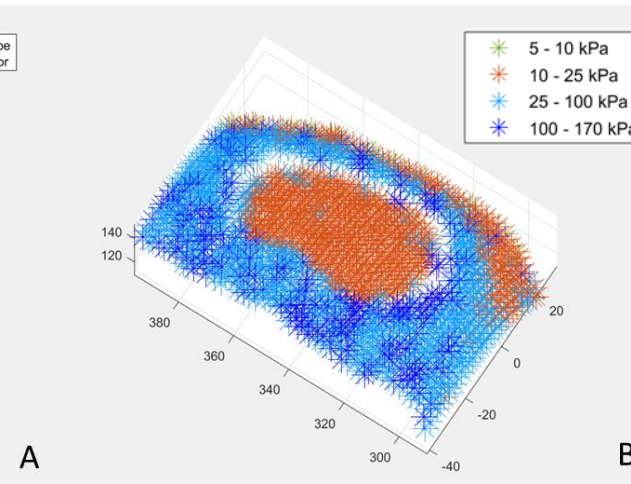
$$E_1 = \frac{F}{D \delta} (1-\nu_1^2)$$

McKee, Clayton T., et al. "Indentation versus tensile measurements of Young's modulus for soft biological tissues." Tissue Engineering Part B: Reviews 17.3 (2011): 155-164.

Esempio

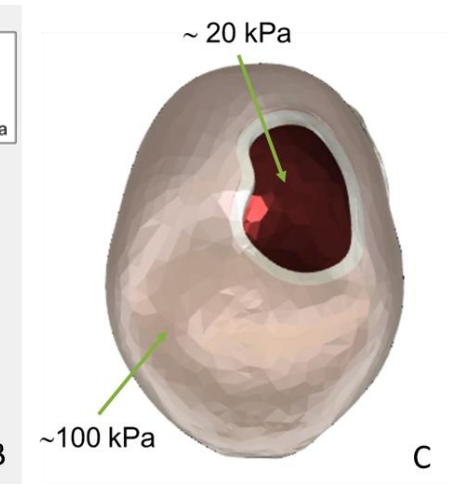


Point cloud sonda+sensore luce



A

Stima modulo elastico



B

Modulo elastico reale

- Meccanismi di usura

Usura

- L'usura è la rimozione di materiale dalla superficie di un solido risultante da un'azione meccanica
- L'usura è la maggior causa della riduzione e della perdita delle performance delle macchine, quindi ogni diminuzione di tale fenomeno risulta considerabilmente vantaggiosa.
- Lo sfregamento è la causa principale dell'usura, ma anche della dissipazione di energia (per attrito), perciò migliorandone il controllo si ottiene un grosso vantaggio.
- Ad esempio la lubrificazione è uno dei metodi utilizzati per controllare l'usura e per ridurre l'attrito.

Usura

- Analizzando i guasti nelle macchine si scopre come nella maggior parte dei casi la rottura e l'arresto sono associati a interazioni tra parti in movimento come ingranaggi, cuscinetti, giunti, camme, frizioni, sigillanti, ecc..
- Anche il corpo umano contiene superfici interagenti in moto relativo basti pensare a tutte le articolazioni presenti
- Un osservazione generale derivata da innumerevoli esperimenti è che nello studio dell'usura si devono valutare:
 - le caratteristiche dei film che si hanno tra i corpi in contatto,
 - le conseguenze del "fallimento" del film (che in genere è usualmente riscontrabile con attrito ed usura severi) oppure l'assenza di un film.

Usura

- La formazione di una pellicola tra ogni coppia di oggetti che scorrono l'uno sull'altro è un fenomeno naturale e la si ottiene anche senza l'intervento umano.
- Questo meccanismo è fondamentale per prevenire l'azione degli elevati carichi di taglio agenti all'interfaccia tra due corpi rigidi in movimento relativo.
- Il fenomeno dell'usura comprende tutti i fenomeni che comportano un danneggiamento sulla superficie di due corpi solidi che sono in contatto ed in movimento relativo tra loro, ma all'interno di questa fenomenologia si possono distinguere diversi tipi di meccanismi.

Usura

- A seguito dello strisciamento tra corpi solidi lo strato di rivestimento superficiale può danneggiarsi e staccarsi (a causa della frizione), in tal caso l'usura è il risultato dell'adesione tra i rivestimenti dei corpi ed è chiamata "**usura da adesione**".
- Quando la superficie garantisce una parziale resistenza a modeste forme di usura possono nascere processi di fatica dovuti a cicli di sforzi che si hanno durante strisciamento o rotolamento; questo tipo di fenomenologia è indicata come "**fatica da usura**".

Usura

- Se uno dei due materiali in contatto è costituito da particelle molto dure (ma anche se è rivestito da un film di particelle molto dure) senza che l'altro sia adeguatamente protetto, allora si ha una forma di usura, che qualche volta è molto rapida, nota come "**usura abrasiva**".
- Altri due tipi di usura che sono spesso associati sono "**usura da erosione**", dovuta all'impatto con particelle e "**usura da cavitazione**", causata appunto dal fenomeno della cavitazione che si ha in liquidi che scorrono molto velocemente.

Usura

- In molte situazioni pratiche il film superficiale è formato da attacco chimico su altri rivestimenti e anche se questo può portare a una certa lubrificazione, una significativa usura è inevitabile.
- Queste forme di usura sono note come "**usura-corrosione**" e quando l'agente corrosivo è l'ossigeno "**usura-ossidazione**".
- Quando il movimento relativo tra i due corpi in contatto è ristretto, per esempio, a pochi micrometri, il materiale può comunque essere danneggiato dal contatto e può eventualmente venire distrutto. In queste condizioni il risultato è chiamato "**fretting-wear**".

Usura

- Ci sono molte altre forme o meccanismi di usura che sono però minori; esempi tipici sono **"usura da impatto"** causata dall'impatto tra due solidi, **"usura-fusione"** che si ottiene quando le forze e le velocità di contatto sono sufficientemente elevate da far fondere i primi piani superficiali del solido, e **"usura-diffusione"** ottenuta quando le temperature all'interfaccia sono elevate.

Usura abrasiva, da erosione e da cavitazioni

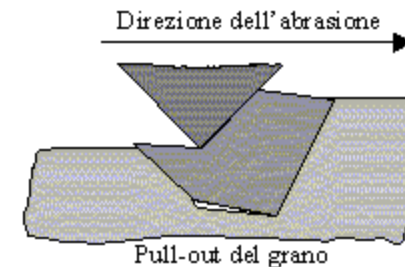
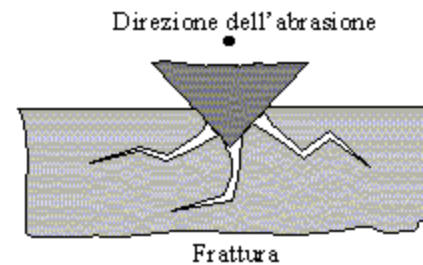
- L'usura da abrasione e l'usura da erosione sono fenomeni causati dal contatto tra un materiale solido ed uno particolare.
- L'usura abrasiva è il danneggiamento del materiale a causa del passaggio di particelle dure su una superficie.
- L'usura erosiva è causata dall'impatto di particelle contro una superficie solida.
- La cavitazione è invece causata dall'impatto localizzato di un fluido contro una superficie durante l'implosione di bolle.
- L'abrasione e l'erosione in particolare sono forme di usura molto rapide e severe e se non adeguatamente controllate risultano molto costose.
- Queste forme di usura anche se molto simili presentano delle differenze fondamentali, ad esempio una "particella liquida" può causare erosione ma non abrasione.
- Queste differenze si estendono alle considerazioni pratiche per la selezione dei materiali per resistere al fenomeno. E perciò utile studiare separatamente questi tre diversi tipi di usura.

Usura da abrasione

- Questo fenomeno si ottiene quando un oggetto solido viene investito da particelle di un materiale con una durezza uguale o superiore a quella del solido stesso.
- Un esempio comune di tale problema è l'usura dei macchinari per la movimentazione dei terreni.
- Il problema dell'usura abrasiva è molto più diffuso di quello che si possa pensare, ogni materiale può esserne soggetto se sono presenti particelle più dure.

Usura da abrasione

- Originariamente si pensava che l'usura da abrasione fosse dovuta ad un meccanismo di taglio, oggi con analisi microscopiche si sono individuati molti meccanismi indiretti.
- Il materiale viene infatti rimosso per microtagli, microfratture, pull-out di singoli grani o fatica accelerata dovuta alle ripetute deformazioni



Usura da abrasione

- Taglio: è il classico modello che si usa quando particelle o asperità "tagliano" la superficie meno dura del pezzo sottoposto ad usura. Il materiale tagliato viene rimosso come detrito dell'usura e sulla superficie si osservano molti intagli in genere di forma piramidale o sferica. Al di sotto della superficie abrasa si ha una notevole deformazione plastica, che porta ad incrudimento del materiale e quindi ad una riduzione dell'usura.
- Quando il materiale abraso è fragile, ad esempio un ceramico, si ha la frattura della superficie. In questo caso i detriti sono il risultato dell'avanzamento delle cricche fino alla rottura.

Usura da abrasione

- Quando un materiale duttile è soggetto ad abrasione da parte di particelle non spigolose i fenomeni di taglio sono sfavoriti e la superficie abrasa è soggetta a deformazioni ripetute. In questo caso i detriti sono il risultato di fenomeni di fatica dei metalli. L'usura dovuta alle ripetute deformazioni può essere considerata una forma relativamente debole di usura abrasiva poichè è necessaria la successiva azione di numerose particelle per produrre detriti.
- L'ultimo meccanismo, pull-out, rappresenta il distaccamento o l'espulsione dei grani. Questo meccanismo è molto diffuso nei ceramici dove il bordograno è relativamente debole per cui il fenomeno è molto rapido. In questo caso l'intero grano diventa detrito dell'abrasione.

Usura da erosione

- L'usura da erosione è causata dall'impatto di particelle solide o liquide sulla superficie di un oggetto.
- Questo tipo di usura lo si ha in diverse categorie di macchine, esempi tipici sono i danni alle turbine a gas quando un aereo vola attraverso nubi di polvere e l'usura di pompe utilizzate per sospensioni di minerali.
- Come per altre forme di usura la resistenza meccanica di un materiale non ne garantisce la resistenza ad usura, ed è necessario un apposito studio delle sue caratteristiche per poter minimizzare il fenomeno.
- Le proprietà delle particelle erosive sono anch'esse importanti e divengono un parametro fondamentale nel controllo di questo tipo di usura.

Usura da erosione

- L'usura da erosione comporta diversi meccanismi di usura che sono in gran parte controllati dal materiale che costituisce le particelle, dall'angolo di impatto, dalla velocità di impatto e dalla dimensione delle particelle.
- Se una particella è solida e dura allora è possibile avere un processo simile all'usura da abrasione.
- Dove gli elementi erosivi sono particelle liquide, l'abrasione non ha luogo e il meccanismo di usura è il risultato delle ripetute sollecitazioni da impatto

Usura da erosione

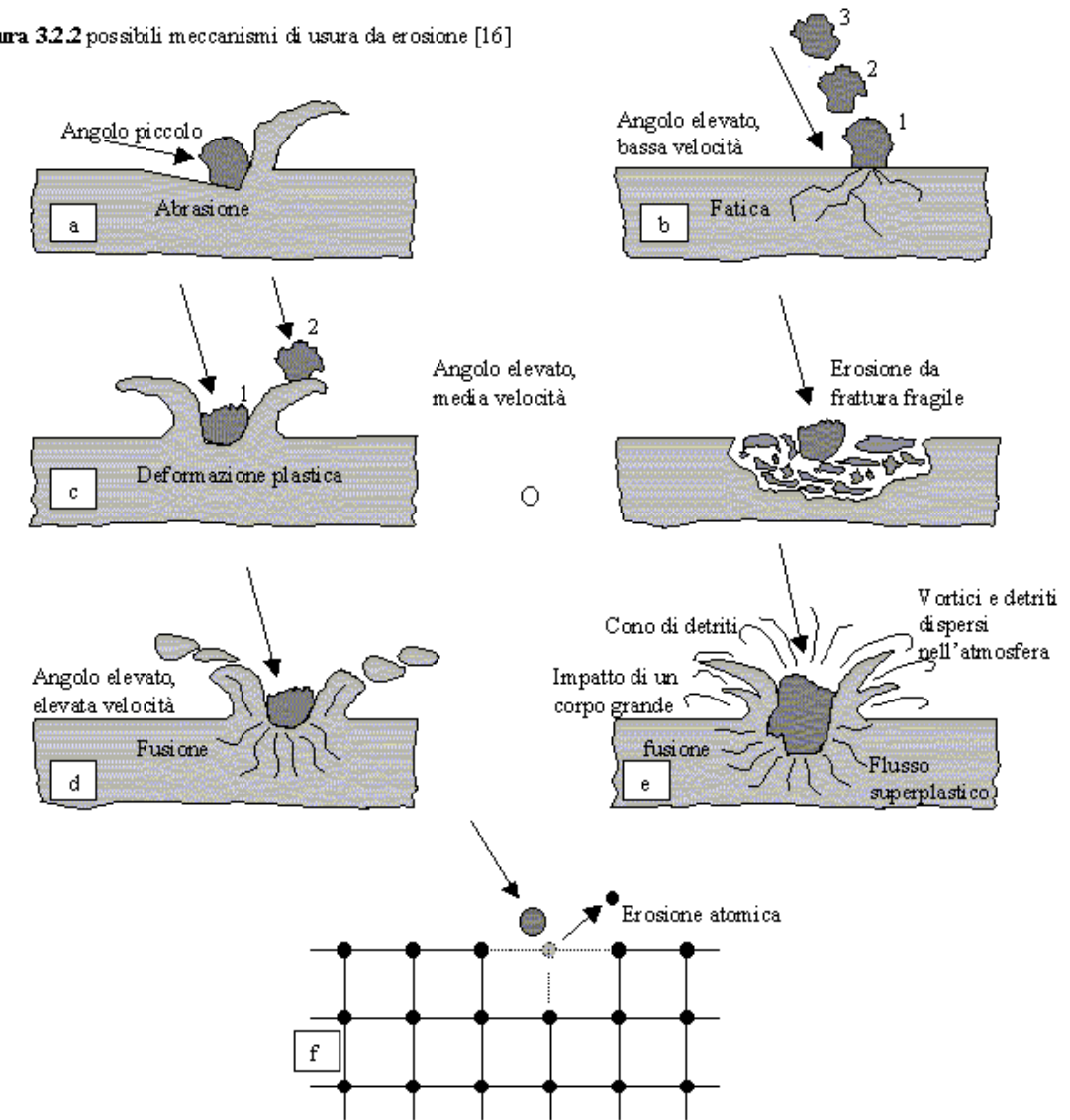
- Il termine usura da erosione si riferisce a un incalcolabile numero di meccanismi, che avvengono quando particelle relativamente piccole impattano contro componenti meccanici.
- Questa definizione è empirica, dovuta alle caratteristiche del fenomeno e legata a considerazioni pratiche più che a reali conoscenze dell'usura.

Usura da erosione

I meccanismi più conosciuti di usura da erosione sono:

- abrasione ad angolo d'impatto basso,
- fatica superficiale per velocità basse e alto angolo di impatto,
- frattura fragile o deformazione plastica multipla per velocità medie e alto angolo di impatto,
- fusione superficiale a velocità elevate di impatto,
- erosione macroscopica con effetti secondari,
- degradazione del reticolo cristallino per impatto di atomi.

Figura 3.2.2 possibili meccanismi di usura da erosione [16]



Usura da erosione

- L'angolo d'impatto è l'angolo tra la superficie erosa e la traiettoria della particella immediatamente prima dell'urto.
- Un piccolo angolo di impatto favorisce processi di usura simili all'abrasione perché le particelle tendono a scorrere lungo la superficie erosa dopo l'impatto. Un elevato angolo d'impatto porta invece a meccanismi di usura tipici dell'erosione.
- La velocità delle particelle erosive ha un effetto rilevante sui processi di usura; se la velocità è molto bassa allora gli sforzi d'impatto non sono sufficienti per avere deformazione plastica e l'usura procede per fatica.

Usura da erosione

- Quando la velocità è più alta (ad esempio 20 m/s) è possibile che il materiale eroso si deformi plasticamente all'impatto delle particelle.
- In questo caso, molto comune per molti componenti ingegneristici, l'usura è ottenuta per ripetute deformazioni plastiche.
- Se le particelle erodenti sono smussate o sferiche, a seguito della grossa deformazione plastica, si formano sottili lamine di materiale eroso sopra la superficie erosa.
- Se le particelle sono spigolose sono favoriti meccanismi di taglio o di frammentazione fragile. D'altra parte i materiali fragili si usurano per frattura sotto-superficiale. A velocità d'impatto molto alte si può avere la fusione della superficie impattata.

Usura da erosione

- Anche la dimensione delle particelle è di considerevole rilevanza e molti dei problemi di usura erosiva coinvolgono particelle tra i 5 e i 500 micrometri, ma esistono anche problemi di erosione dovuti a particelle con dimensioni al di fuori di questo campo.
- Osservando ciò che accade a satelliti in orbita attorno alla terra si è osservata l'erosione dovuta a particelle molto piccole, infatti un satellite è soggetto all'impatto con atomi di ossigeno ed azoto all'esterno dell'atmosfera che causano eventualmente danneggiamento della struttura protettiva.
- Nello spazio ci sono anche molti meteoriti che "erodono" grossi asteroidi, pianeti o satelliti. Nell'erosione dovuta a meteoriti le grosse dimensioni e le velocità portano ad un danneggiamento macroscopico dove sono significanti effetti come il vorticare dell'atmosfera attorno al luogo di impatto.

Usura da erosione

- Un liquido può causare un danneggiamento da erosione pericoloso come quello di un solido se la velocità di impatto è sufficientemente alta.
- Esempi di questo problema sono il danneggiamento sugli aeroplani che volano attraverso nubi o sulle palette delle turbine operanti in vapore umido.

Usura da cavitazione

- L'usura da cavitazione è conosciuta per il danneggiamento alle palette delle eliche o delle turbine operanti in vapore umido e alle valvole di regolazione.
- L'usura procede con formazione di una serie di cavità sulla superficie sottoposta a cavitazione.
- L'intero pezzo meccanico può essere distrutto da questo processo, ma comunque le prestazioni del componente sono spesso limitate dalle rilevanti vibrazioni causate dal danneggiamento per cavitazione.

Usura da cavitazione

- La cavitazione è caratterizzata da ciclica formazione e collasso di bolle su una superficie solida in contatto con un fluido.
- La formazione delle bolle è causata dal rilascio di gas disciolti, dal liquido dove questo presenta una pressione vicina allo zero o negativa.
- Una pressione negativa la si può avere quando il flusso del liquido passa in un condotto a geometria divergente, ad esempio nel passaggio da un tubo con diametro piccolo ad uno con diametro più grande.
- Il metodo ideale per prevenire la cavitazione è evitare le pressioni negative vicino alle superfici, ma nel caso di cavitazione su particelle questo è usualmente impossibile.

Usura da cavitazione

- Quando una bolla collassa su una superficie il liquido circostante alla bolla viene dapprima accelerato e poi bruscamente decelerato appena collide con la superficie.
- La collisione tra liquido e solido genera grossi sforzi che possono danneggiare il solido. Sono possibili a seguito del collasso variazioni di pressione anche di 1.5 Gpa.
- Nei materiali con bassa durezza la cavitazione produce sulla superficie un cratere.
- Nei materiali più duri nelle stesse condizioni la formazione di profonde cavità è sfavorita: frattura e frammentazione sono i meccanismi predominanti dell'usura di materiali duri e fragili.
- Quasi tutti i materiali soffrono qualche forma di danneggiamento sotto-superficiale da cavitazione e incrudimenti con formazioni di cricche sono comuni.

Usura da cavitazione

- In molti casi quando la cavitazione è intensa, la densità di cavità può essere sufficiente a ridurre il materiale eroso ad una matrice porosa o ad una "spugna".
- Benché la cavitazione coinvolga un processo di collisione tra liquido e solido simile a ciò che avviene nella erosione da liquidi ci sono delle significative differenze.
- L'usura da cavitazione è un processo molto più blando dell'usura da erosione. Nell'usura da cavitazione le particelle si staccano a seguito di milioni di cavitazioni mentre solo poche migliaia di impatti di gocce sono sufficienti a causare usura erosiva.
- L'usura da cavitazione ha un "periodo di incubazione" come l'usura da erosione, ma non si ha aumento di peso del solido a meno che il materiale sottoposto a cavitazione assorba liquido.

Usura da cavitazione

- Quando la cavitazione avviene in un mezzo corrosivo la stress corrosion cracking accentua il processo di usura. Un esempio di questo lo si può osservare nella differenza tra le velocità di usura da cavitazione tra acqua dolce e salata.
- L'usura da cavitazione può essere accelerata dalla simultaneità con l'usura erosiva, in altre parole è possibile la sinergia tra questi due meccanismi di usura.
- Se il fluido cavitante contiene particelle erosive, allora le bolle collassanti inducono le particelle a colpire la superficie erosa ad alta velocità e la velocità di usura risulta maggiore che per la cavitazione o l'erosione da sole.
- Questo fenomeno ha luogo ad esempio nelle turbine idrauliche operanti in acque sabbiose.

Usura adesiva

- L'usura adesiva è una forma molto pericolosa di usura caratterizzata da velocità di usura elevate e un coefficiente di attrito molto instabile.
- Componenti in contatto che scorrono possono essere rapidamente distrutti da questo tipo di usura e, nei casi più estremi, lo scorrimento può essere preceduto da coefficienti di attrito molto elevati o grippaggio.
- I metalli sono particolarmente inclini verso l'usura adesiva e perciò è molto importante nella pratica.

Usura adesiva

- Se nello scorrimento tra metalli i lubrificanti cessano la loro funzione base, cioè provvedere ad un certo grado di separazione tra le due superfici in scorrimento, si ha l'usura adesiva.
- Se le superfici che scorrono non sono separate l'adesione e la conseguente usura sono quasi inevitabili.
- Le questioni di importanza pratica che si devono capire sono che metalli sono più inclini a questo tipo di usura e come si può controllare questo fenomeno.

Usura adesiva

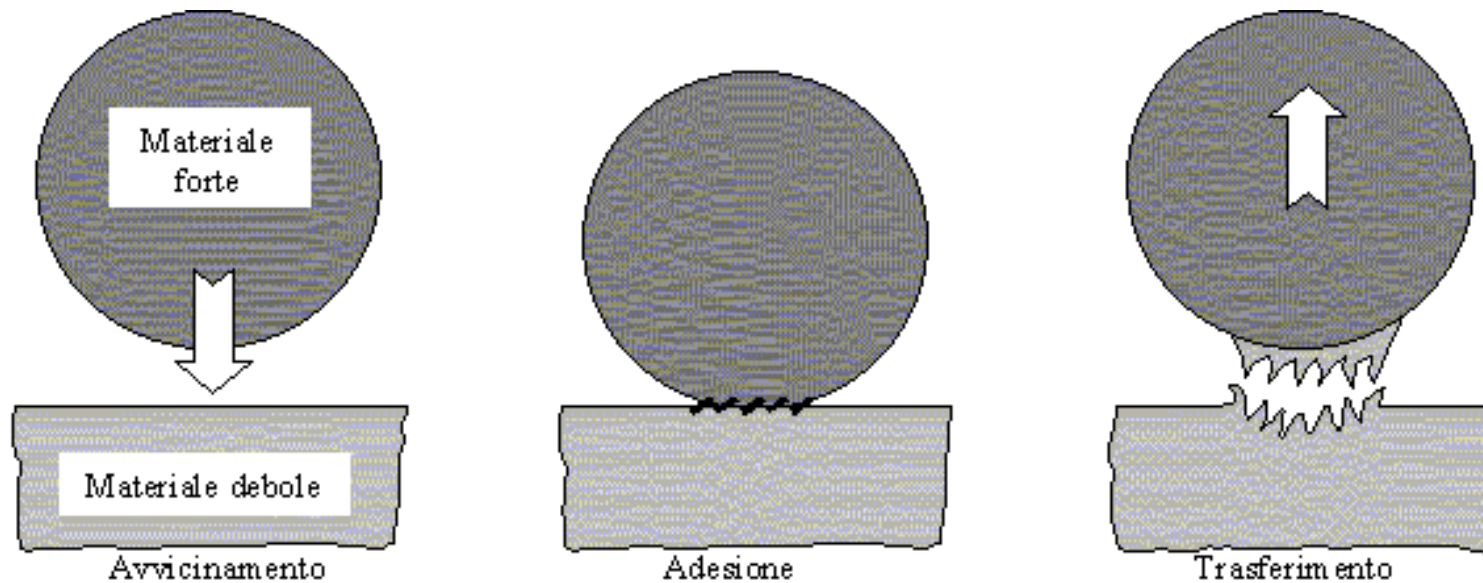
- Molti solidi possono aderire al contatto con un altro solido purché alcune condizioni siano soddisfatte.
- L'adesione tra due oggetti casualmente posizionati vicini non è osservata perché sono generalmente presenti contaminanti come ossigeno, acqua e olio, infatti l'atmosfera della terra e i materiali organici terrestri producono strati di sostanze estranee sugli oggetti che riducono effettivamente molto ogni adesione tra i solidi.
- L'adesione viene anche ridotta dall'aumento della rugosità superficiale o della durezza delle superfici in contatto.
- Oggi è possibile fare osservazioni sperimentali sull'adesione in assenza di contaminanti facendo prove sotto alto vuoto, in questo modo si osservano processi completamente diversi da quelli osservati in condizioni comuni all'aria aperta.
- Le superfici metalliche libere da film d'ossido sotto alto vuoto mostrano comportamenti peggiori ed è per questo che vengono studiati.

Usura adesiva

- Tranne i metalli nobili come oro e platino ogni altro metallo è sempre ricoperto da un film d'ossido quando si trova in un atmosfera ossidante.
- Il film di ossido è spesso così sottile da essere invisibile e la superficie del metallo appare lucida.
- Questo film, che può essere spesso solo pochi nanometri, evita il contatto reale tra metalli e impedisce un'usura severa a meno che non venga deliberatamente rimosso.

Usura adesiva

- Numerosi test su un'ampia varietà di combinazioni di metalli hanno mostrato che quando c'è una forte adesione, si ha il trasferimento del metallo più debole al più forte
- La forte adesione osservata tra metalli si può spiegare con il trasferimento di elettroni tra le superfici in contatto, infatti nei metalli sono presenti numerosi elettroni liberi che possono essere scambiati tra i due solidi.



Usura a fatica

- In molti casi di contatti ben lubrificati l'adesione tra le due superfici è trascurabile, tuttavia molto spesso c'è ancora un'usura significativa.
- Questo fenomeno è causato dalle deformazioni subite dalle asperità e dagli strati superficiali del corpo usurato quanto le asperità dell'altra superficie sono in contatto.
- I contatti tra asperità, accompagnati da sforzi locali molto elevati, si ripetono per un gran numero di volte nel corso di uno strisciamento o di un rotolamento, e le particelle d'usura sono generate dalla propagazione di cricche di fatica, da cui il termine usura a fatica.
- L'usura in queste condizioni è determinata dai meccanismi di iniziazione della cricca, crescita della cricca e frattura.
- La superficie erosa contiene un livello molto alto di deformazione plastica se paragonata alla superficie non erosa. Questa deformazione e la conseguente modificazione della microstruttura del materiale hanno un effetto rilevante sul processo di usura.

Usura a fatica

- I termini "fatica di contatto" o "fatica superficiale" comunemente usati in letteratura sono termini tecnici per indicare il danneggiamento superficiale causato da un ripetuto contatto di rotolamento.
- Questo si riferisce al danneggiamento iniziale su una superficie liscia ed è molto spesso usato nell'ambito dei cuscinetti a rotolamento.
- I cuscinetti a rotolamento si affidano ad una superficie di contatto liscia non danneggiata per avere un funzionamento ottimale.
- Devono trascorrere un certo numero di cicli di contatto a rotolamento prima che si ottengano difetti superficiali, e la loro formazione è chiamata "fatica di contatto".

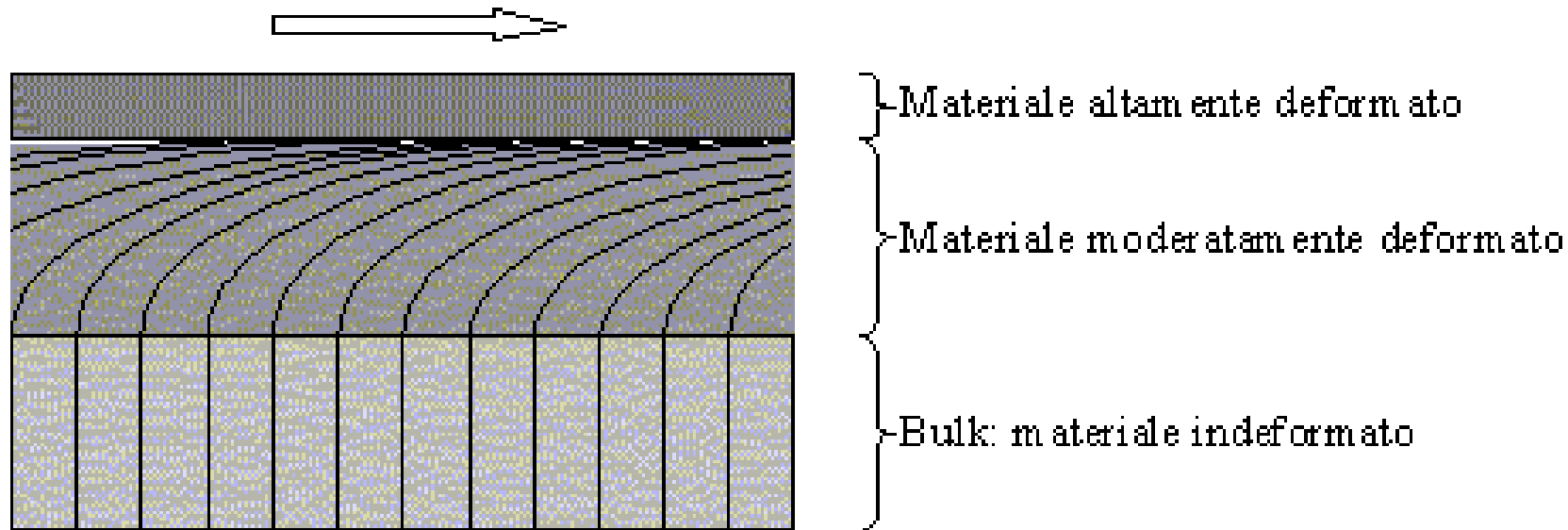


Usura a fatica

- Una volta che la superficie di rotolamento di un cuscinetto presenta numerose cavità, il suo ulteriore impiego è impedito dalle eccessive vibrazioni causate dal passaggio dei forellini attraverso il contatto di rotolamento.
- La rottura del cuscinetto causata da fatica di contatto è usualmente improvvisa e altamente indesiderabile specialmente quando il cuscinetto è critico per il funzionamento della macchina in cui è inserito, ad esempio in un motore a reazione.
- È esperienza comune che quando un cuscinetto a rotolamento fallisce, ad esempio in un asse di un'auto, è necessario molto lavoro di smontaggio e riassettaggio. Per questa ragione la fatica di contatto, in particolare in contatti metallici lubrificati, è l'oggetto di molti degli studi sull'usura in contatti a rotolamento

Usura a fatica

- Studiando le superfici erose in sezione si può osservare l'intensa deformazione del materiale appena sotto la superficie stessa

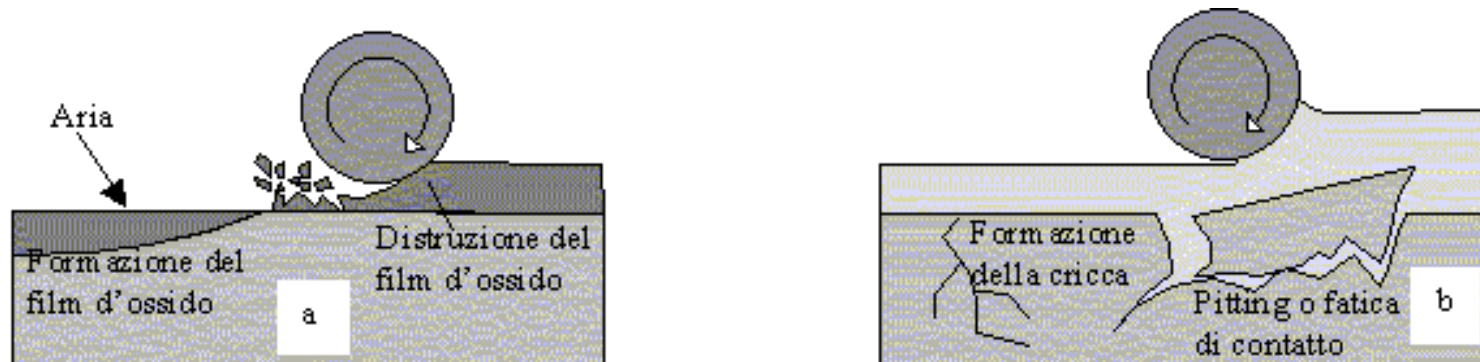


Usura a fatica

- Vicino alla superficie si ha che la struttura della grana viene sottoposta a trazione e orientata parallelamente alla superficie usurante.
- Questa deformazione è causata dalle forze di attrito quindi ovviamente con un basso coefficiente di attrito, come quando si ha una buona lubrificazione questo fenomeno è minore o assente.
- La deformazione indotta dallo scorrimento porta eventualmente alla rottura della struttura cristallina originale sulla superficie e quindi alla formazione di dislocazioni.
- Questo fatto a seguito di deformazioni successive porta alla formazione di cricche e quindi alla frattura.

Usura a fatica

- Durante il rotolamento gli sforzi di contatto locali sono molto elevati, concentrati su una piccola area e ripetitivi; il meccanismo di usura è determinato per lo più dalle caratteristiche del materiale e dalle condizioni operative.
- Per i metalli si possono avere generalmente due casi:
 - In assenza di lubrificazione l'usura dei metalli o di altri solidi ossidabili procede per frammentazione ciclica del film d'ossido e la sua susseguente riformazione
 - Quando si ha lubrificazione l'usura procede a fatica con formazione di cricche superficiali ed eventualmente di particelle di usura staccate dalla superficie



Usura corrosiva ed ossidativa

- L'usura corrosiva ed ossidativa hanno luogo in un'ampia varietà di situazioni sia in presenza che in assenza di lubrificazione.
- La causa fondamentale di queste forme di usura è una reazione chimica tra il materiale eroso ed un agente corrosivo che può essere un reagente chimico, un lubrificante reattivo, o anche l'aria.
- Usura corrosiva è un termine generico riferito ad ogni forma di usura dipendente da un processo chimico o corrosivo, mentre usura ossidativa è riferito all'usura causata dall'ossigeno atmosferico.
- Entrambe queste forme di usura hanno in comune la sorprendente caratteristica che una rapida usura è usualmente accompagnata da una diminuzione del coefficiente di attrito. Questo comportamento contrastante di usura ed attrito è molto utile per identificare questo tipo di fenomeno

Usura corrosiva ed ossidativa

- Nello studio di questi tipi di usura si deve quindi cercare di capire se questi fenomeni di danneggiamento sono in qualche modo benigni per il componente (per la diminuzione del coefficiente d'attrito) oppure se portino alla sua immediata rottura; in quest'ultimo caso si deve comprendere come l'usura corrosiva ed ossidativa possano essere controllate.

Fretting wear e meccanismi di usura minori

- Il fenomeno del fretting si ha ogni qual volta scorrimenti alternativi di piccola ampiezza tra due superfici in contatto avvengono per un gran numero di cicli.
- Questo porta a due forme di danneggiamento: usura superficiale e deterioramento a fatica.
- L'estensione dell'usura e del danneggiamento superficiale è molto più grande di quanto faccia pensare l'ordine di grandezza delle distanze di scorrimento.
- Movimenti reciproci di ampiezza piccola (anche 0.1 micrometri) possono portare alla rottura del componente quando lo scorrimento è continuato per un milione di cicli o più

Fretting wear e meccanismi di usura minori

- Contatti che sembrano essere privi di movimenti relativi, come connessioni ad interferenza, permettono movimenti relativi dell'ordine dei nanometri quando sono applicati carichi alternati e oscillanti.
- Tali movimenti sono molto difficili da eliminare e il risultato a cui portano è il fretting.
- Usura e fatica da fretting sono presenti in quasi tutte le macchine e sono la causa della rottura di diversi componenti robusti.
- Una delle caratteristiche fondamentali del fretting è che i detriti prodotti dall'usura sono spesso trattenuti all'interno della zona di contatto a causa della piccola ampiezza dello scorrimento.
- L'accumulo di detriti separa gradualmente le due superfici e, in alcuni casi, può contribuire ad accelerare il processo.
- Il fenomeno del fretting può essere accelerato ulteriormente dalla corrosione, dalla temperatura e da altri effetti

Fretting wear e meccanismi di usura minori

- I meccanismi più comuni di usura che sono classificati come minori sono: usura-fusione, usura dovuta a scariche elettriche, usura-diffusione e usura da impatto.
- Con tecnologie odierne questi meccanismi si osservano piuttosto raramente o in un piccolo numero di casi così che questi fenomeni non sono molto conosciuti, ma con le innovazioni delle tecnologie, questi meccanismi di usura assumono una grossa importanza.
- Per esempio l'usura-fusione è un risultato diretto delle temperature raggiunte per attrito ed è molto più comune di quanto si creda.
- Questa sorprendentemente non è una forma di usura particolarmente distruttiva ed è associata a coefficienti d'attrito moderati.

Fretting wear e meccanismi di usura minori

- L'usura dovuta a scariche elettriche ha luogo nei motori elettrici e nei contatti dei cavi dei pantografi; questa è una forma di usura particolare, ma molto importante.
- L'usura-diffusione si verifica quando due materiali diversi sono in contatto ad alta temperatura per attrito, e quindi della materia diffonde da un corpo all'altro.
- Un classico esempio di questo tipo di usura lo si osserva sugli utensili da taglio quando c'è una temperatura sufficientemente alta da facilitare la diffusione.
- L'usura ad impatto si ottiene quando un componente impatta o martella contro un altro, nelle trivelle rotanti e martellanti che tagliano le rocce ad alta frequenza di martellamento, o anche nei contatti elettrici come i relè dove si ha l'impatto tra due componenti.

Selezione di materiali

- La selezione dei materiali è una fase del processo di progettazione di qualsiasi oggetto fisico.
- Nel contesto della progettazione dei prodotti, l'obiettivo principale della selezione dei materiali è ridurre al minimo i costi rispettando gli obiettivi di prestazione del prodotto.
- La selezione sistematica del materiale migliore (o ottimale) per una data applicazione inizia dalle proprietà e dai costi dei materiali candidati.

Selezione dei materiali

- La selezione del materiale è spesso aiutata dall'uso di un indice di materiale o di un indice di prestazione corrispondente alle proprietà del materiale desiderate.
- Ad esempio, una coperta termica dovrebbe avere una bassa conduttività termica per ridurre al minimo il trasferimento di calore per una data differenza di temperatura.
- È essenziale che un progettista abbia una conoscenza approfondita delle proprietà dei materiali e del loro comportamento nelle condizioni di lavoro.
- Alcune delle caratteristiche importanti dei materiali sono: robustezza, durata, flessibilità, densità, resistenza al calore e alla corrosione, idoneità a essere colata, saldata o temperata, lavorabilità, conduttività elettrica, ecc.

Selezione dei materiali

- La selezione sistematica dei candidati che richiedono diversi criteri è più complessa.
- Ad esempio, quando il materiale deve essere sia rigido che leggero, per una canna una combinazione di alto modulo di Young e bassa densità indica il materiale migliore, mentre per una piastra la radice cubica di rigidità divisa per densità è il miglior indicatore, perché la rigidità alla flessione di una piastra varia con il suo spessore cubico.

Diagrammi di Ashby

- Un grafico di Ashby, dal nome di Michael Ashby dell'Università di Cambridge, è una nuvola di punti che mostra almeno due proprietà di molti materiali o classi di materiali.
- Questi grafici sono utili per confrontare la relazione tra diverse proprietà.
- Per l'esempio di parte rigido / leggero discusso sopra, il modulo di Young su un asse e la densità sull'altro asse, con un punto dati sul grafico per ciascun materiale candidato.
- Su un layout del genere è facile trovare non solo il materiale con la maggiore rigidità, o quello con la densità più bassa, ma quello con il miglior rapporto.
- L'utilizzo di una scala logaritmica su entrambi gli assi semplifica la selezione del materiale con la migliore rigidità della piastra.

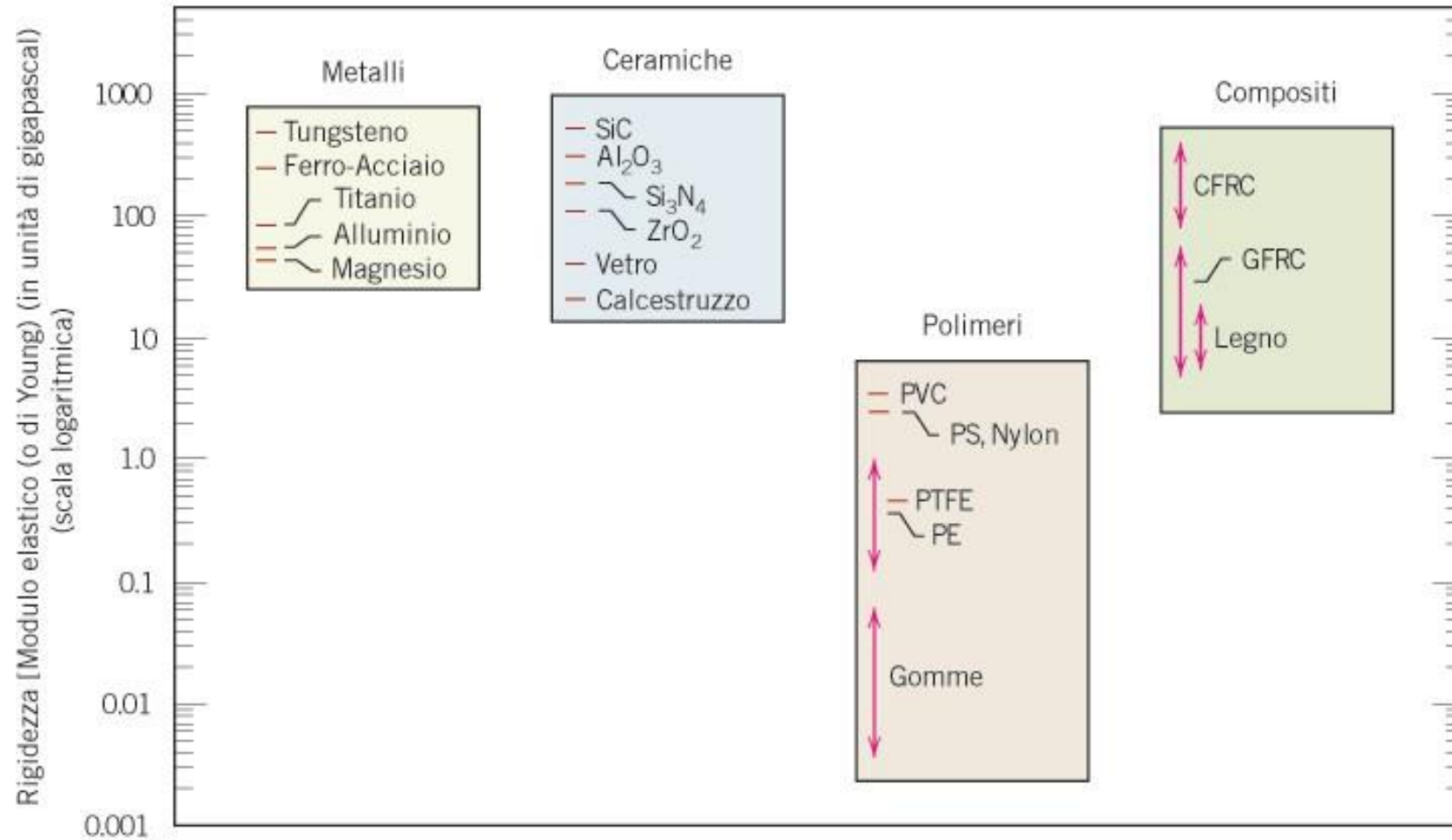
Metodo generale di utilizzo di un grafico Ashby

- L'utilizzo di un grafico Ashby è un metodo comune per scegliere il materiale appropriato.
- Innanzitutto, vengono identificati tre diversi set di variabili:
 - Le variabili del materiale sono le proprietà intrinseche (o intrinseche) di un materiale come densità, modulo, carico di snervamento e molti altri.
 - Le variabili libere sono quantità che possono cambiare durante il ciclo di caricamento, ad esempio la forza applicata.
 - Le variabili di progetto sono limiti imposti al progetto, come lo spessore della trave o la sua deformazione.
- Quindi viene derivata un'equazione per l'indice di prestazione.
- Questa equazione quantifica numericamente quanto sarà desiderabile il materiale per una situazione specifica.
- Per convenzione, un indice di rendimento più elevato denota un materiale migliore.
- Infine, l'indice delle prestazioni viene tracciato sul grafico di Ashby.
- L'ispezione visiva rivela il materiale più desiderabile.

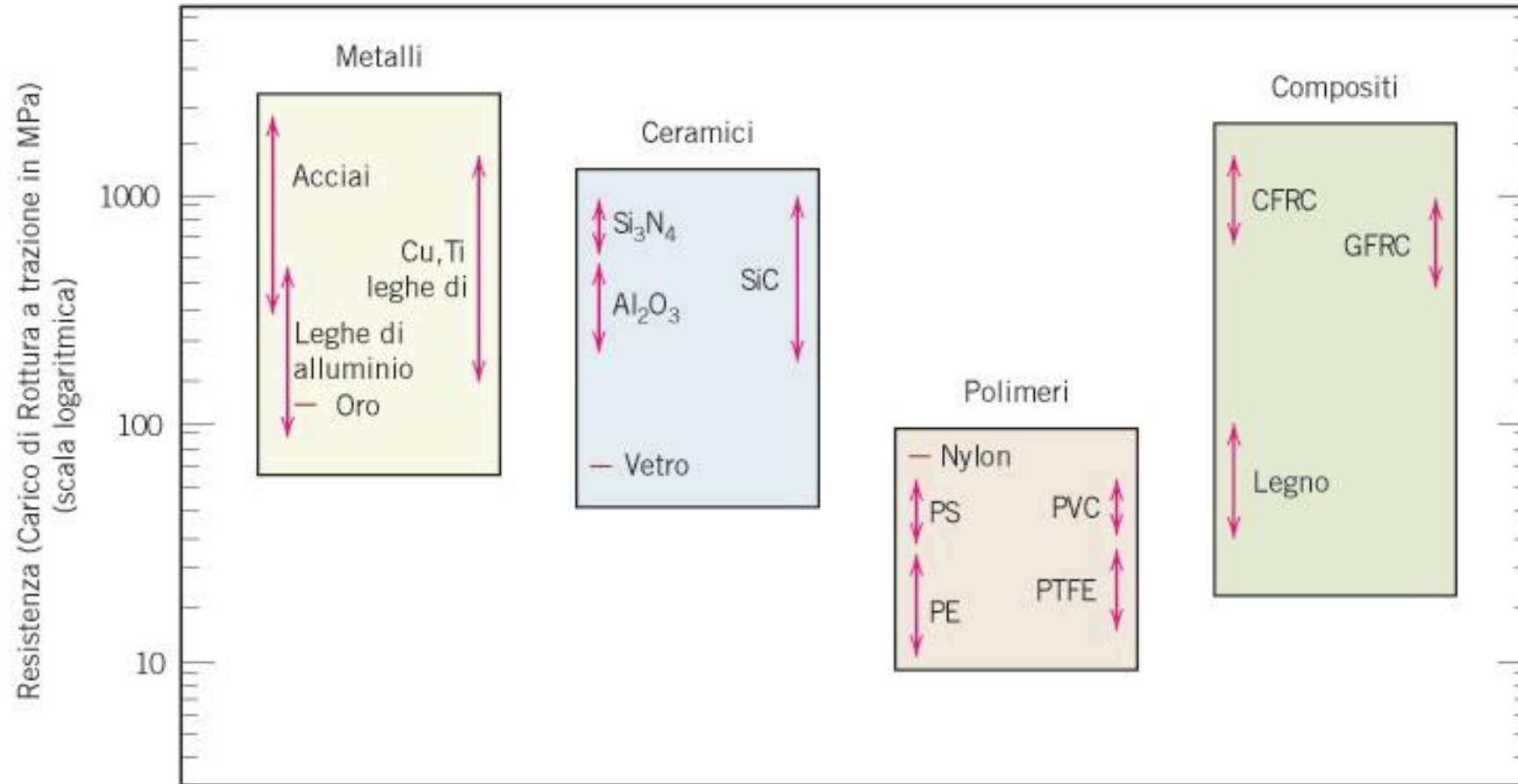
Diagrammi di Ashby

- I gruppi che vengono individuati nei diagrammi di Ashby spesso corrispondono a classi di materiali, come:
 - polimeri, ceramici, metalli;
 - materiali ingegnerizzati (compositi, schiume)
 - materiali naturali (legno, ossa)

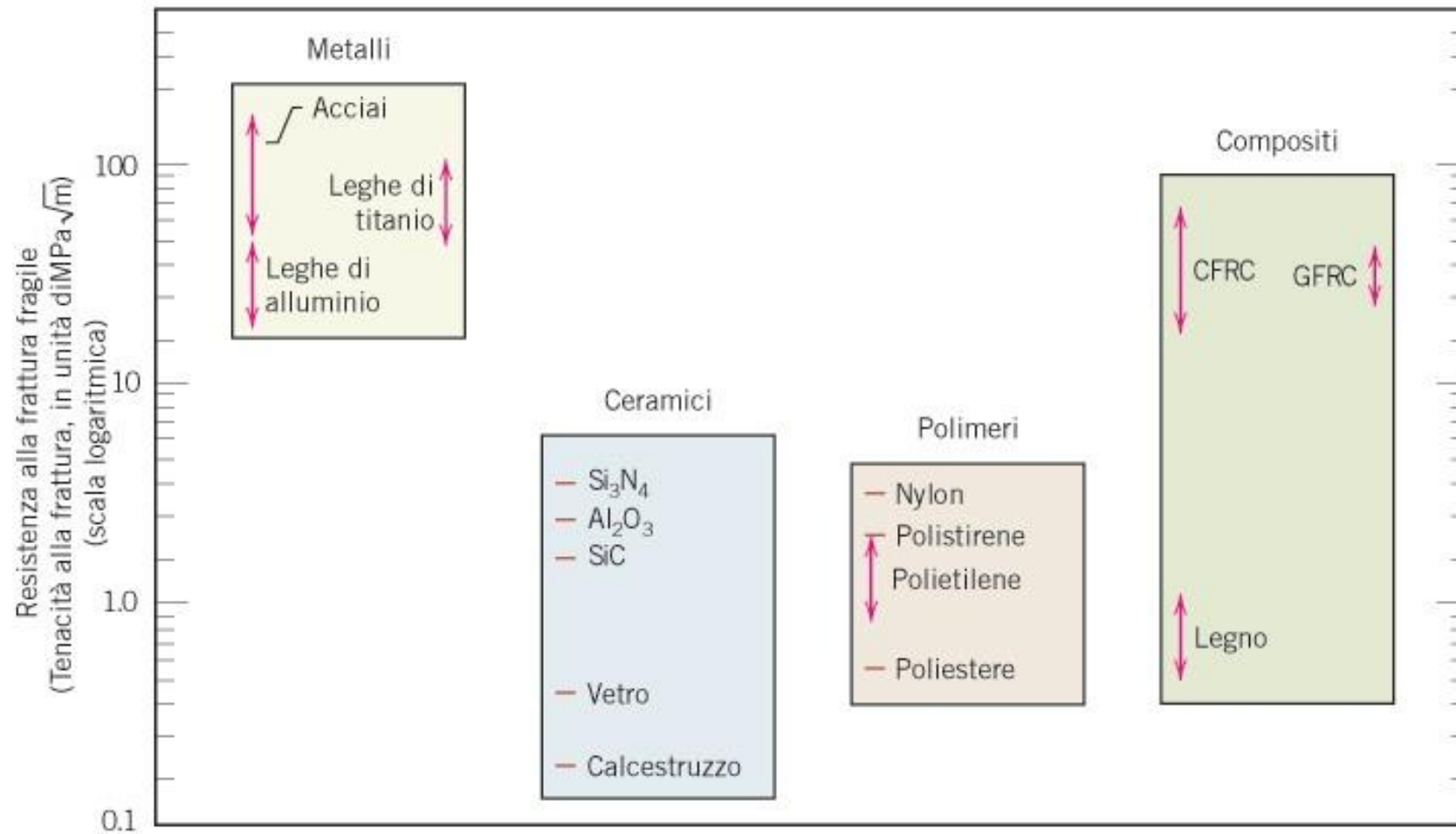
Classificazione dei materiali: modulo elastico E



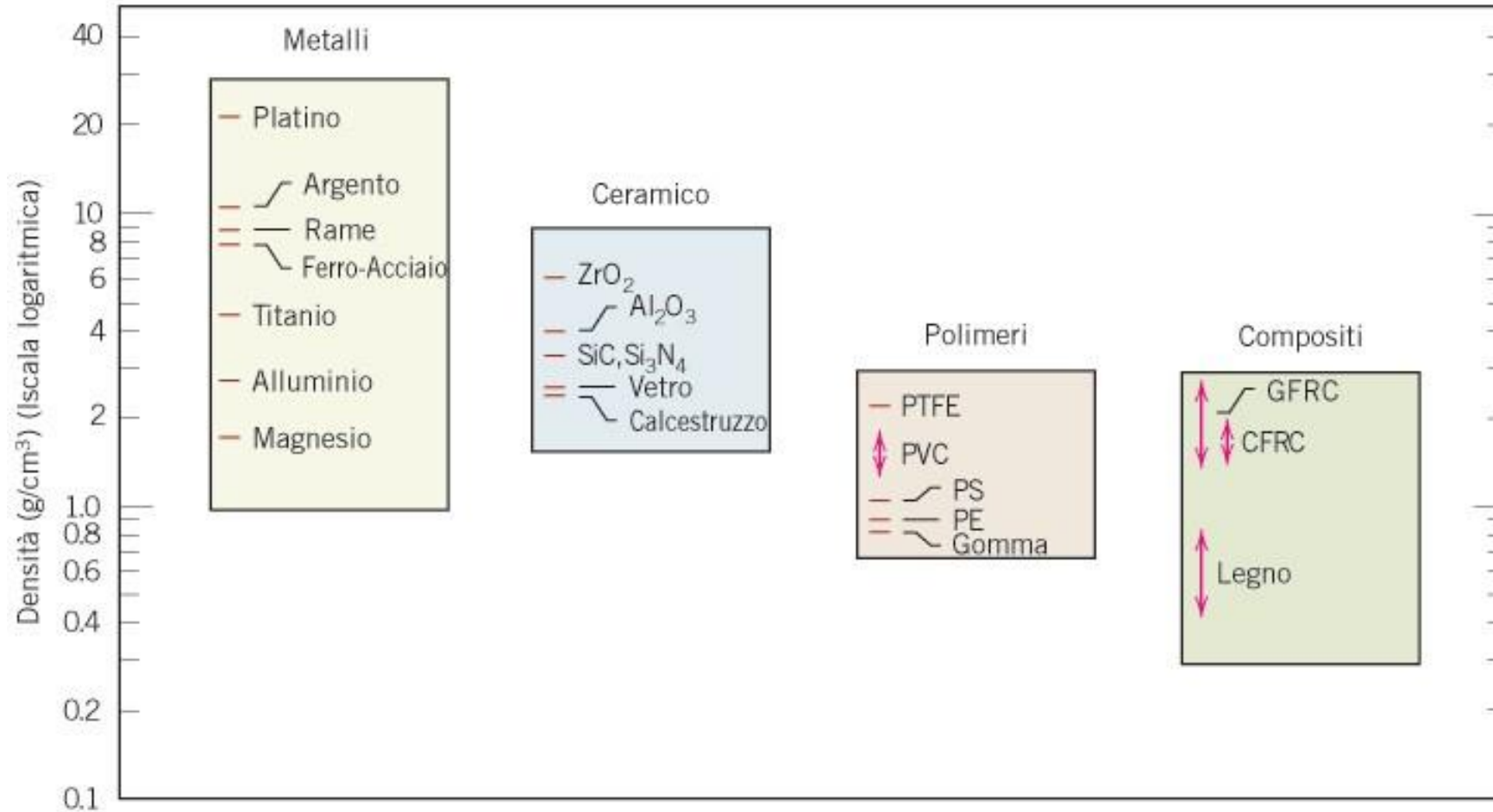
Classificazione dei materiali: carico di rottura



Classificazione dei materiali: fragilità



Classificazione dei materiali: densità



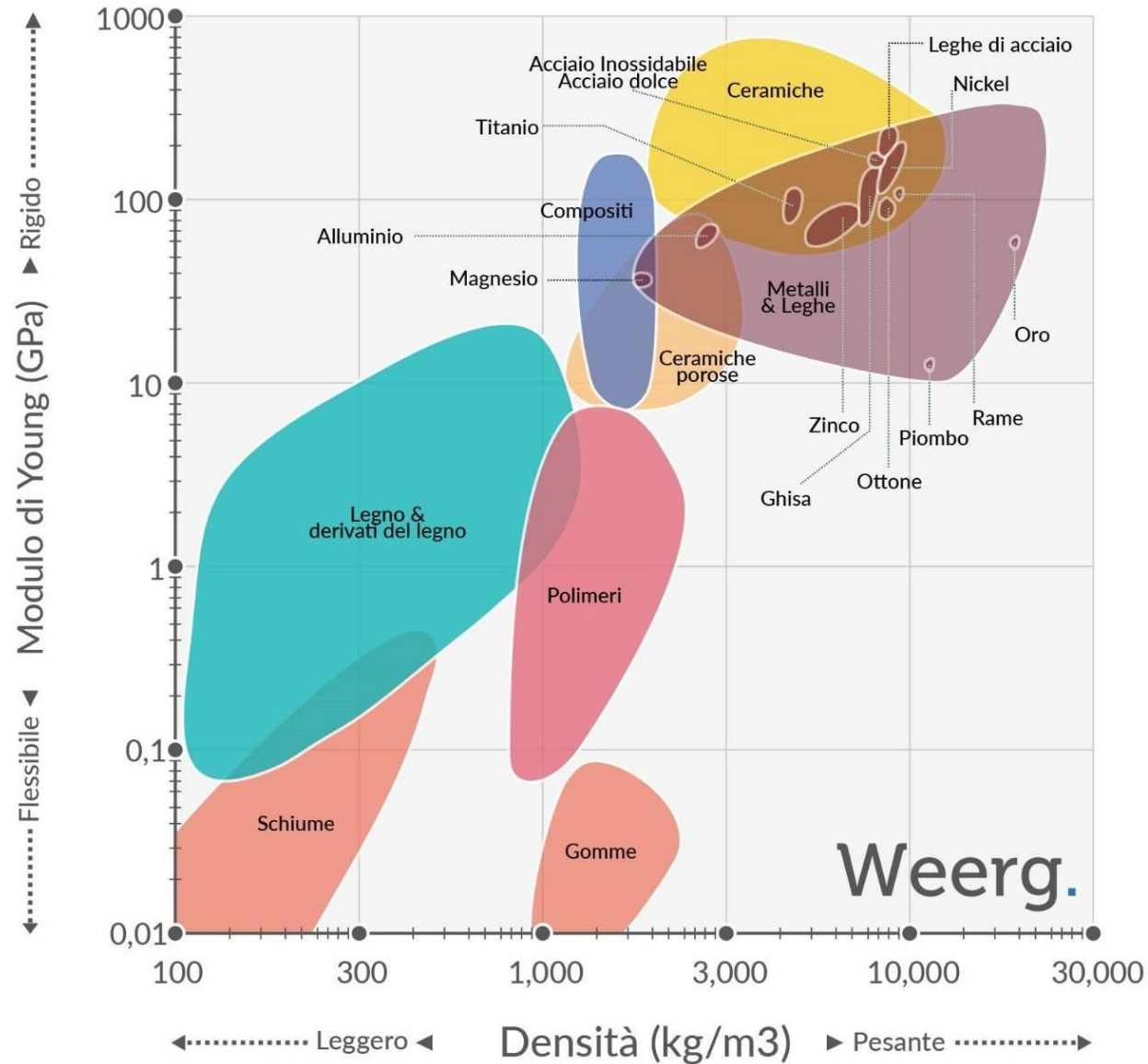


Progettare una tensiostruttura
smontabile e trasportabile

Progetto

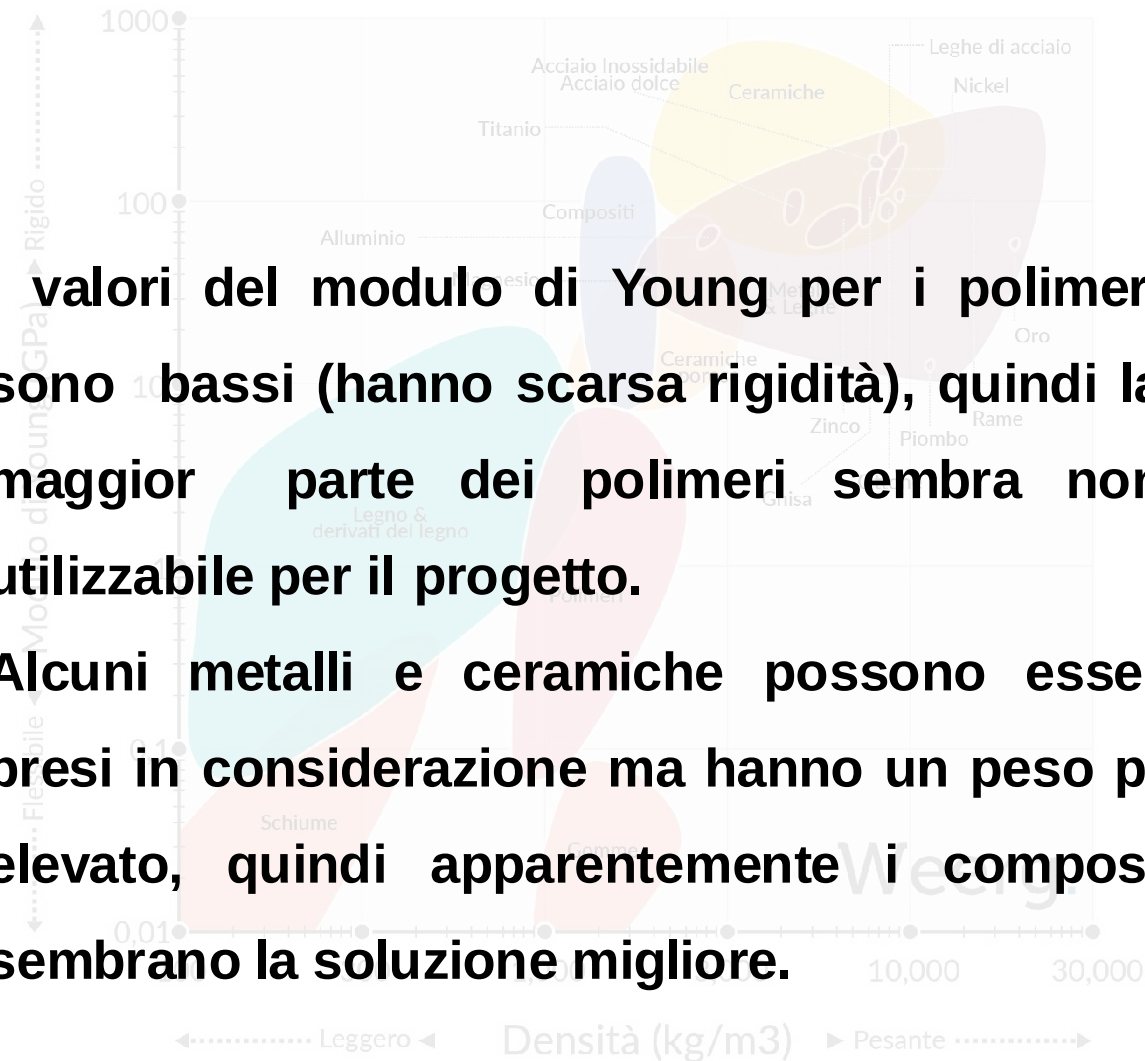
- Requisito della struttura:
 - Componente leggero e rigido allo stesso tempo.
- Quali caratteristiche/proprietà ricerco?
 - Meccaniche
 - Fisiche
 - Chimiche
- Cominciamo con la mappa che mette in relazione “modulo di Young”/”densità”.

Modulo di Young vs Densità

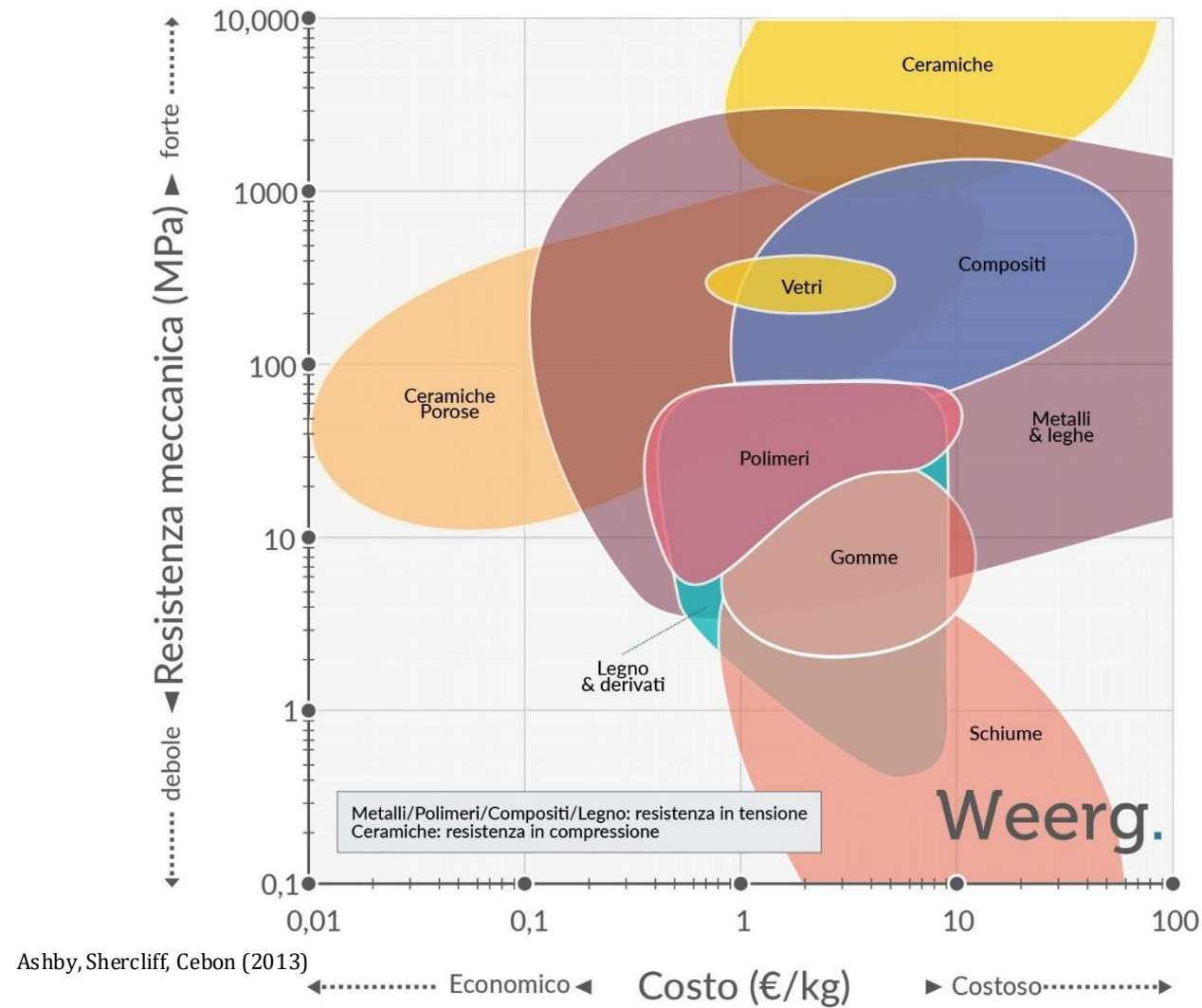


Modulo di Young vs Densità

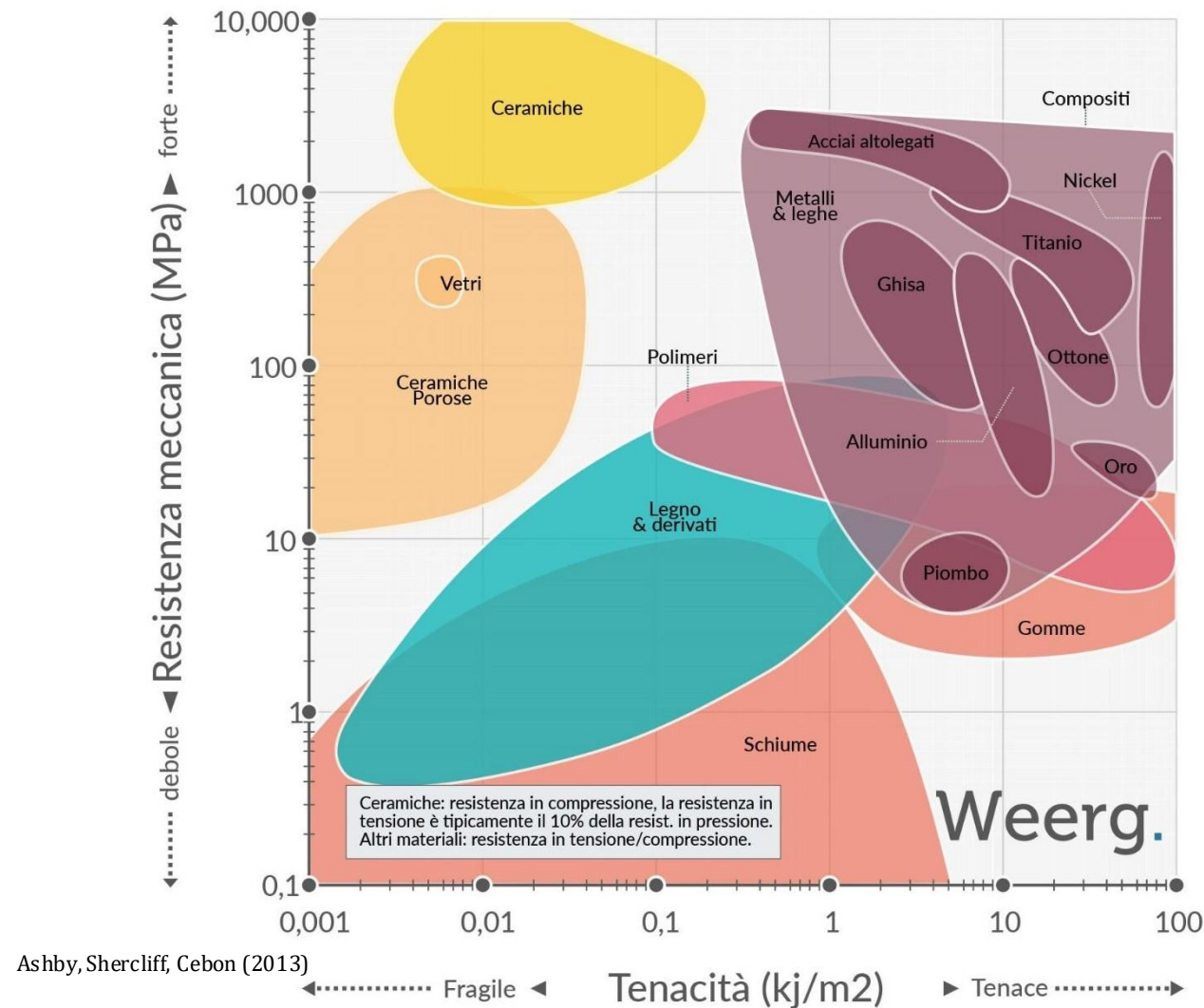
- I valori del modulo di Young per i polimeri sono bassi (hanno scarsa rigidità), quindi la maggior parte dei polimeri sembra non utilizzabile per il progetto.
- Alcuni metalli e ceramiche possono essere presi in considerazione ma hanno un peso più elevato, quindi apparentemente i compositi sembrano la soluzione migliore.



Resistenza meccanica vs Costo

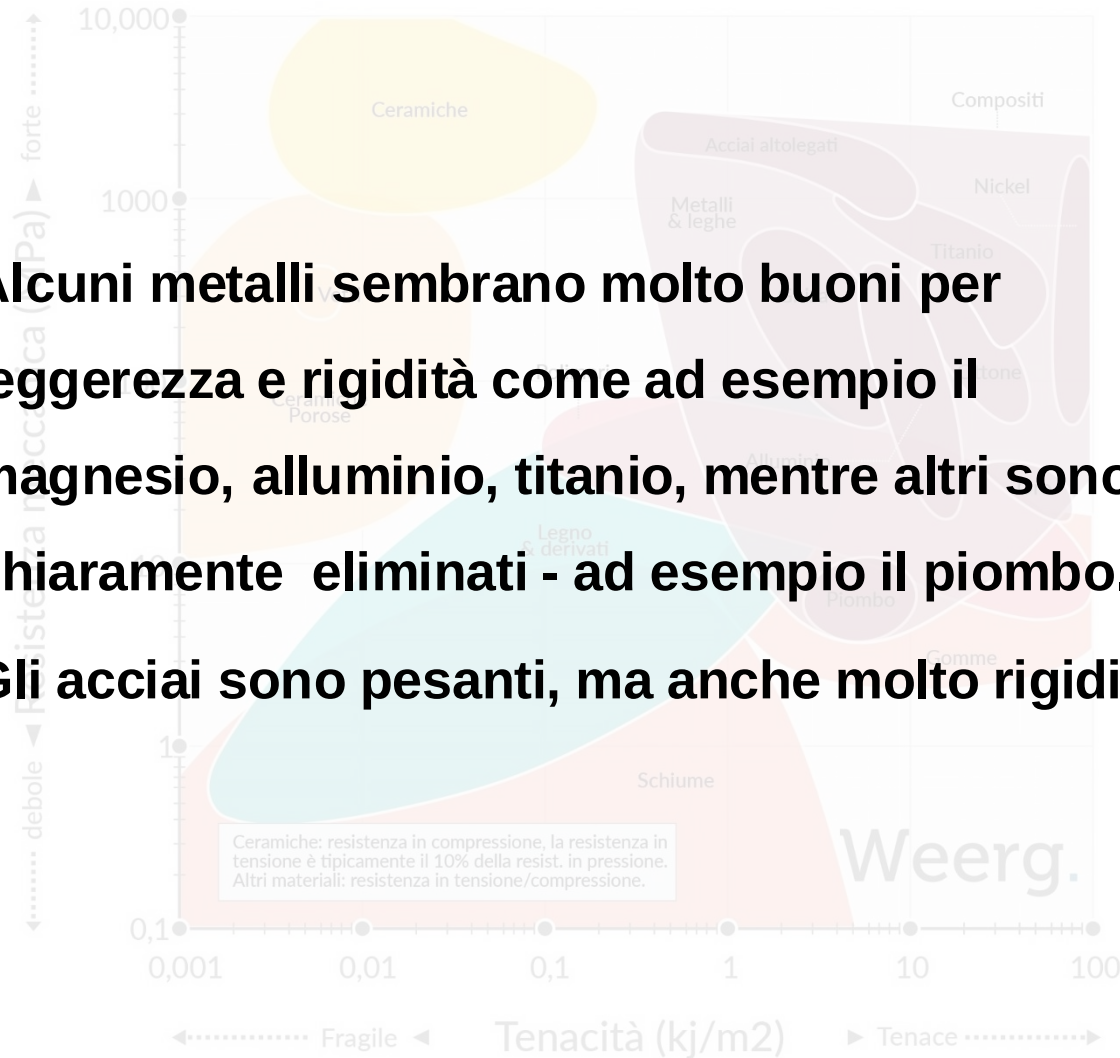


Resistenza meccanica vs Tenacità



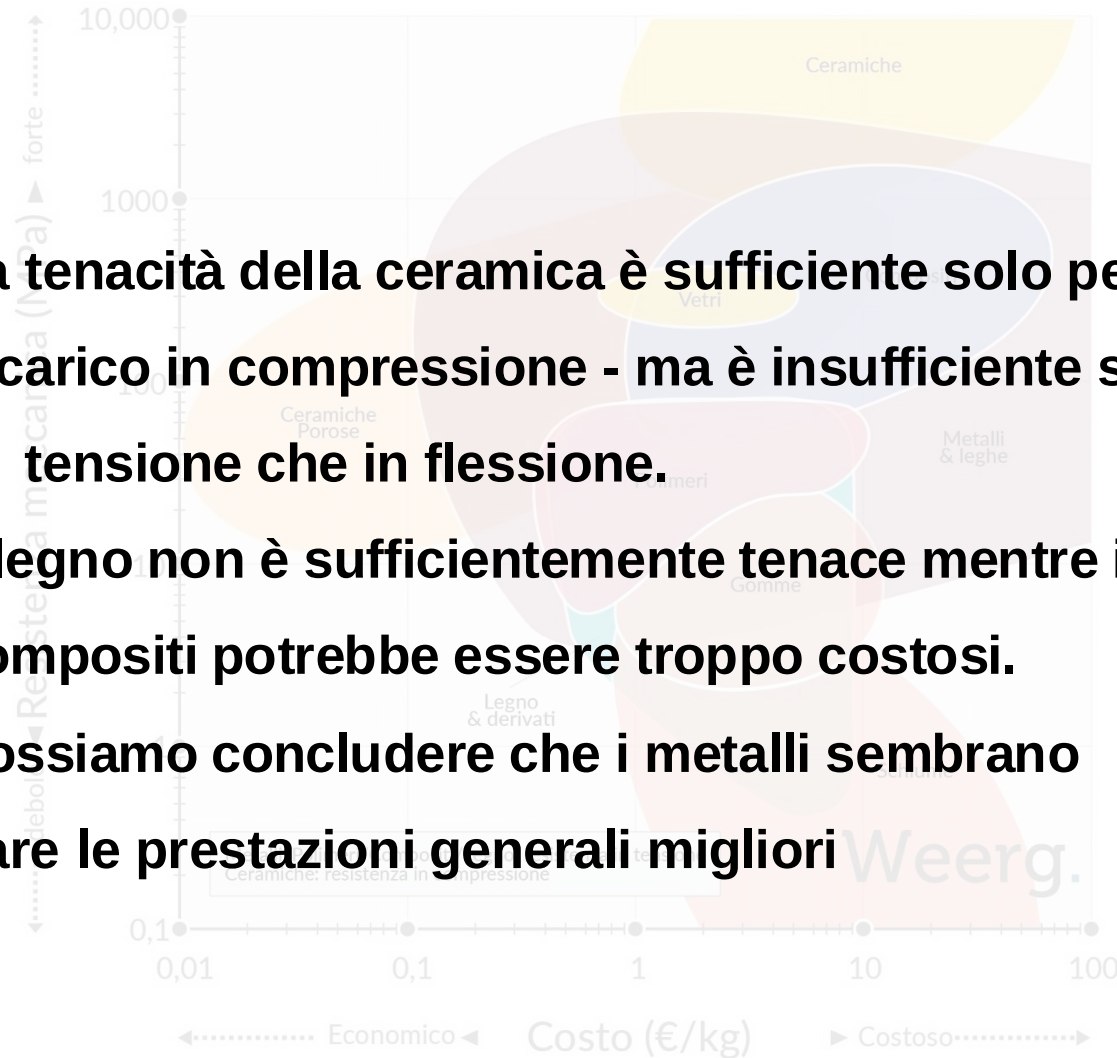
Resistenza meccanica vs Tenacità e costo

- Alcuni metalli sembrano molto buoni per leggerezza e rigidità come ad esempio il magnesio, alluminio, titanio, mentre altri sono chiaramente eliminati - ad esempio il piombo.
- Gli acciai sono pesanti, ma anche molto rigidi.



Resistenza meccanica vs Tenacità e costo

- La tenacità della ceramica è sufficiente solo per il carico in compressione - ma è insufficiente sia in tensione che in flessione.
- Il legno non è sufficientemente tenace mentre i compositi potrebbe essere troppo costosi.
- Possiamo concludere che i metalli sembrano dare le prestazioni generali migliori



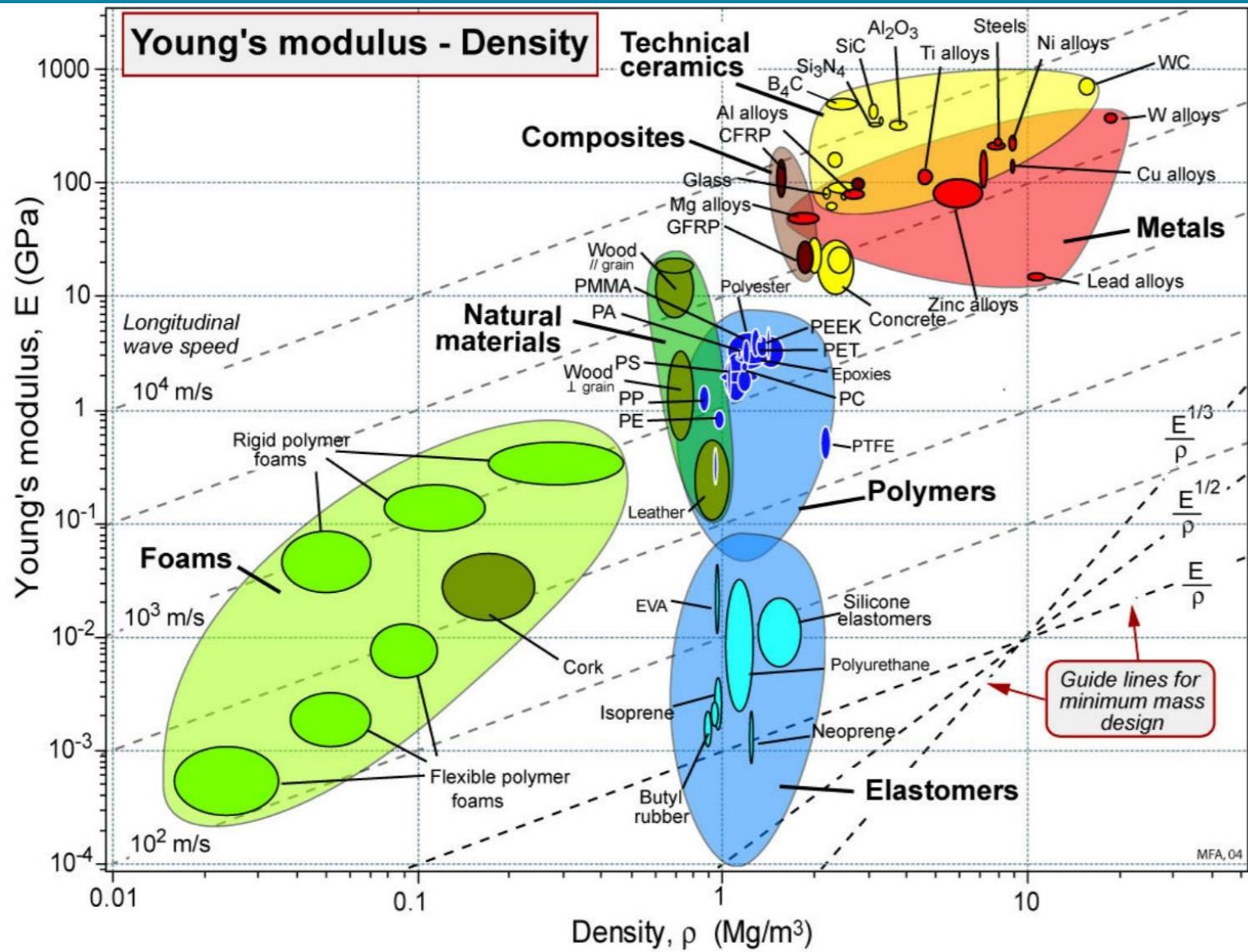


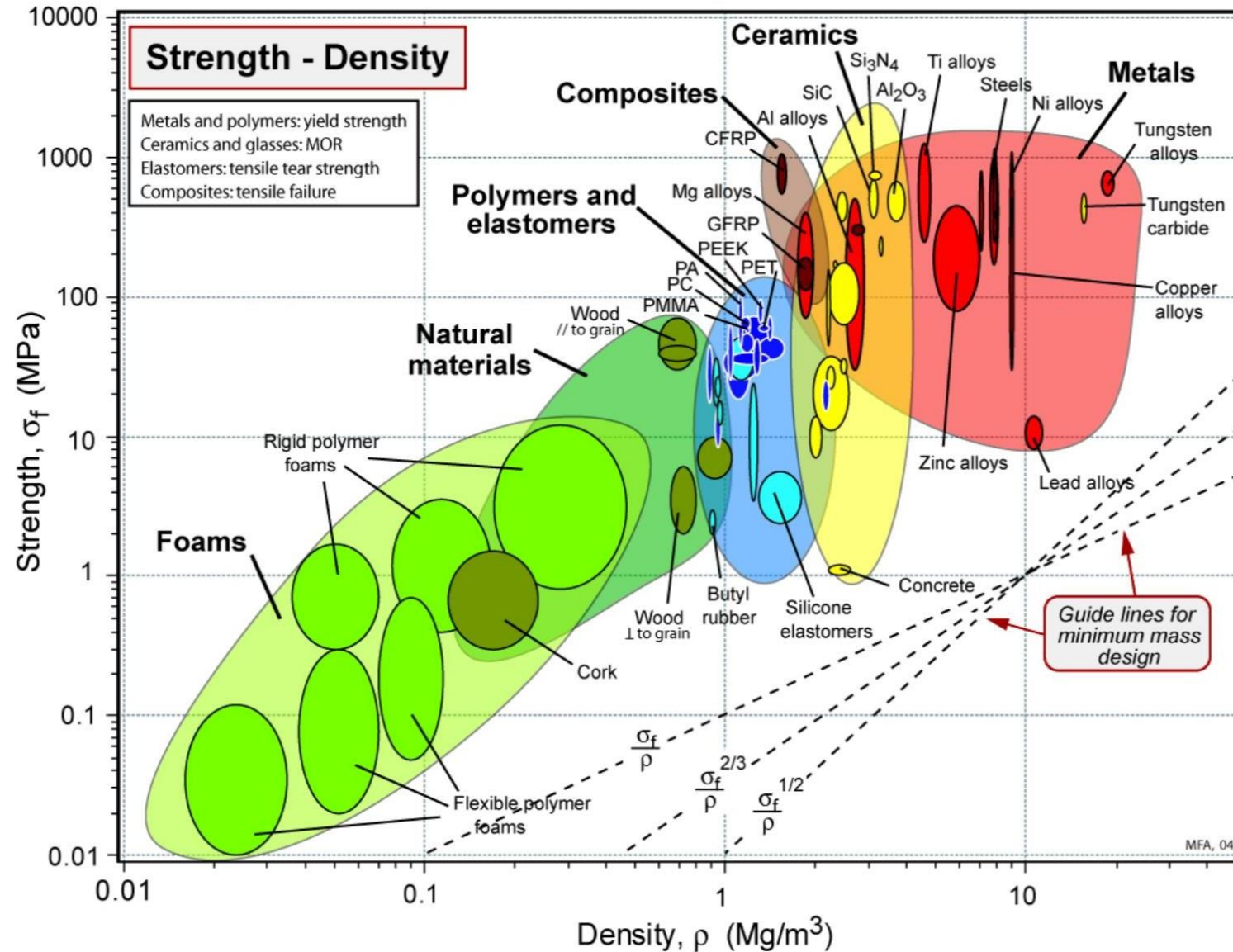
Riassumendo

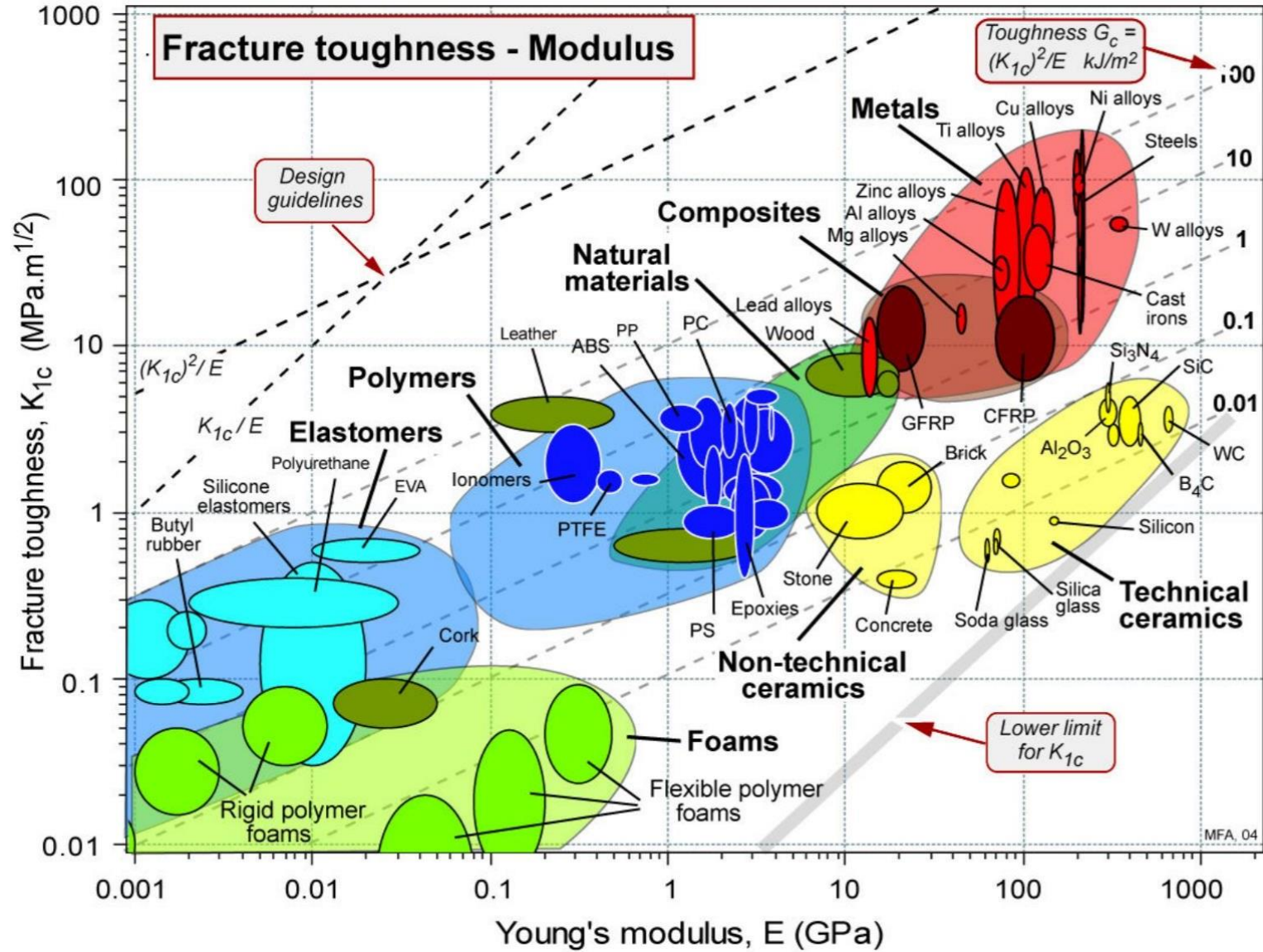
- Confrontando due (o anche più) mappe le proprietà necessarie per soddisfare i principali requisiti di progettazione possono essere valutate rapidamente.
- I grafici possono essere utilizzati per individuare le migliori classi di materiali, e poi per guardare più in dettaglio all'interno di queste classi.
- Ci sono molti altri fattori ancora da considerare, in particolare i metodi di fabbricazione, lo spessore e la forma del componente, le tolleranze ed altro.

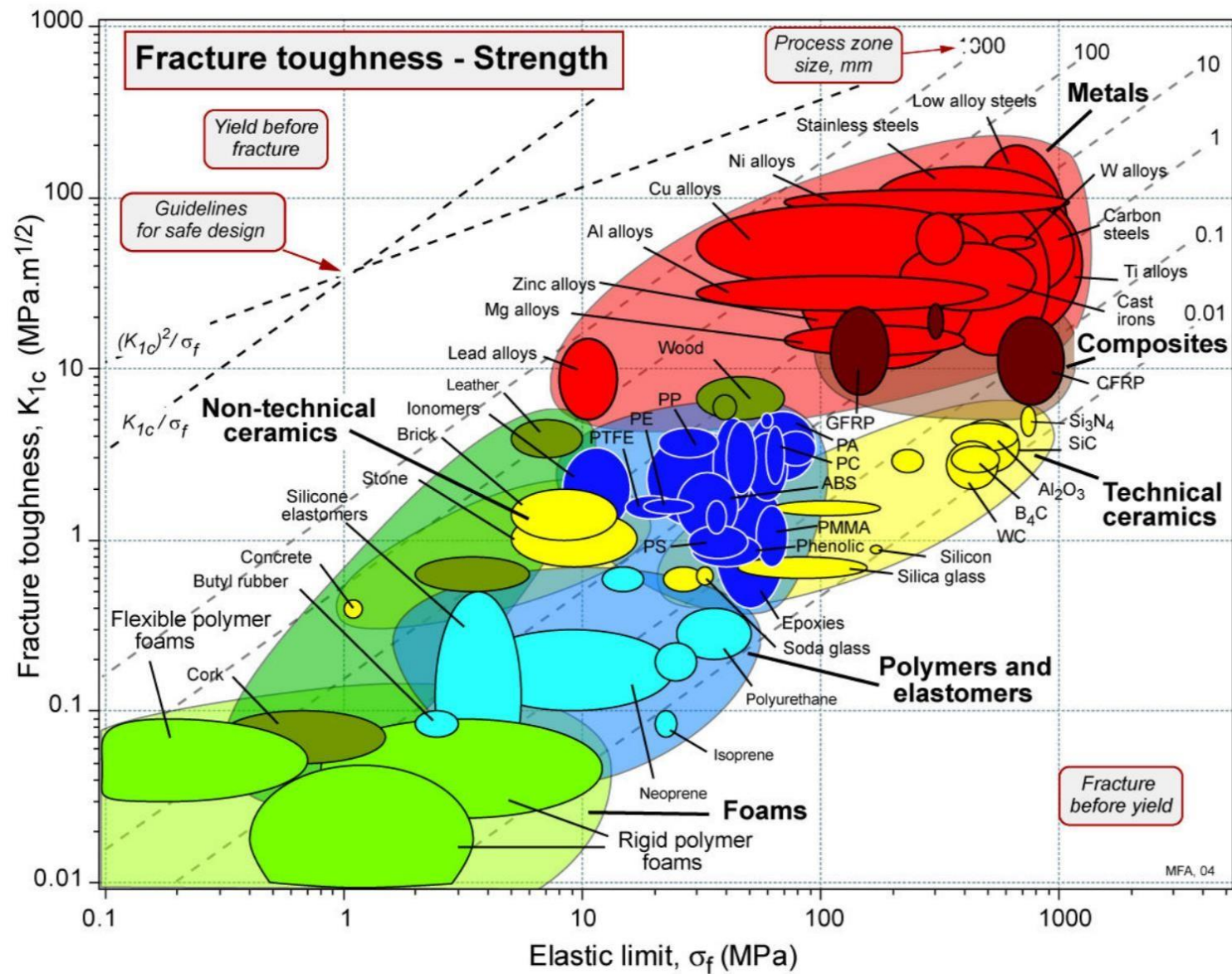
Diagrammi di Ashby

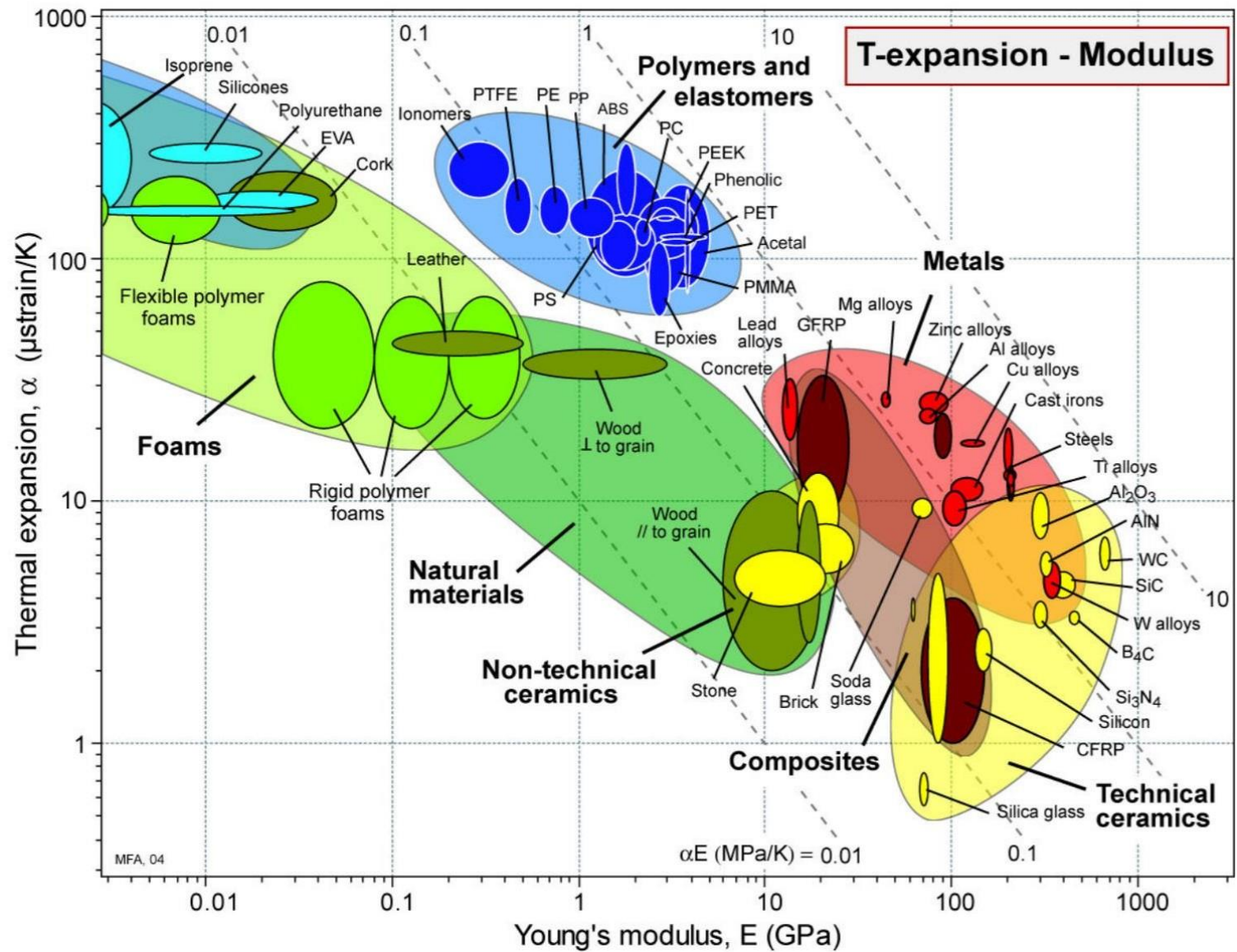
- La progettazione di un elemento strutturale dipende da tre parametri (o gruppi di parametri, detti indice di performance):
 - - Funzionalità (F), Geometria (G) e proprietà del materiale (M)
- Si possono valutare, anche quantitativamente le relazioni tra gli indici, definendo la funzione di performance p:
 - $p=f(F,G,M)$
- Separando la funzione sopra, si può ottenere la funzione p come il prodotto di tre funzioni che dipendano solo dai singoli parametri: $p = f_1(F) * f_2(G) * f_3(M)$

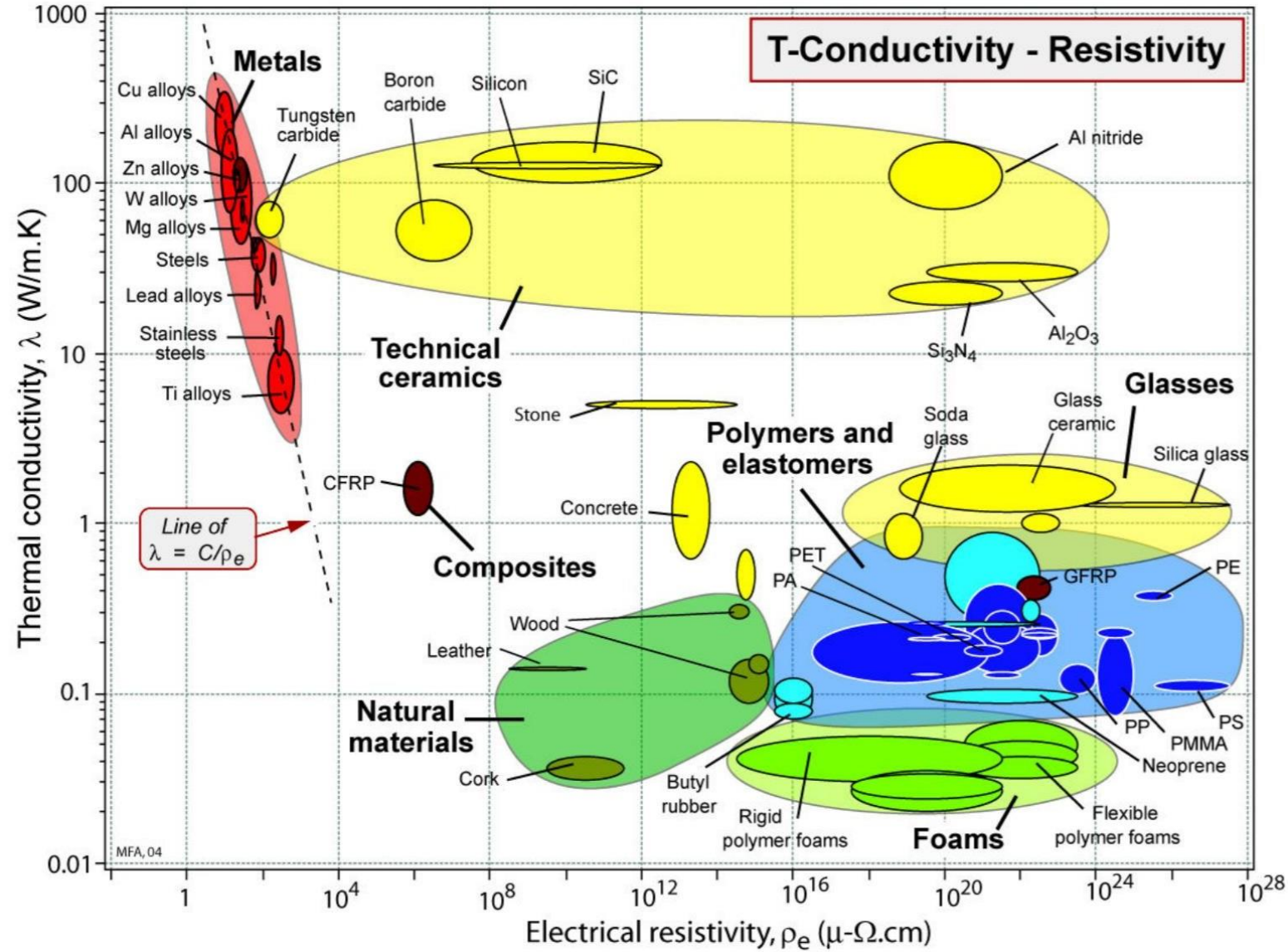






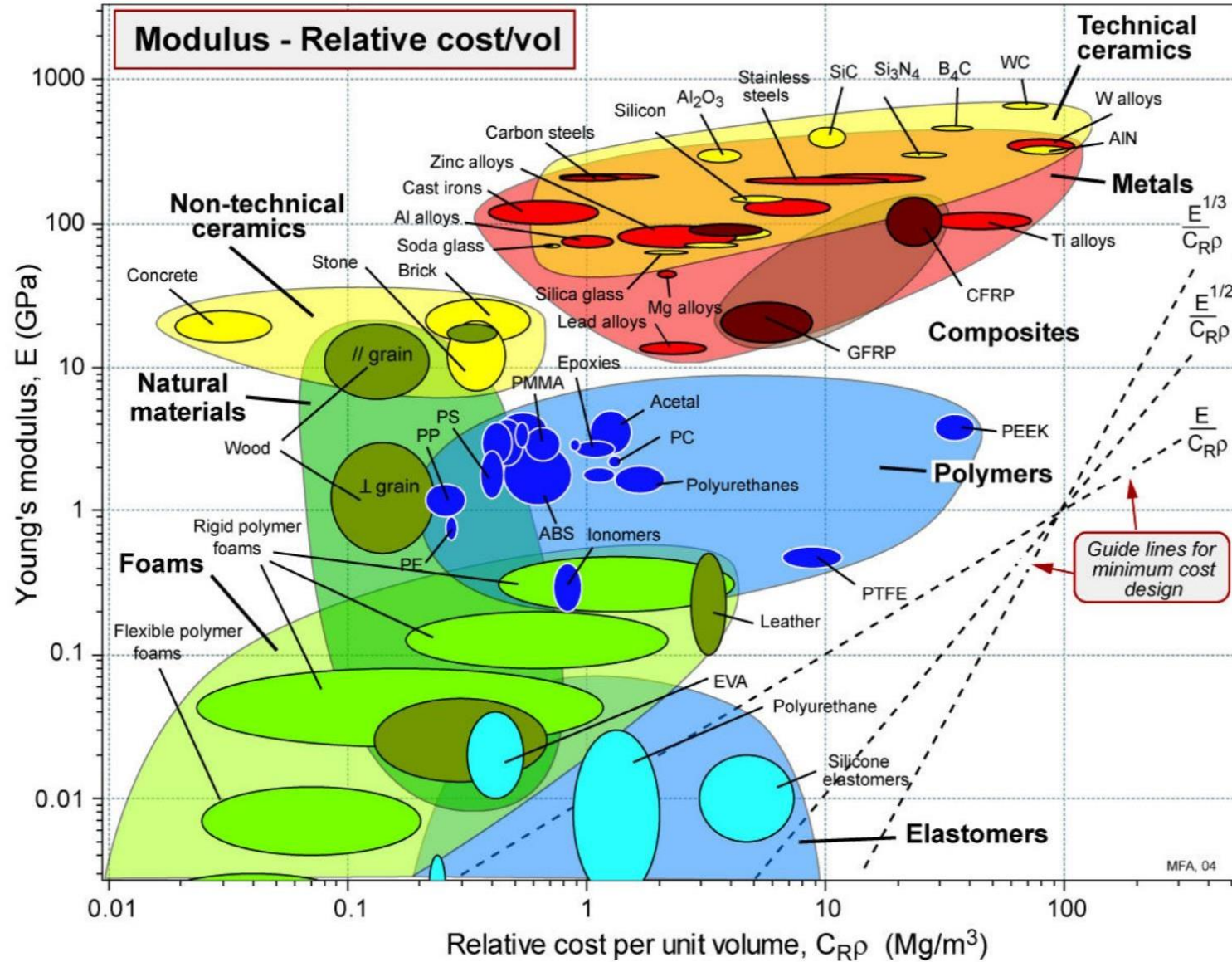


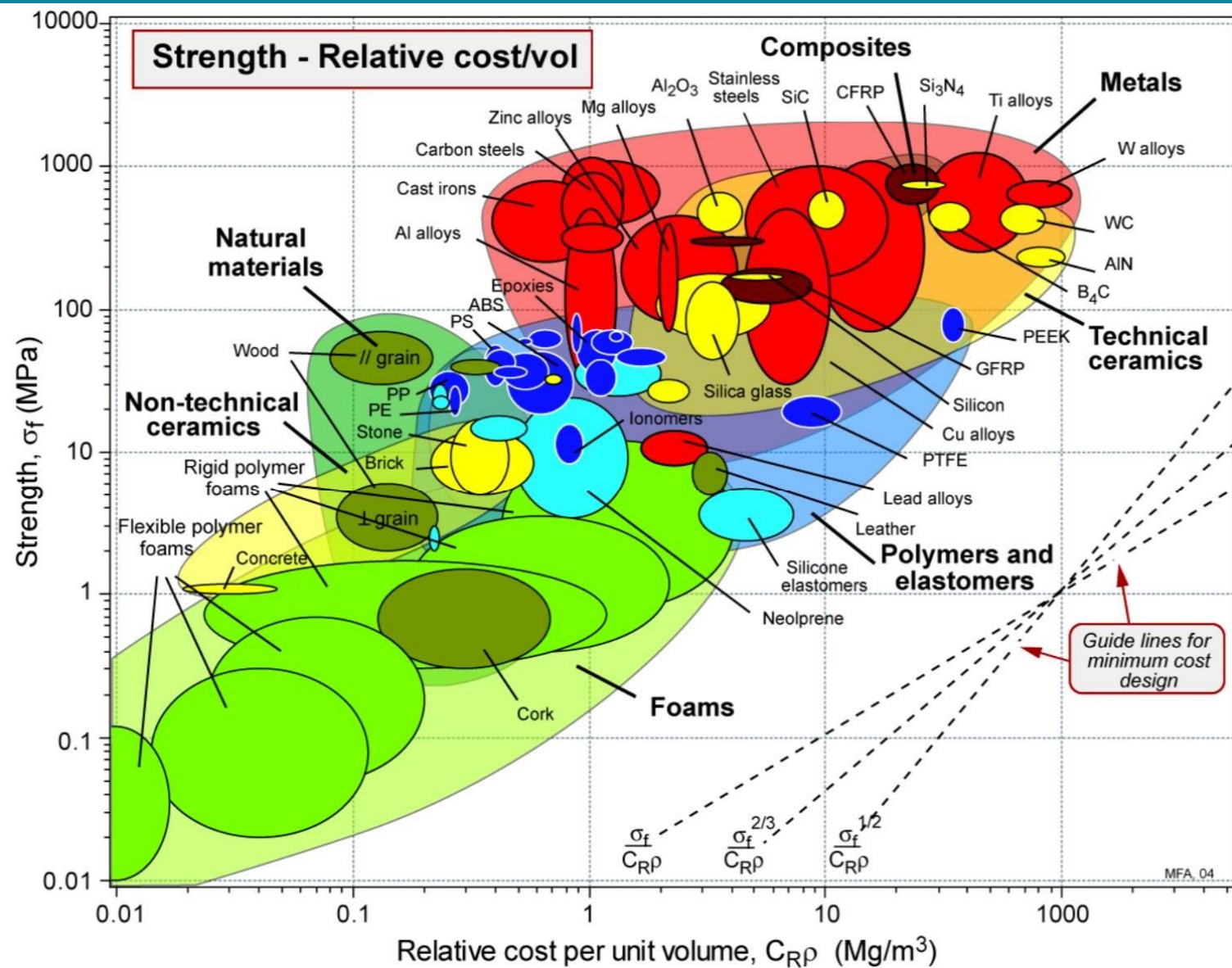




Costi

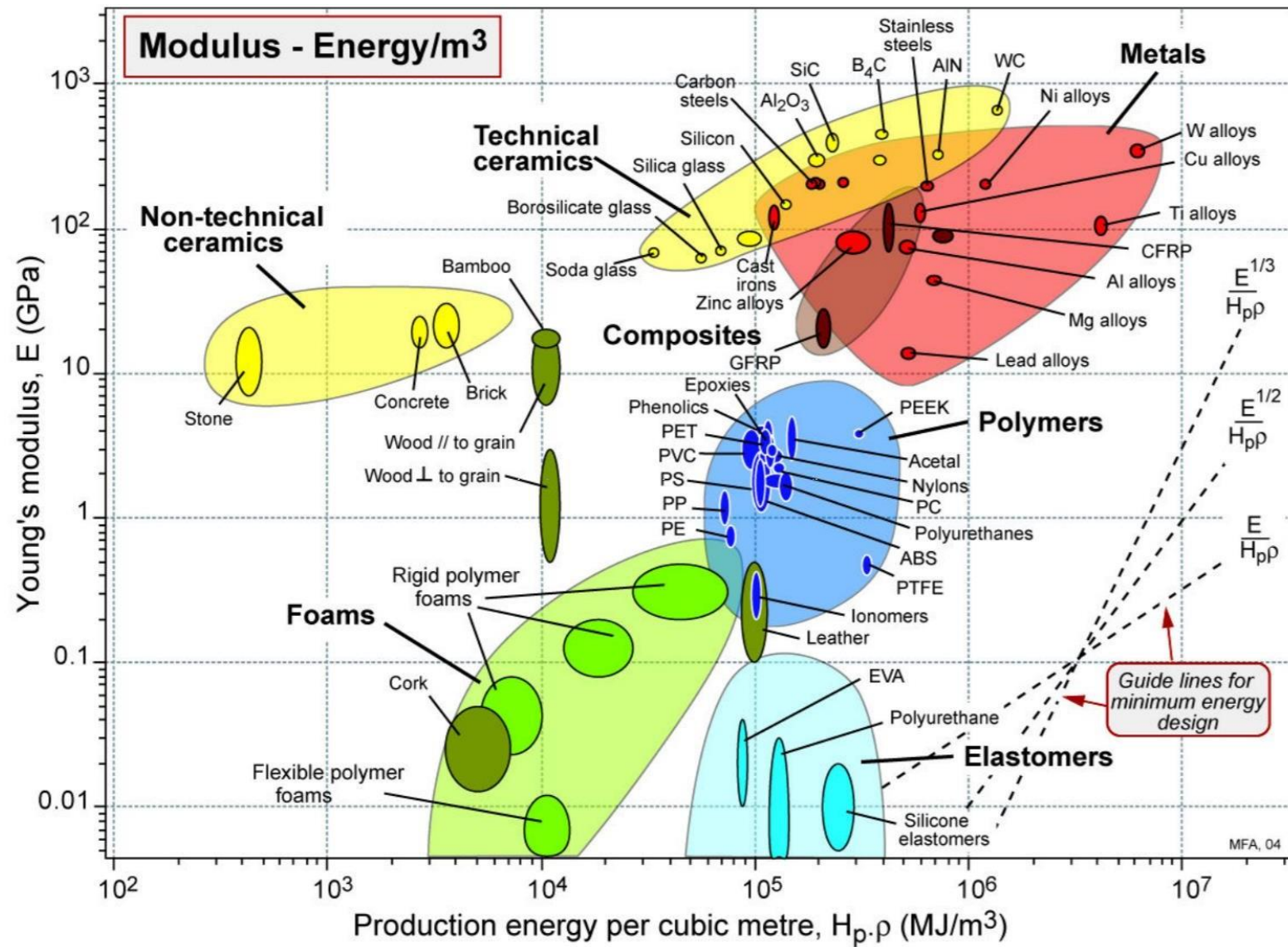


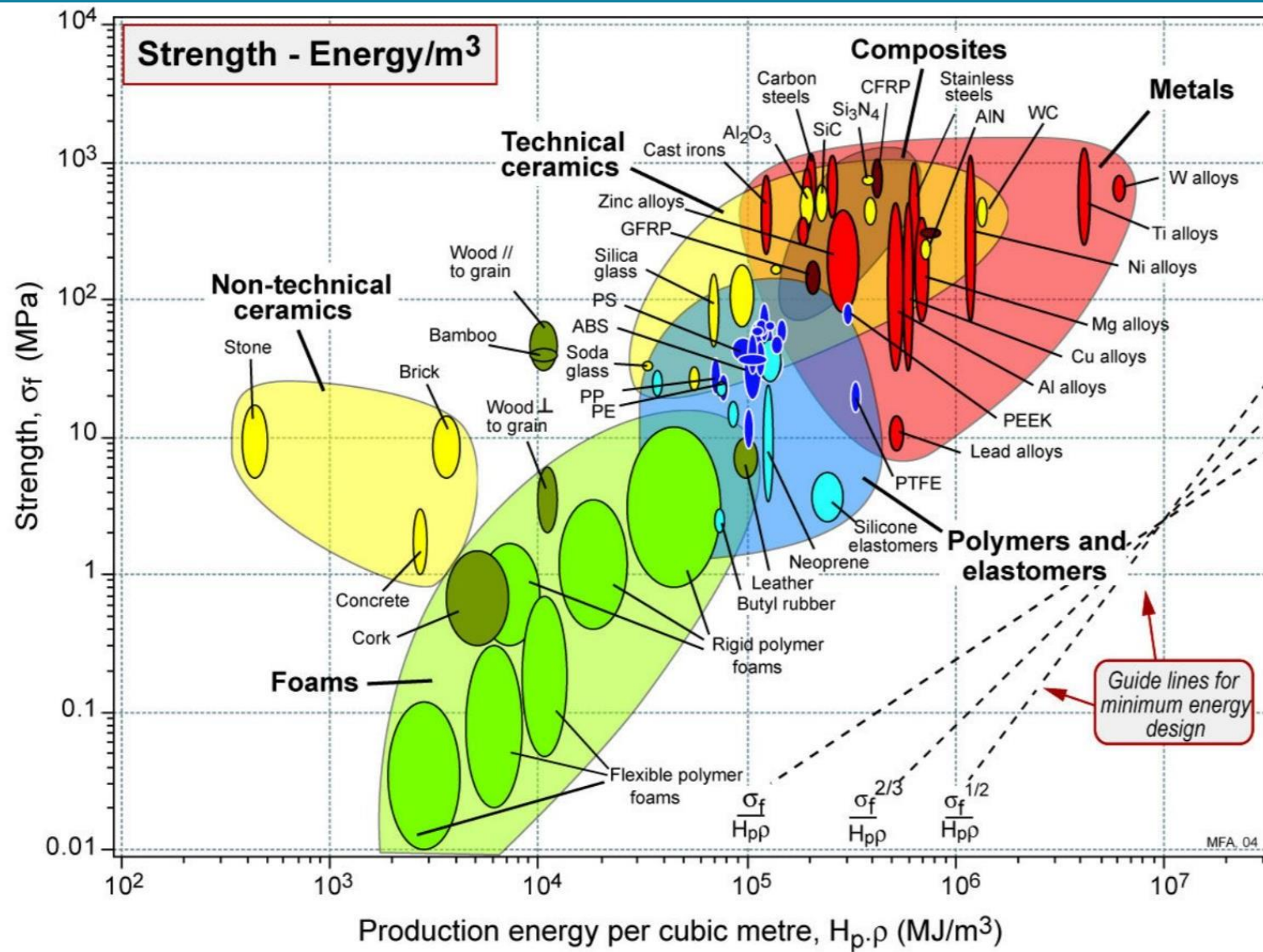




Impatto ambientale







Le plastiche

- Il grande successo delle plastiche risiede nella loro versatilità e nel loro costo; a seconda del polimero scelto si possono ottenere materiali che conciliano diverse caratteristiche come la leggerezza, la resistenza, l'isolamento, l'elasticità, l'inerzia chimica e la lavorabilità.

Applicazioni (1/5)



Serre dell'Eden Project (Cornovaglia)

Water Cube (Pechino)



Applicazioni (2/5)

Nuova sede Regione Lombardia (Milano)

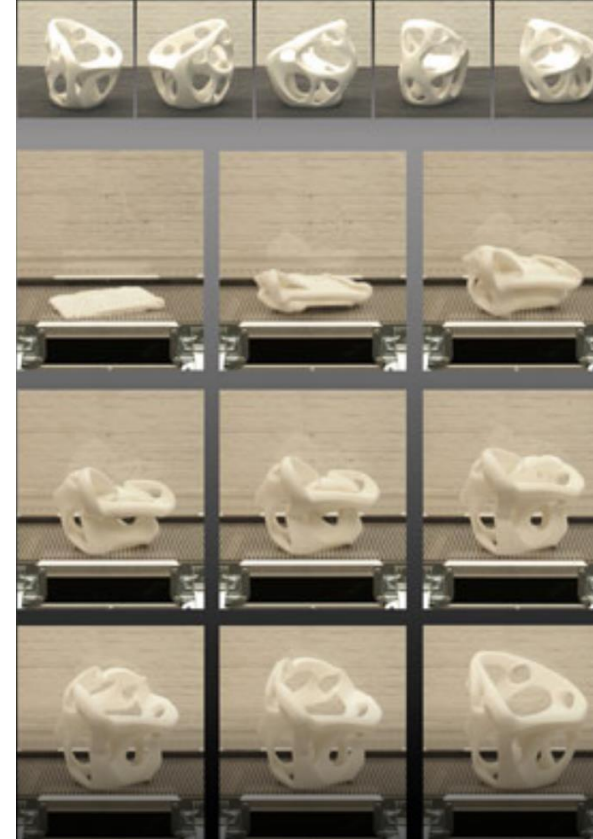


MEDIA ITC (Barcellona)

Applicazioni (3/5)

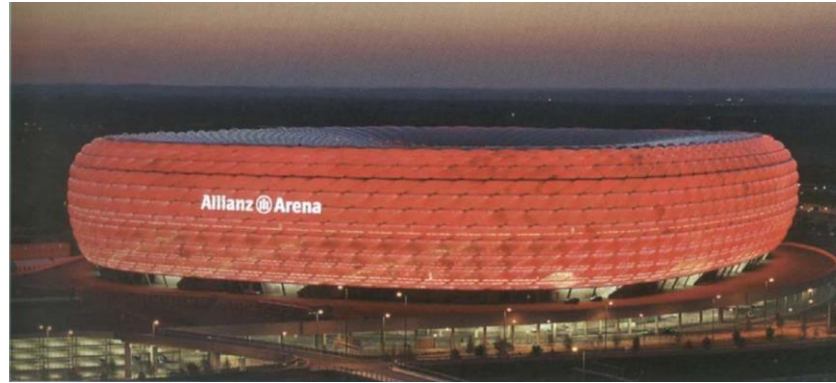


Honeycomb tubolare per l'isolamento dei vetri camera. Produzione Panelite, USA(Foto Panelite).

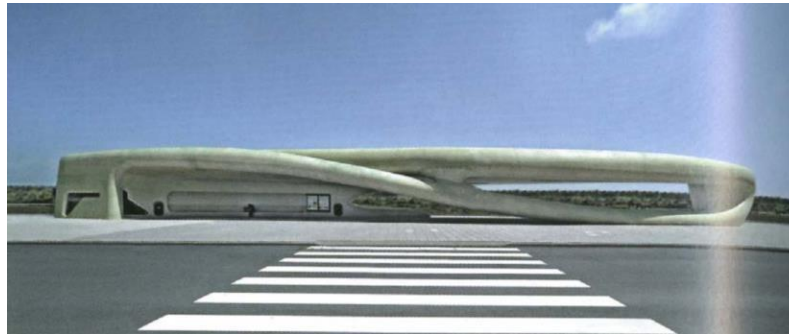


Polimeri a memoria di forma messa a punto dal belga Carl De Smet

Applicazioni (4/5)



Allianz Arena – Monaco, Herzog & De Meuron (2005) - Involucro con cuscini in membrana sintetica (EFTE)

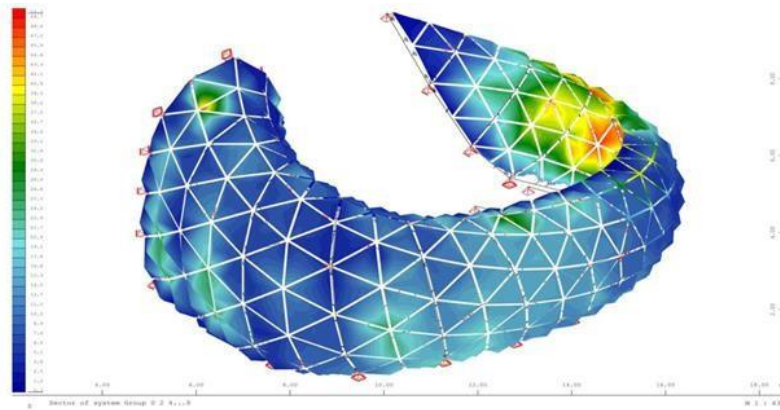


Fermata di autobus, Hoofddorp – Paesi Bassi, Maurice NIO (2003) - Involucro in polistirolo espanso rivestito con poliestere rinforzato in fibra di vetro.

Applicazioni (5/5)



Padiglione ArboSkin (Stoccarda)



National Space
Centre (Leicester)