Università degli Studi di Trieste
Dipartimento di Ingegneria e Architettura
A.A. 2019-2020

Corso di Laurea in Ingegneria Civile ed Ambientale

Corso di Chimica e Tecnologia dei Materiali

Modulo 2: Tecnologia dei Materiali

- Lezione 6: Meccanica della frattura – Fatica – Creep -

Barbara Codan
bcodan@units.it

Dipartimento di Ingegneria e Architettura
Università degli Studi di Trieste

Meccanica della frattura

- **Meccanica della frattura**: Studio della capacità di un materiale di resistere allo stress in presenza di un difetto.

- **Resistenza alla frattura**: La resistenza di un materiale alla rottura in presenza di un difetto.

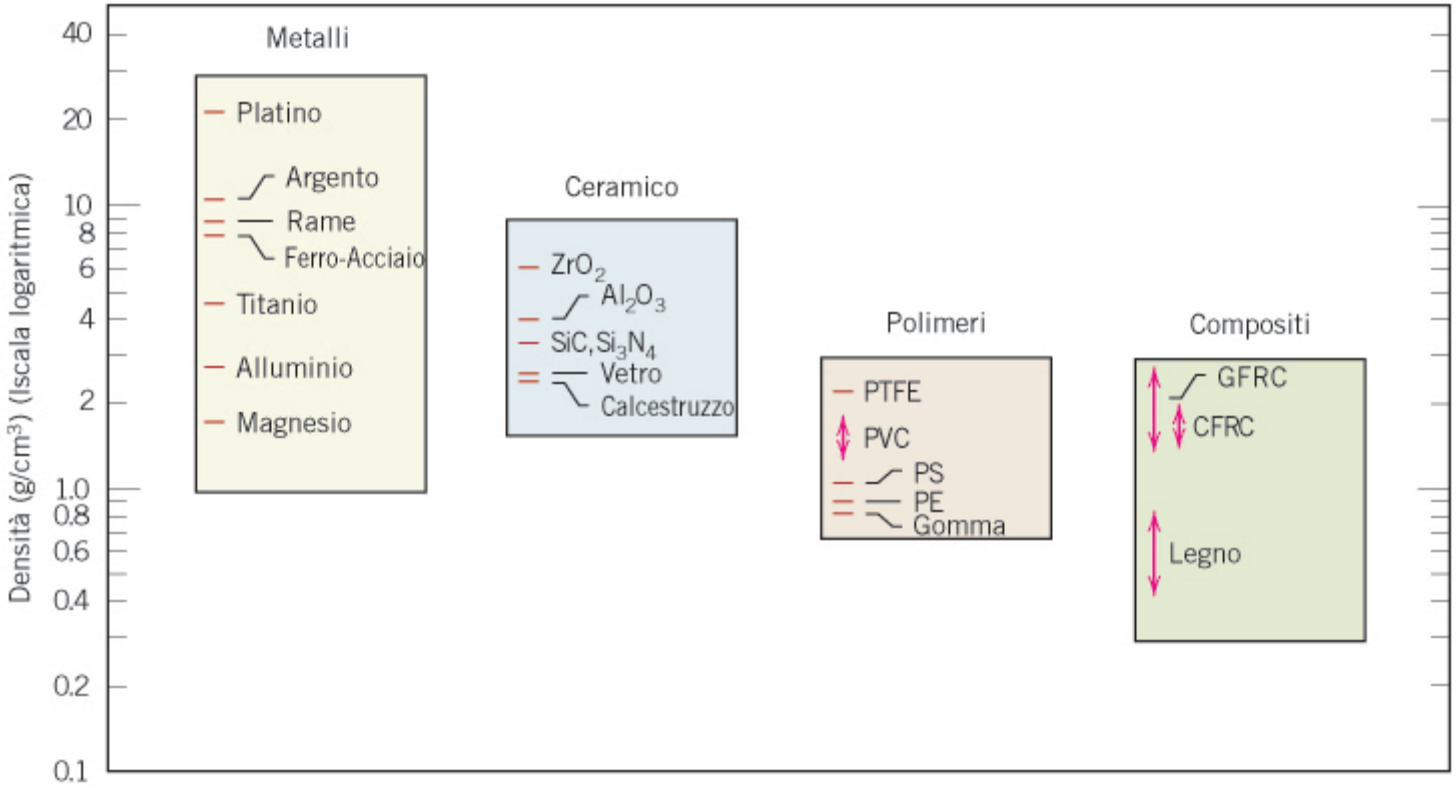
MECCANICA DELLA FRATTURA:
fenomeni legati al cedimento di materiali strutturali con **difetti pre-esistenti**

La caratteristica fondamentale da analizzare è la **tenacità**, caratteristica meccanica che abbiamo visto essere generalmente elevata in molte leghe metalliche e bassa nei materiali fragili, quali i vetri o i ceramici.

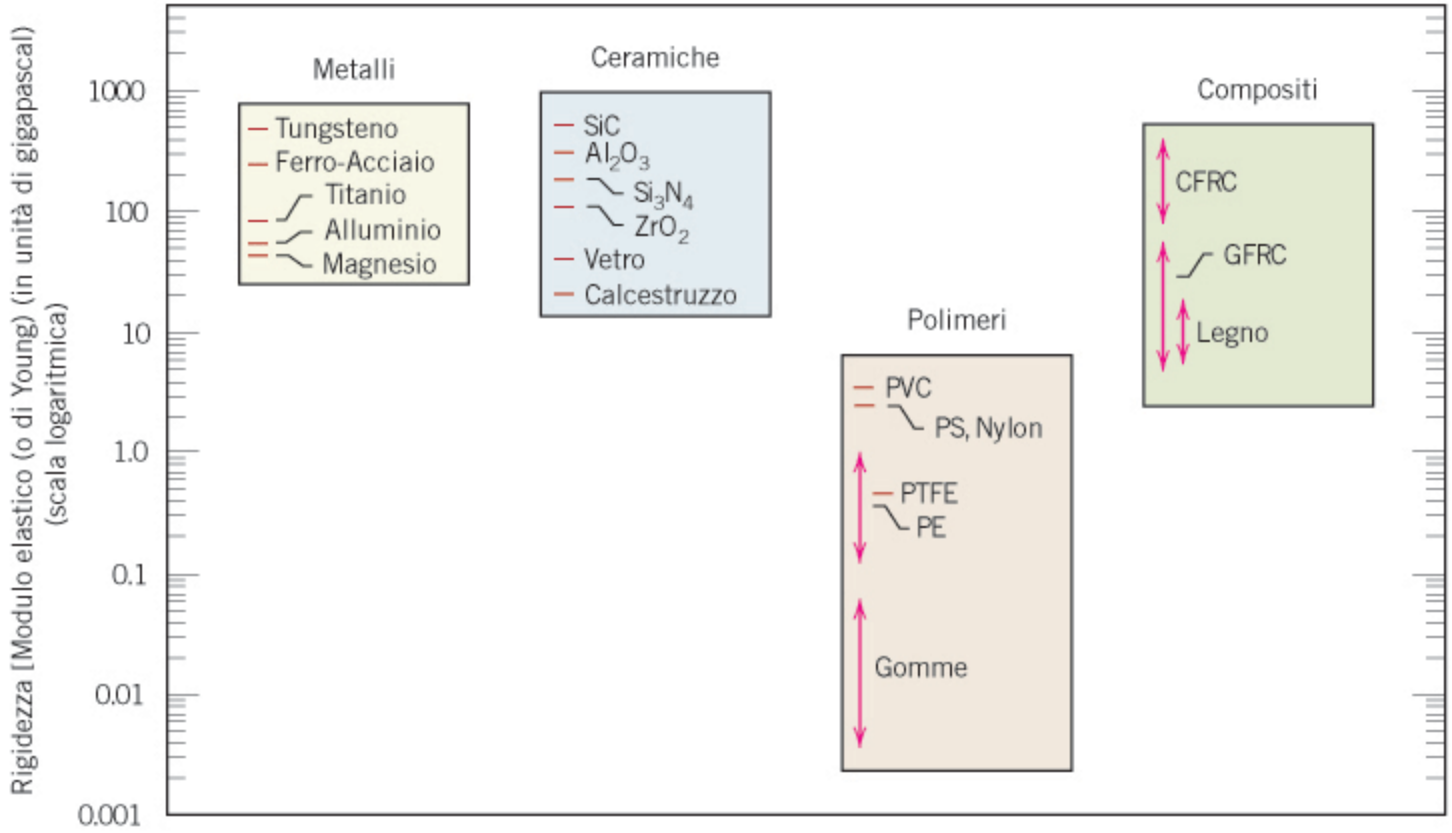
Si ricordano anche gli effetti indotti dalla temperatura nelle leghe metalliche, con **transizione tra comportamento duttile e fragile** al diminuire della temperatura per alcune leghe. Inoltre si rammenta il **fattore di scala** che determina la dimensione delle micro-fratture presenti nel materiale e, quindi, un fattore che influenza la tenacità.

Inoltre **fenomeni di ciclicità delle sollecitazioni** possono determinare una rottura a fatica dei materiali duttili, fenomeno che si realizza come cedimento fragile, quindi a partire da un campo di risposta meccanica macroscopica di tipo elastico.

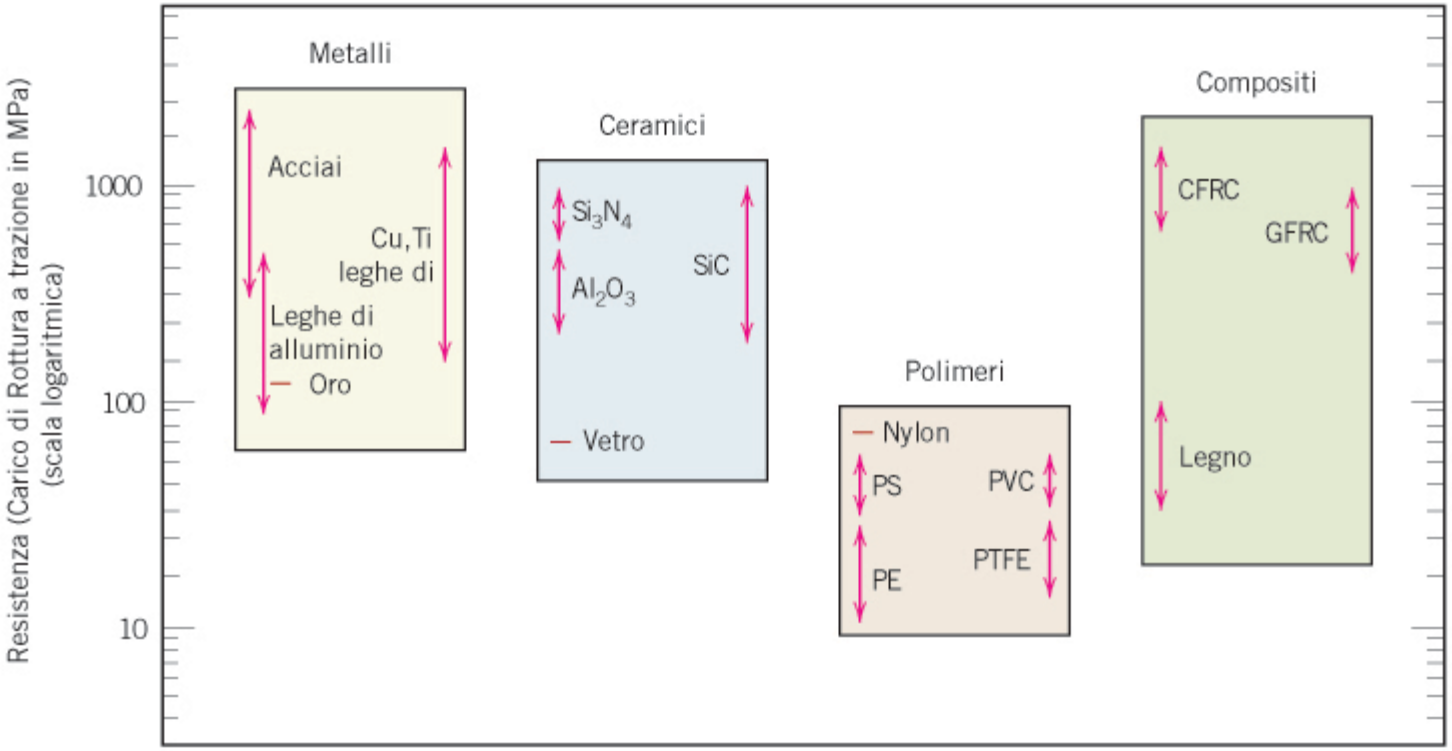
Classificazione dei materiali: densità



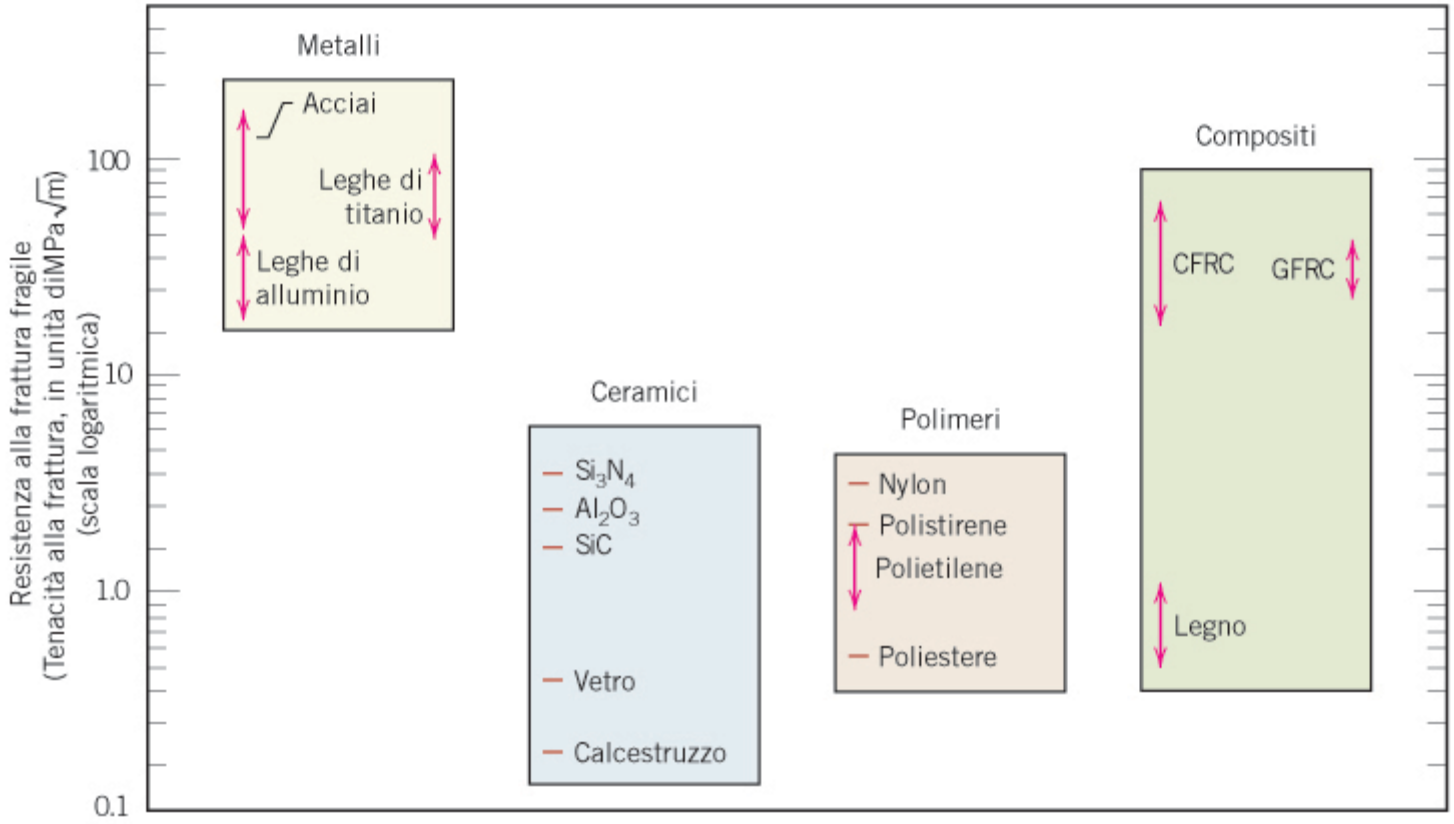
Classificazione dei materiali: rigidezza (E)



Classificazione dei materiali: carico di rottura

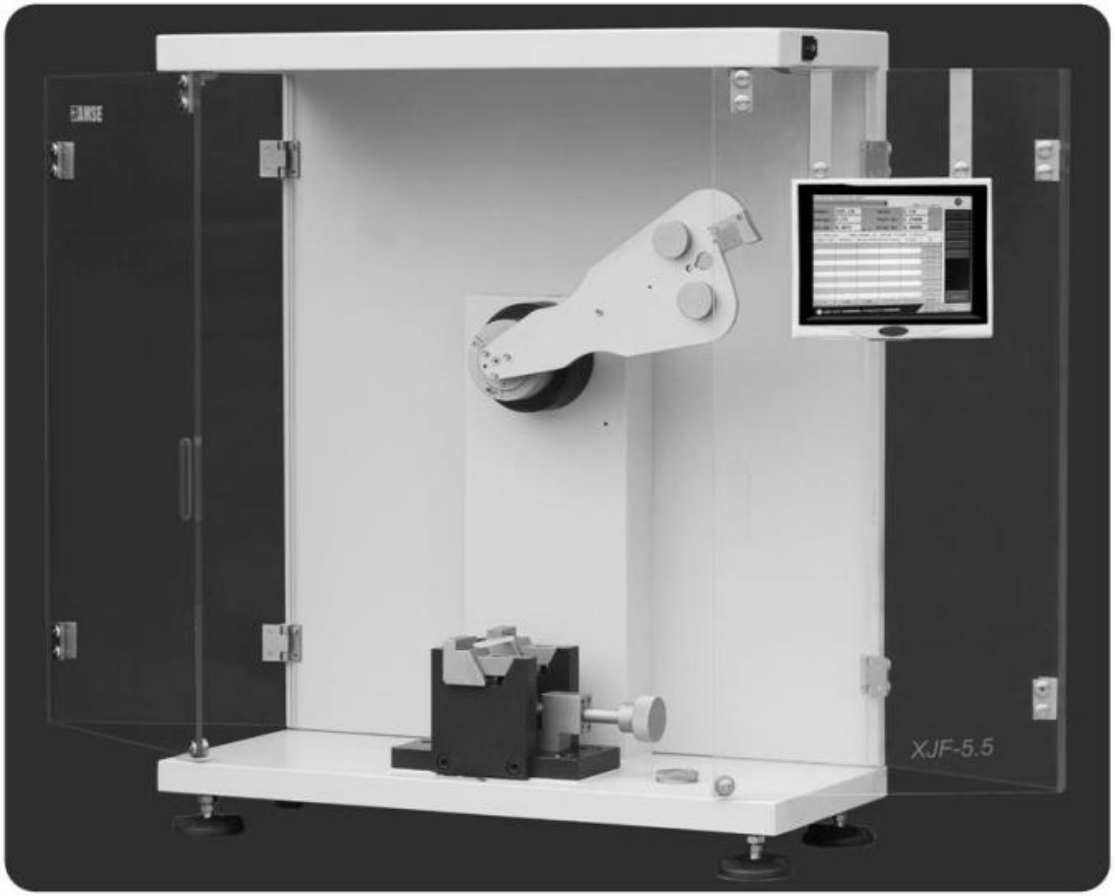


Classificazione dei materiali: fragilità



Energia di impatto

Con il termine energia d'impatto si intende l'energia necessaria a rompere un provino di forma standard con un carico d'impatto, cioè in condizioni di rapida applicazione del carico.



Energia di impatto

La seguente tabella mostra i valori di energia d'impatto per alcuni tipi di leghe per test di Charpy

tipo di lega	Energia impatto (J)
Acciaio al carbonio 1040	180
Acciaio inox AISI 410	34
Ti-5Al-2.5Sn	23

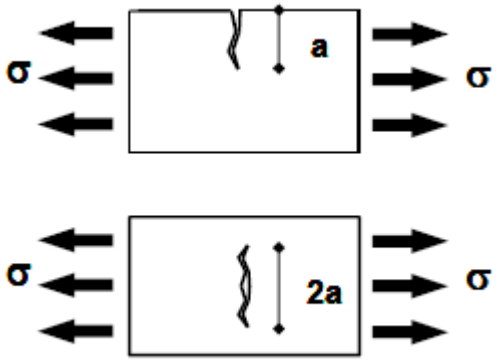
Tenacità alla frattura

La tenacità valutata a livello macroscopico attraverso i test di misura dell'energia di impatto può essere correlata alla tenacità alla frattura, indicata dal valore critico **K_{IC} del fattore di intensificazione dello sforzo all'apice di una cricca**, definito come

$$K_{IC} = Y\sigma_f\sqrt{\pi a}$$

dove:

- σ_f è il **valore della tensione che determina il cedimento** (il valore si riferisce a distanza dalla micro-cricca)
- Y è un **fattore geometrico adimensionale** con ordine di grandezza 1.



Si notino le dimensioni particolari del fattore K pari a $[F][L]^{-3/2}$

Si noti inoltre la differente definizione della lunghezza a, in base al fatto che si tratti di cricca superficiale o interna.

Tenacità alla frattura

$$K_{IC} = Y\sigma_f\sqrt{\pi a}$$

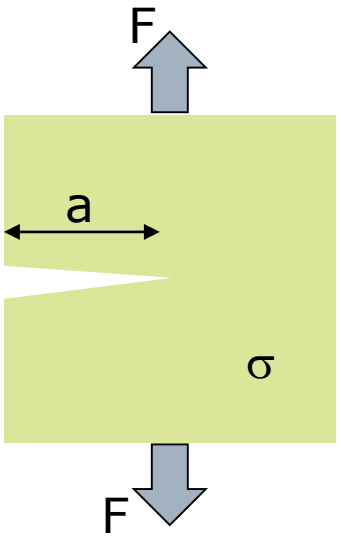
- indice C è il **fattore di intensità** sta ad indicare il **valore critico**
- indice I indica la **modalità di carico dovuta a tensioni normali di tipo monoassiale** (vi possono essere differenti modalità di carico, che determinano conseguenze differenti sul piano della crisi della struttura con difetto pre-esistente).

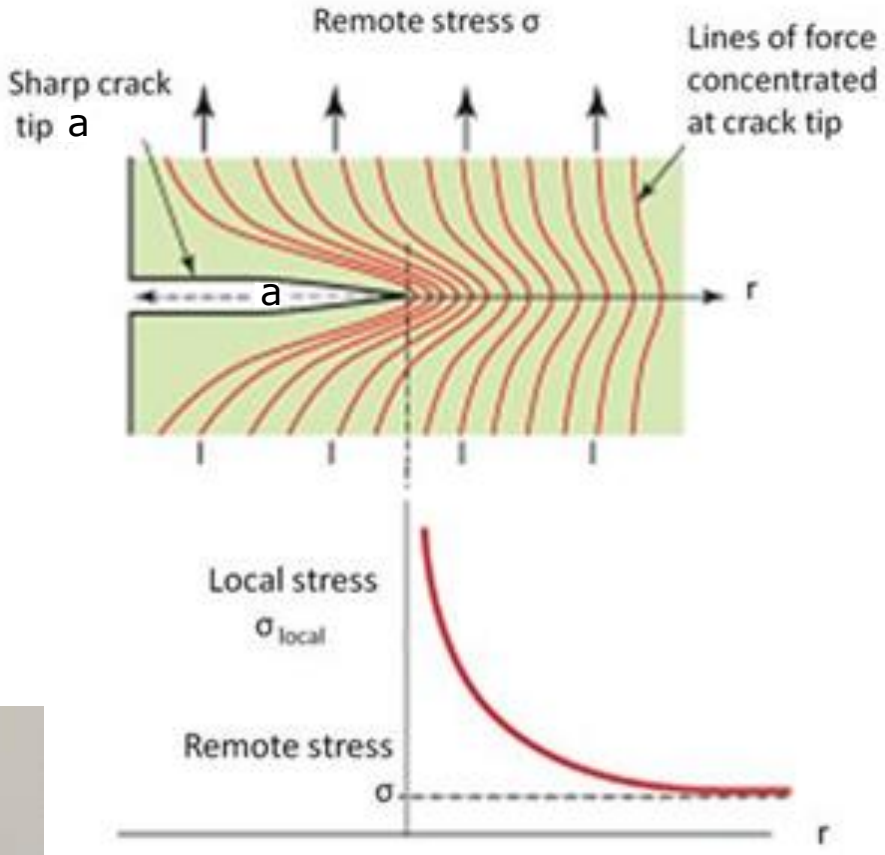
Il valore critico di intensità dello sforzo prima definito è valutato per elementi strutturali con uno spessore (dimensione perpendicolare al piano del disegno) sufficiente a ritenere che lo stato meccanico sia di deformazione piana, condizione indicativamente realizzata nel caso lo spessore w sia tale che:

$$w \geq 2.5\left(K_{IC}/\sigma_y\right)^2$$

Per valori più bassi dello spessore il **fattore di intensificazione** degli sforzi K_C **dipende anche dallo spessore** dell'elemento considerato.

Meccanica della frattura

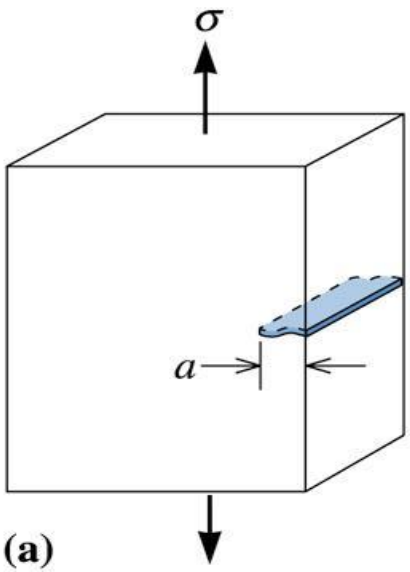




$$K = f\sigma\sqrt{\pi a}$$

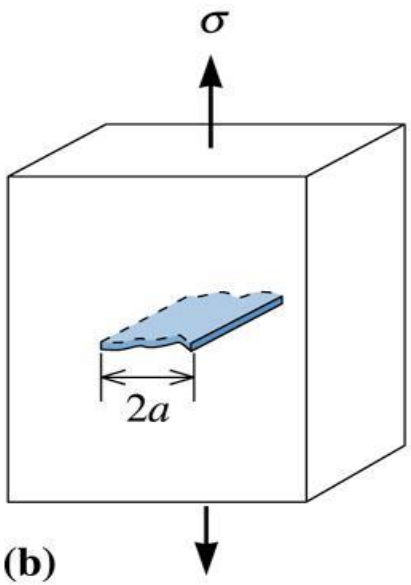
Fattore di intensificazione degli sforzi

Modi di frattura

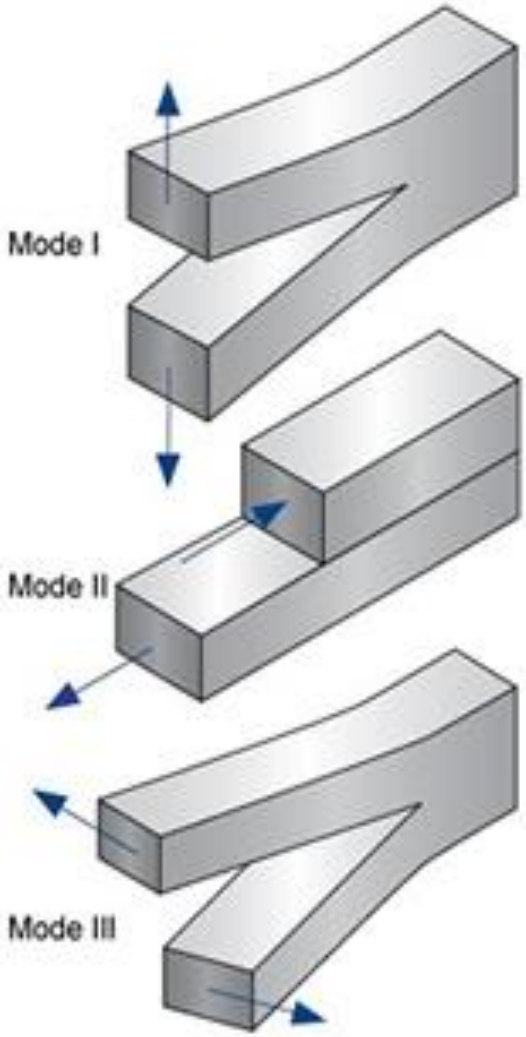


$f = 1.12$

$$K = f\sigma\sqrt{\pi a}$$



$f = 1.0$

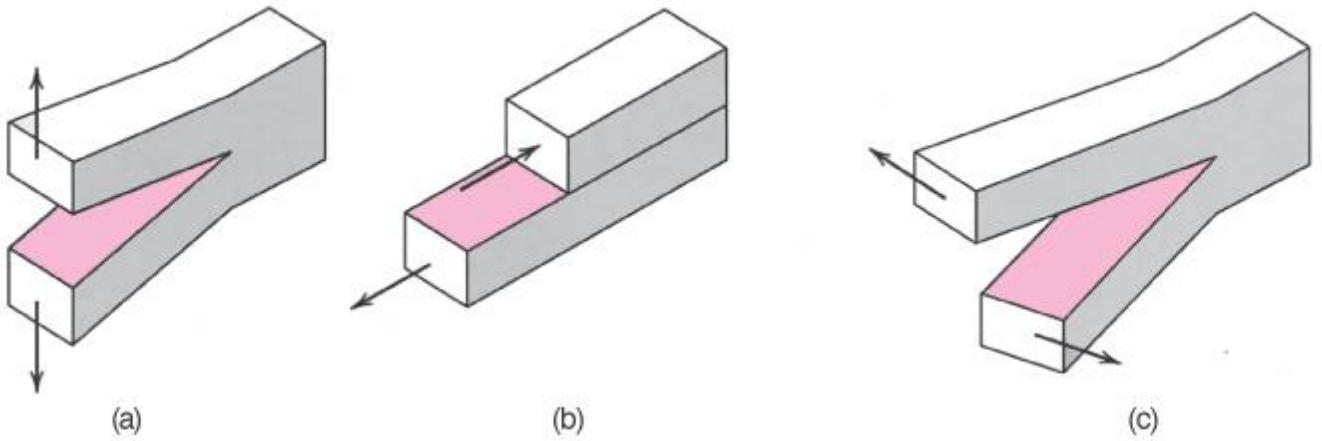


K_I

K_{II}

K_{III}

FIGURA 8.9
I tre modi di apertura di una cricca. (*a*) Modo I, di apertura o tensile; (*b*) modo II, di scorrimento; (*c*) modo III, di lacerazione.

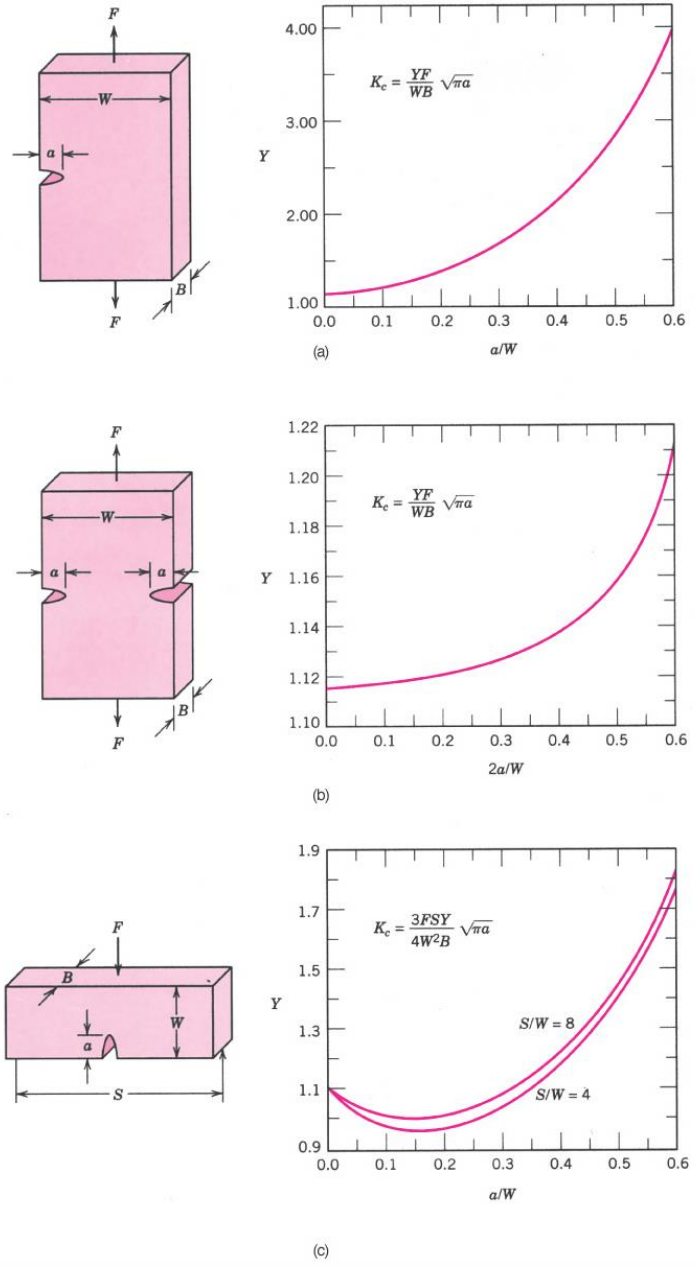


Modo I
chiamato modo di apertura in tensione, nel quale il carico è applicato ortogonalmente alla cricca;

Modo II
chiamato di scorrimento o di taglio, nel quale lo sforzo è di taglio nel piano e nella direzione della cricca;

Modo III
chiamato di lacerazione o strappo, nel quale lo sforzo è di taglio nel piano della cricca in direzione ortogonale ad essa.

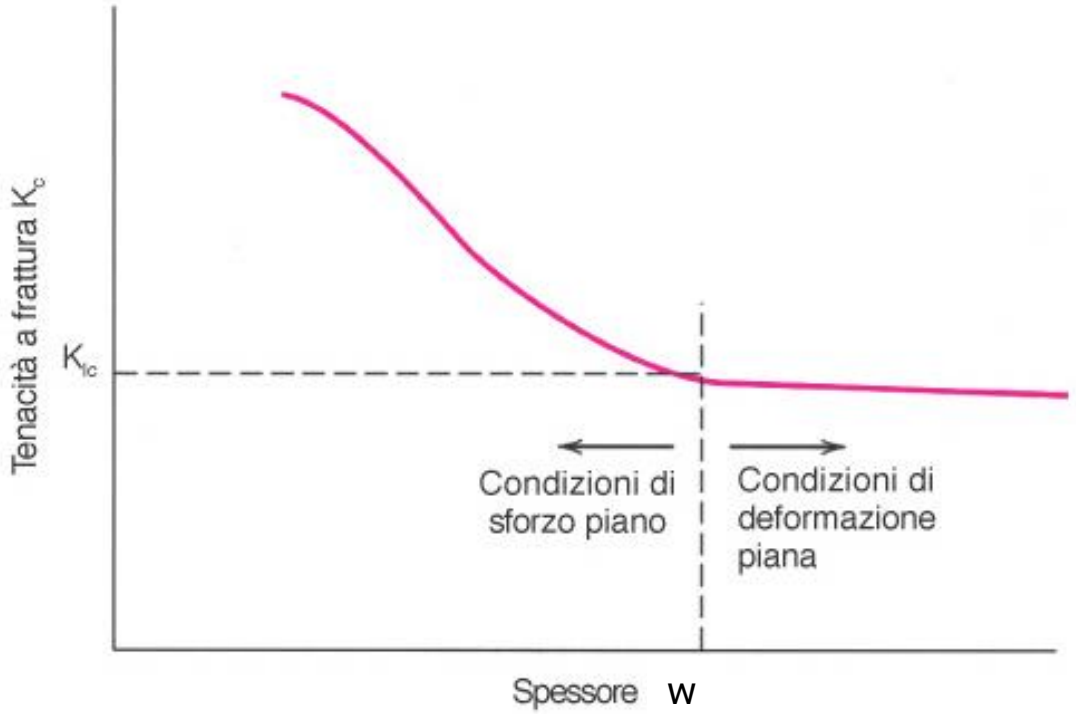
Tenacità a frattura



$$K_{Ic} = Y\sigma_c\sqrt{\pi a} \quad , \quad Y = Y\left(\frac{a}{W}\right)$$

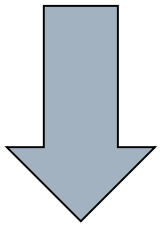
Condizione di deformazione piana

$$W \geq 2.5\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_y}\right)^2$$



Tenacità a Frattura

$K = f\sigma\sqrt{\pi a}$ Fattore di intensificazione degli sforzi

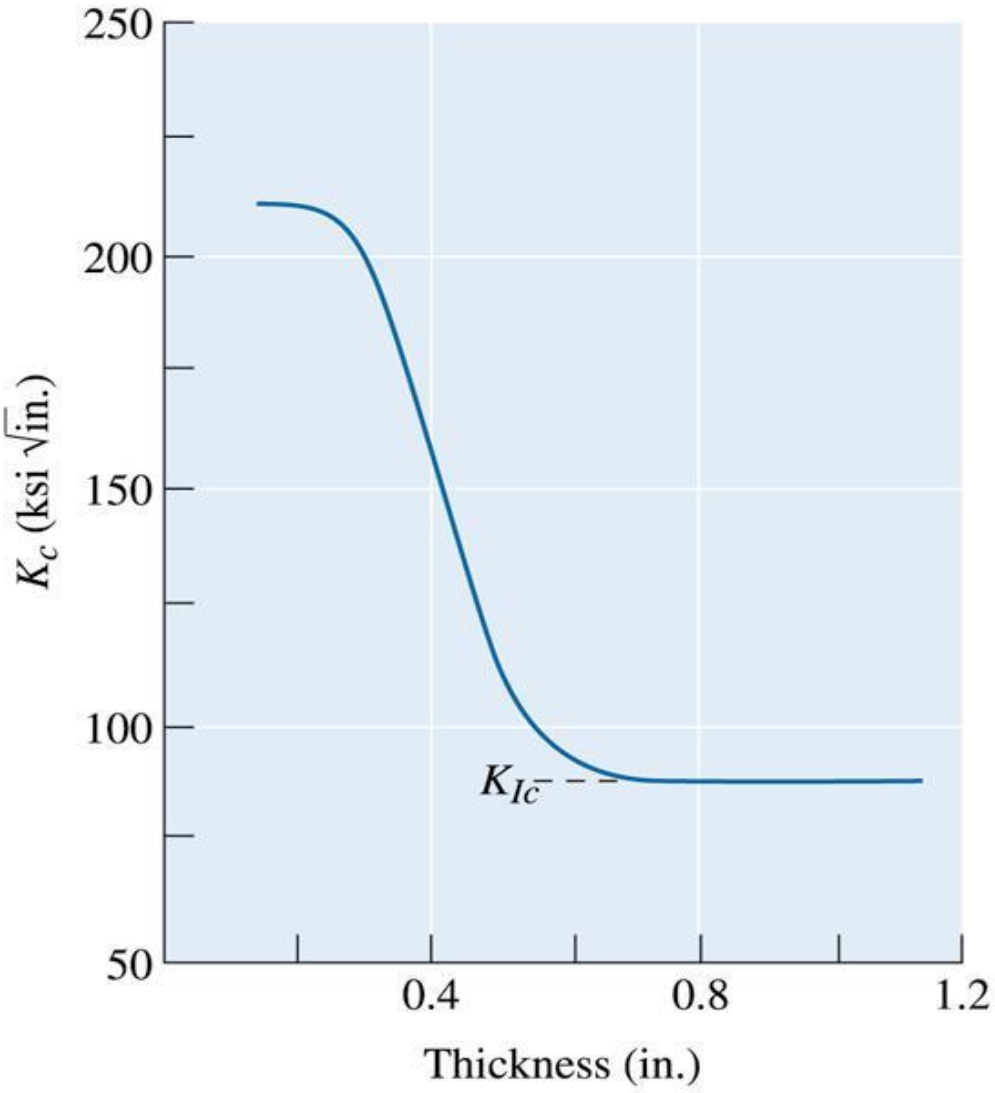


$\sigma = \sigma_c$

$K_C = f\sigma_c\sqrt{\pi a}$ **Tenacità a Frattura**

(valore di K che provoca la propagazione della cricca)

Tenacità a Frattura in Condizioni di Deformazione Piana



La resistenza alla frattura K_c di un acciaio da 3.000.000 psi di snervamento diminuisce con l'aumentare dello spessore, fino a tendere alla resistenza alla frattura della deformazione piana K_{Ic}

Tenacità a Frattura

- correlazione tra comportamento micro-strutturale e macrostrutturale

Materiali con **basso valore di K_{IC}** evidenziano a livello macroscopico un basso valore di duttilità e hanno un **comportamento fragile**. Ciò è associato al fatto che il materiale non è in grado di subire forti deformazioni plastiche nell'intorno dell'apice della micro-cricca.

Considerato un **materiale a comportamento duttile**, si nota che la presenza di micro-difetti può diminuire la sua resistenza e, ciò che è forse anche più importante, determinare una **modalità di crisi di tipo fragile**, poiché al raggiungimento del valore critico la micro-cricca incrementa la propria lunghezza in modo instabile, portando alla crisi generale dell'elemento strutturale nel quale è presente.

La relazione tra dimensione della micro-cricca e resistenza del materiale (al quadrato) è inversamente proporzionale, come si è già per altro visto per i materiali fragili; ciò si evince dalla relazione del fattore critico di intensità dello sforzo.

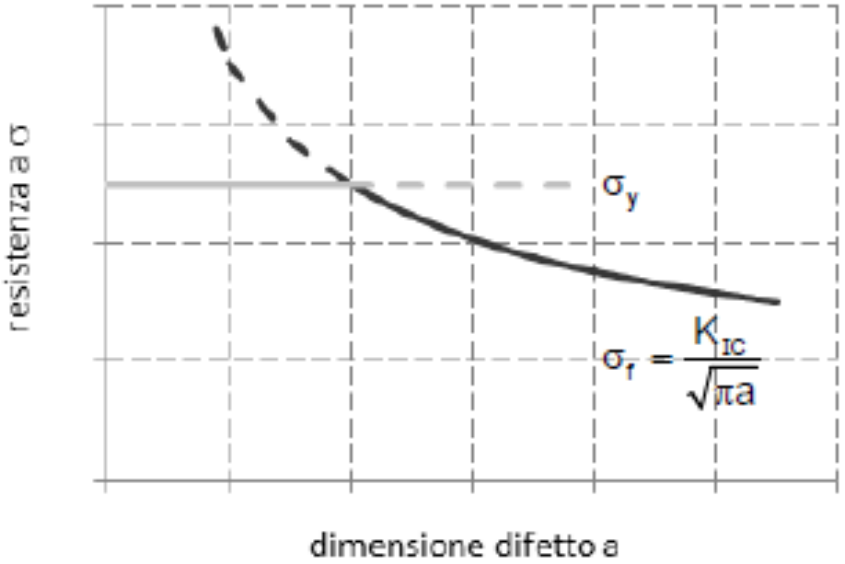
Rottura fragile e duttile

$$K_{IC} = Y\sigma_f\sqrt{\pi a}$$

Dalla relazione inversa, e prefissato il valore di Y all'unità, per semplificare, si ricava infatti:

$$\sigma_f = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a}}$$

Considerando anche il valore di snervamento nel comportamento macroscopico deducibile da semplici prove di trazione sul materiale, la relazione precedente comporta il seguente andamento, da cui si evince una potenziale transizione di comportamento duttile-fragile.



Rottura fragile e duttile

Valori critici di intensità dello sforzo per materiali di natura differente sono riportati nelle seguenti tabelle:

tipo di lega	K_{Ic} (MPa $\cdot m^{1/2}$)
acciai ad alta resistenza	50-154
leghe di alluminio	23-45
leghe di titanio	55-115

ceramico o vetro	K_{Ic} (MPa $\cdot m^{1/2}$)
allumina	3-5
carburo di silicio	3
vetro sodico	0.7-0.8

tipo di polimero	K_{Ic} (MPa $\cdot m^{1/2}$)
polietilene alta densità	2
polietilene bassa densità	1
poliesteri	0.5

Si vede come, in generale, i materiali ceramici tradizionali abbiano valori assai bassi. Solo nella zirconia opportunamente trattata si ottengono valori comparabili con quelli dei metalli più fragili.

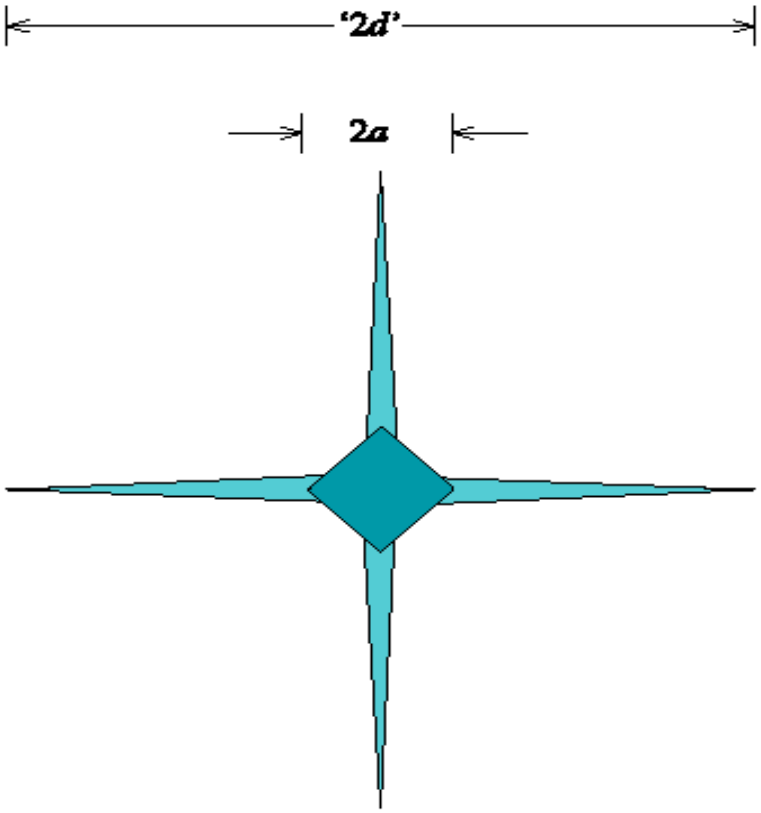
Tenacità a Frattura – valori tipici

TABLE 6-6 ■ *The plane strain fracture toughness K_{Ic} of selected materials*

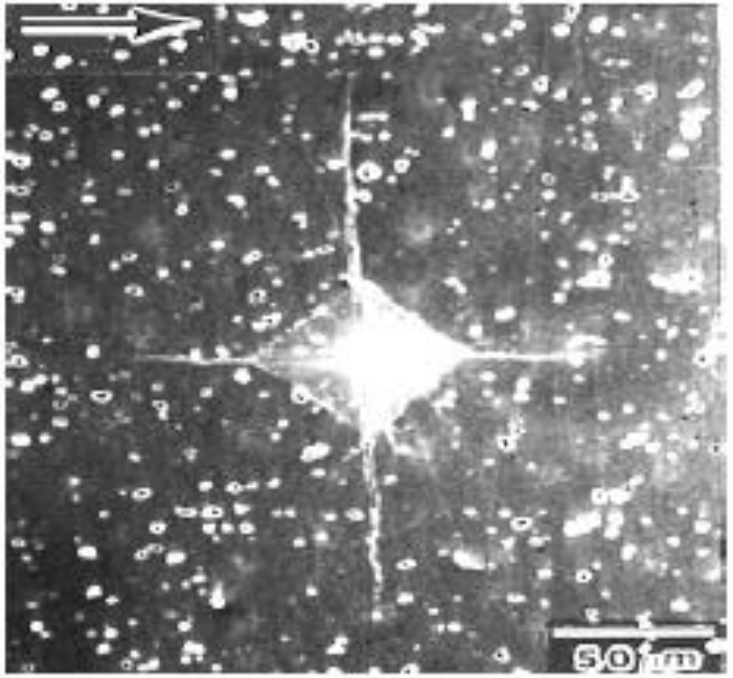
Material	Fracture Toughness K_{Ic} (psi $\sqrt{\text{in.}}$)	Yield Strength or Ultimate Strength (for Brittle Solids) (psi)
Al-Cu alloy	22,000	66,000
	33,000	47,000
Ti-6% Al-4% V	50,000	130,000
	90,000	125,000
Ni-Cr steel	45,800	238,000
	80,000	206,000
Al_2O_3	1,600	30,000
Si_3N_4	4,500	80,000
Transformation toughened ZrO_2	10,000	60,000
Si_3N_4-SiC composite	51,000	120,000
Polymethyl methacrylate polymer	900	4,000
Polycarbonate polymer	3,000	8,400

Valutare la tenacità a frattura in materiali fragili

(si utilizza la misura della lunghezza di cricche indotte da indentazione)



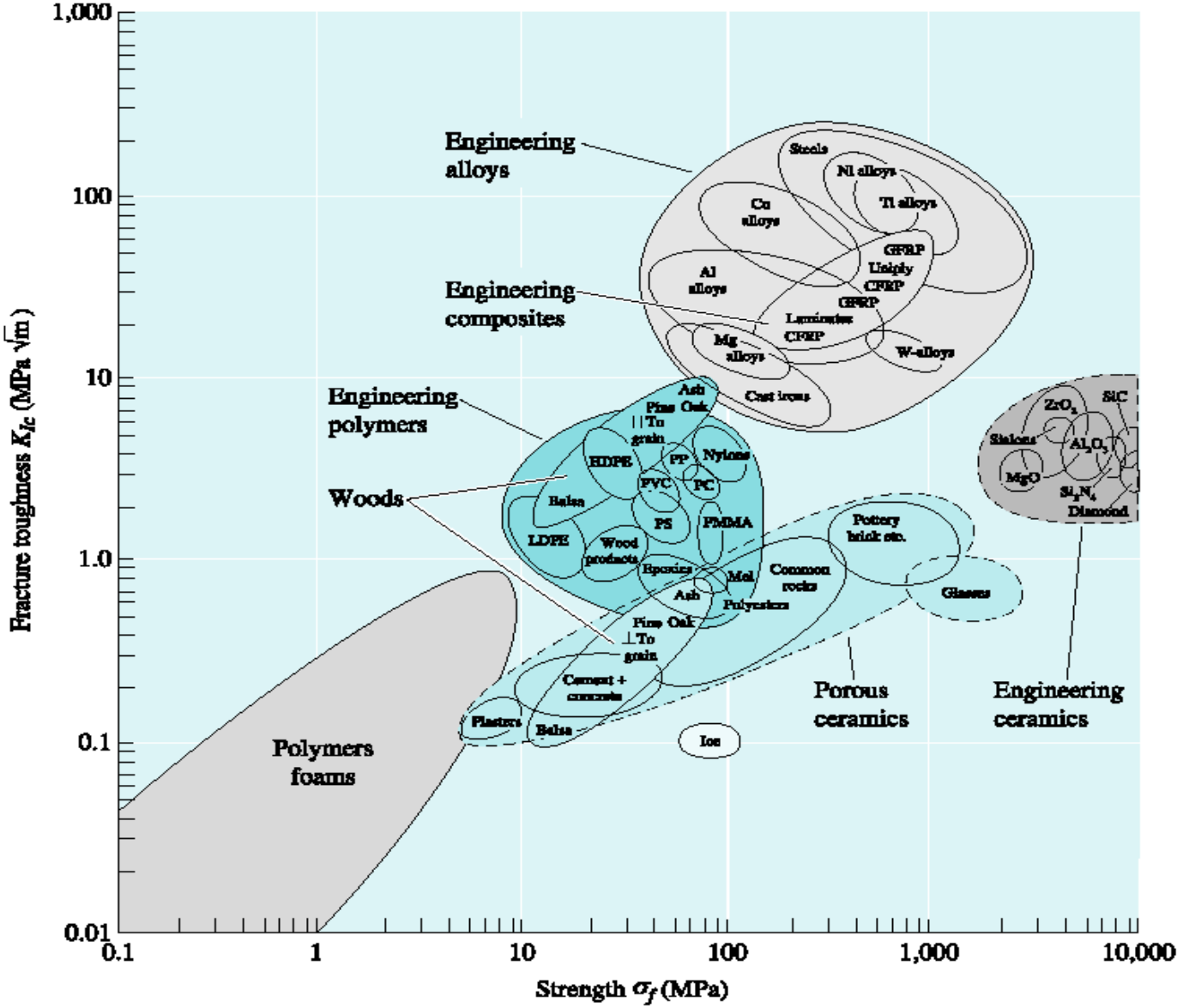
Le cricche secondarie sviluppate durante i test di durezza possono essere utilizzate per valutare la resistenza alla frattura dei materiali fragili



Una micrografia elettronica a scansione che mostra la propagazione delle crepe in una ceramica PZT. (*Courtesy of Wang and Raj N. Singh, Ferroelectrics, 207, 555–575 (1998)*.)

Tenacità a Frattura

valori tipici e correlazione con la resistenza meccanica



Resistenza alla frattura (K_{Ic}) rispetto alla resistenza (σ) di diversi materiali ingegnerizzati.

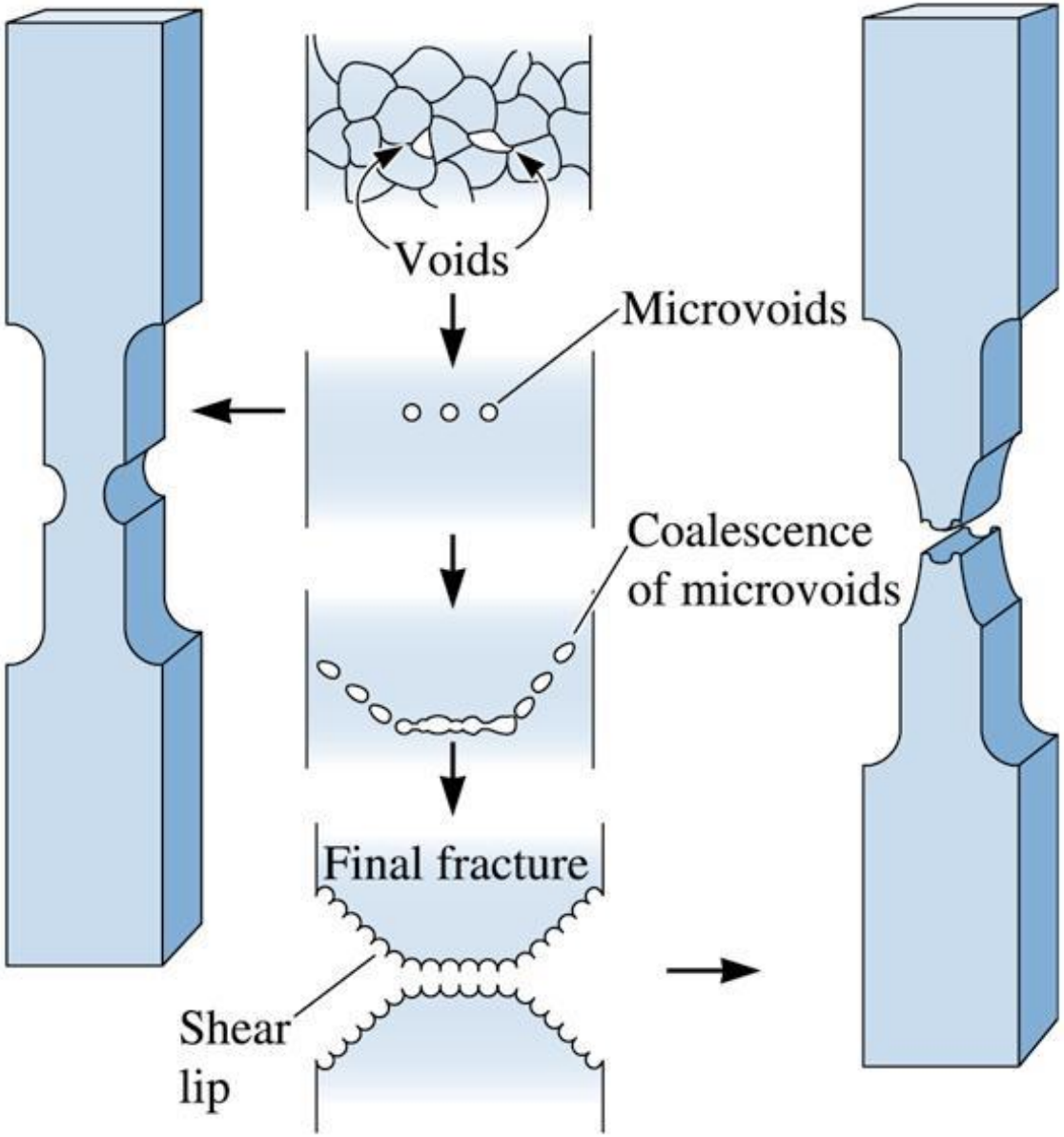
(*Source: Adapted from* Mechanical Behavior of Materials, *by T.H. Courtney, 2000, p. 434, Fig. 9-18.* *Copyright © 2000 The McGraw-Hill Companies. Adapted with permission.*)

Aspetti microstrutturali della frattura in materiali metallici

- **Transgranulare**: Significa attraverso i grani (ad esempio, una frattura transgranulare è una frattura in cui le cricche attraversano i grani).
- **Microvuoti**: Sviluppo di piccoli pori in un materiale.
- **Intergranulare**: Tra i grani o lungo i confini del grano.
- **Motivo a chevron**: Una caratteristica di frattura comune prodotta da fronti di crack separati che si propagano a diversi livelli nel materiale.

Frattura di materiali duttili:

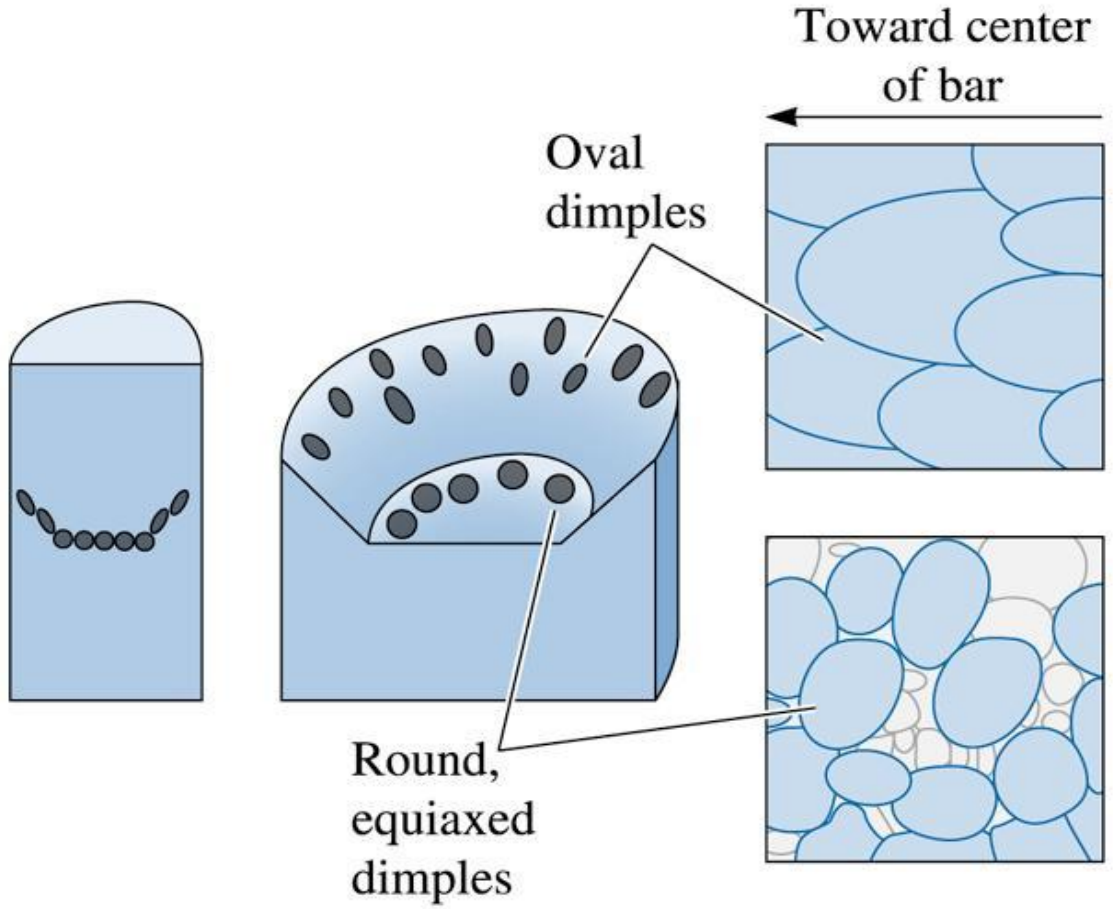
formazione della forma coppa-cono attraverso la coalescenza di microvuoti



Quando un materiale duttile viene tirato in una prova di trazione, inizia a generarsi il collo e si forma il vuoto - che parte vicino al centro della barra - mediante nucleazione ai bordi di grano o inclusioni del grano. Man mano che la deformazione continua, si può formare un labbro di taglio a 45°, producendo una coppa finale e una frattura del cono

Frattura di materiali duttili:

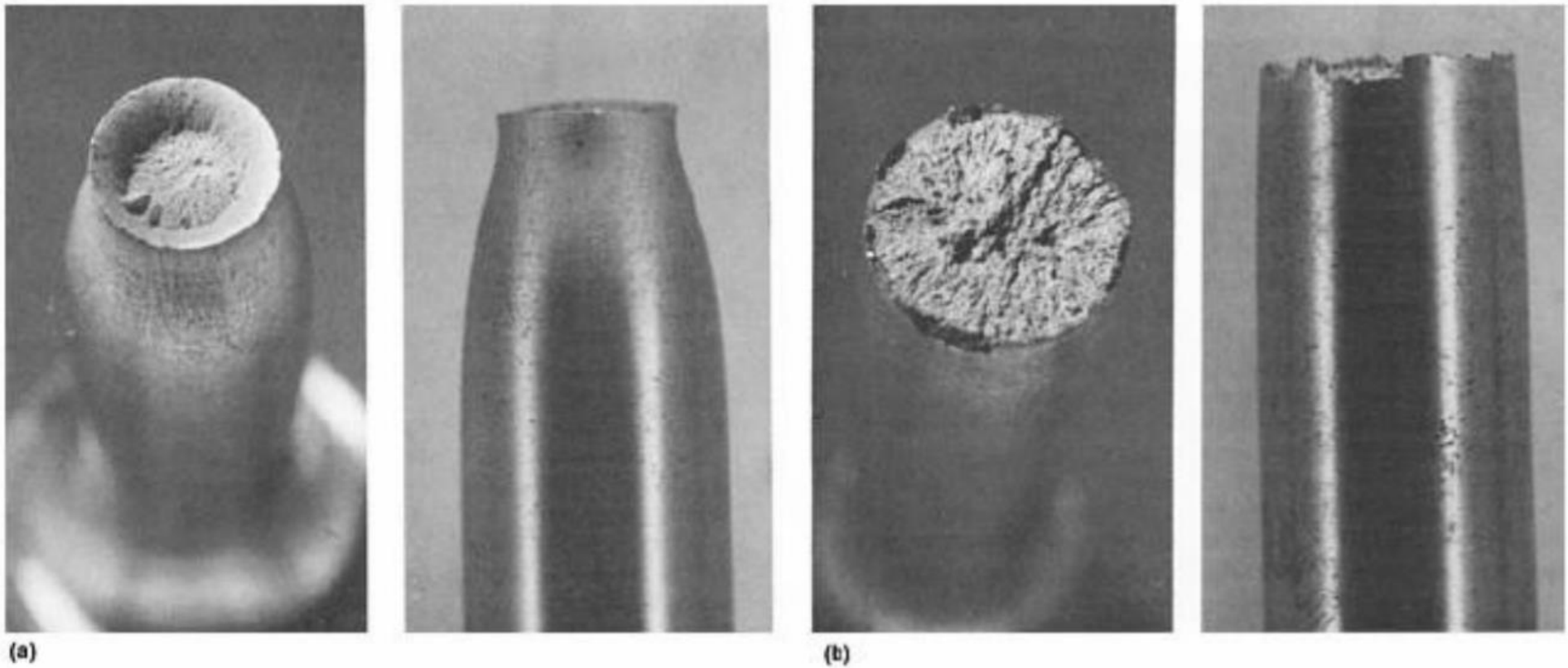
caratteristiche delle superfici di frattura



(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

I vuoti si formano durante la frattura duttile. Le cavità equiassiali si formano al centro, dove crescono i microvuoti. Le cavità allungate, che indicano l'origine della rottura, si formano sul bordo del taglio

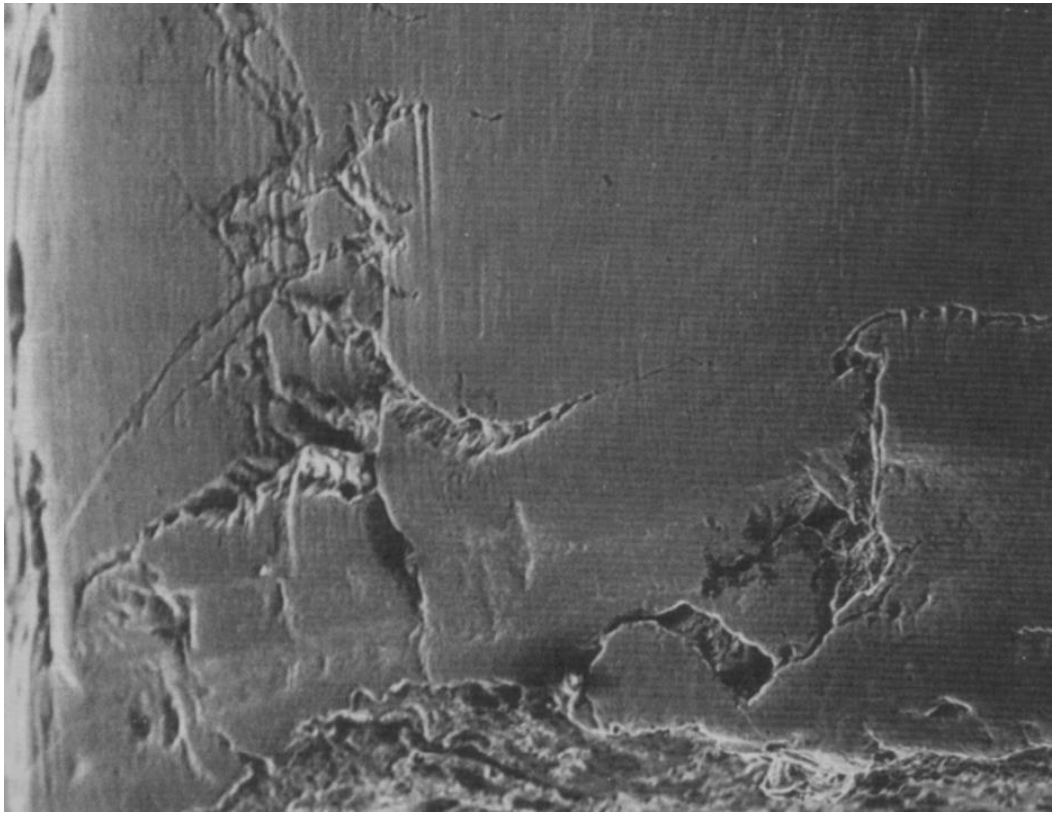
Frattura di materiali duttili:
caratteristiche delle superfici di frattura



La rottura duttile a livello **macroscopico** si traduce sempre in una strizione, ossia una riduzione localizzata della sezione resistente

La rottura finale è determinata dall'instaurarsi nella zona di strizione di uno stato di tensione triassiale

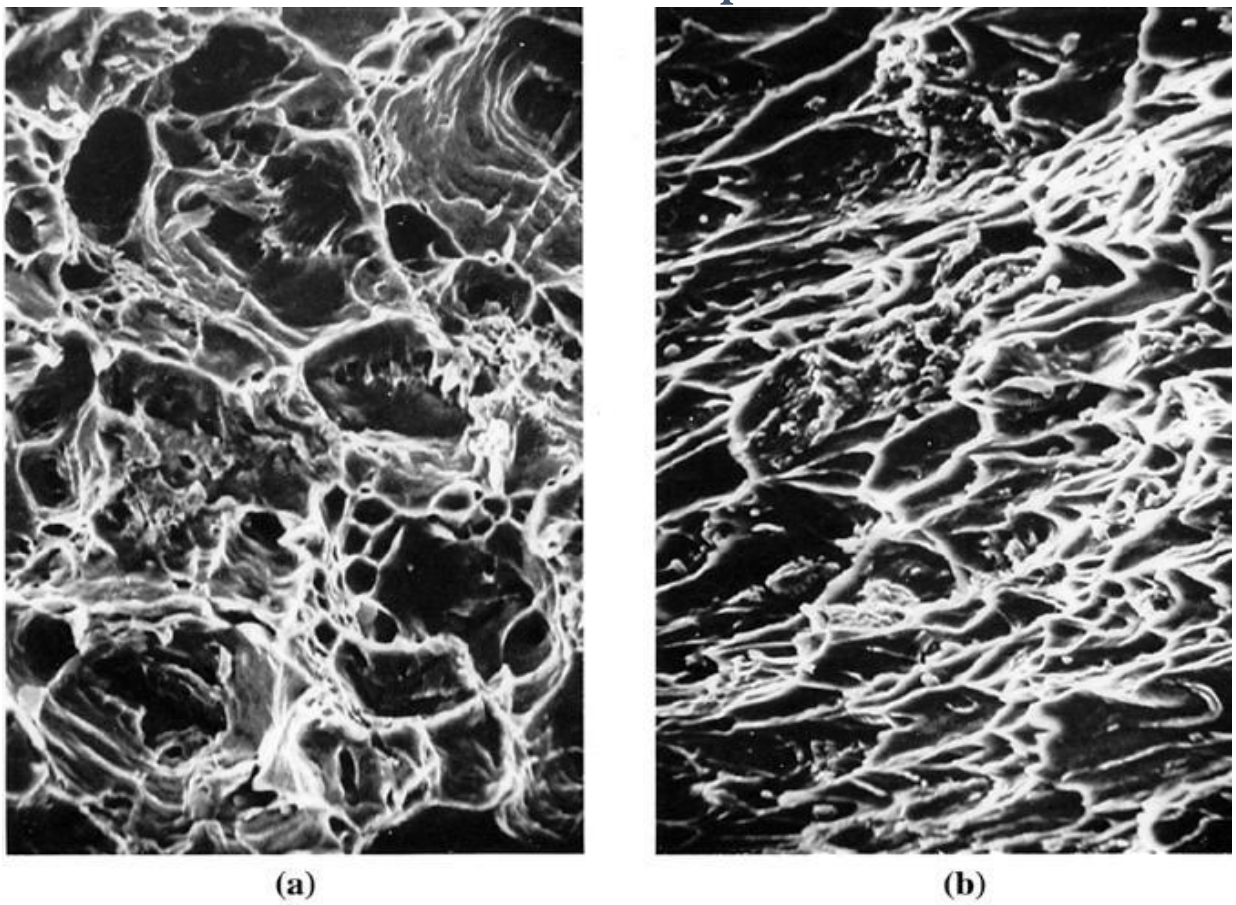
Frattura di materiali duttili:
caratteristiche delle superfici di frattura



La rottura duttile si caratterizza sia a livello **microscopico** che a livello macroscopico per la presenza di rilevanti deformazioni plastiche.

Frattura di materiali duttili:

caratteristiche delle superfici di frattura



(a) (b)

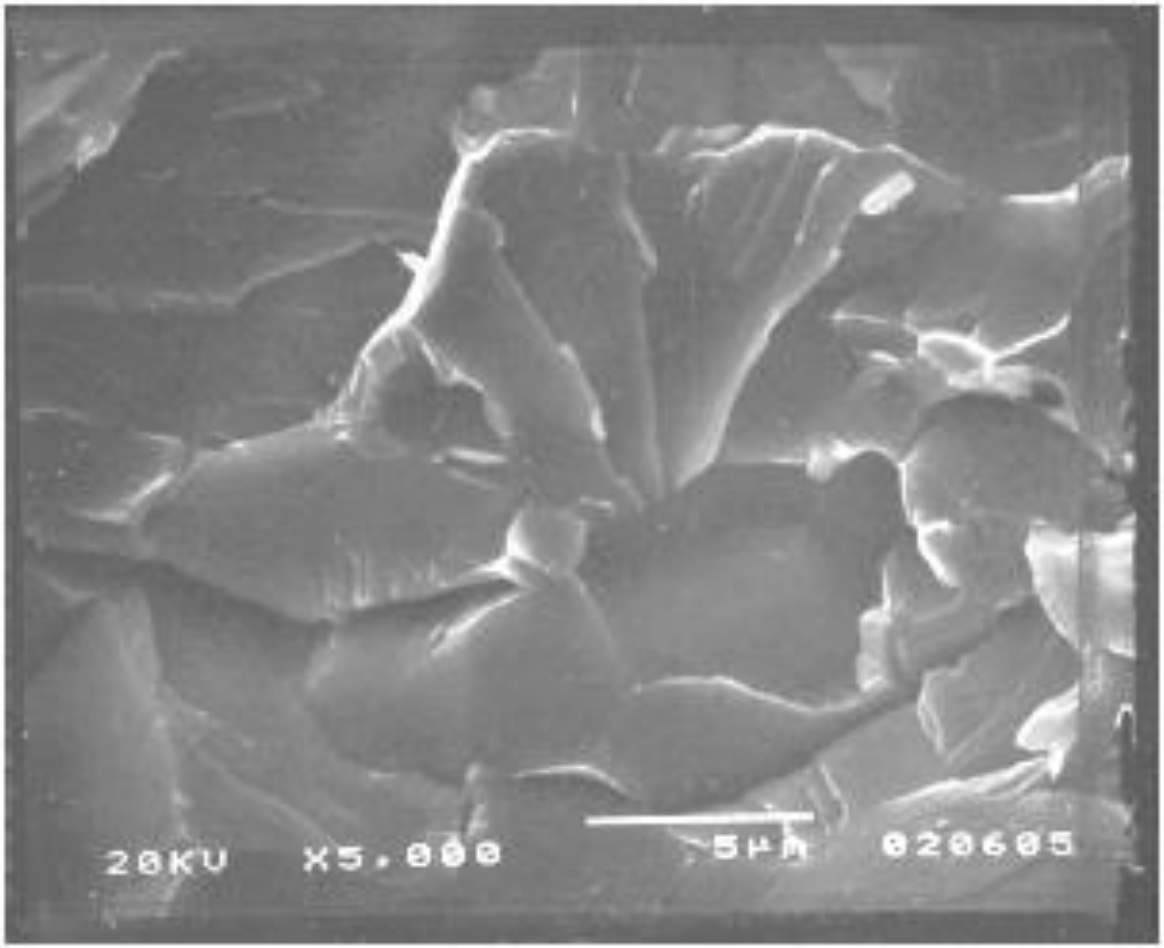
(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Micrografia al microscopio elettronico a scansione di un acciaio ricotto 1018 che presenta fratture duttili in una prova di trazione. (a) cavità equiassiali al centro piatto della coppa e cono, e (b) cavità allungate sul lembo di taglio (x 1250)

Frattura di materiali duttili:
Meccanismi di rottura

- La deformazione plastica avviene in maniera non uniforme, generando delle cavità e dei microvuoti di forma irregolare
- I microvuoti coalescono fino a determinare la strizione del materiale
- La zona di strizione che è sollecitata da un carico locale più elevato rispetto alle zone circostanti non può deformarsi liberamente e si genera uno stato triassiale idrostatico di tensione
- La tensione idrostatica incrementa la tensione che è necessario raggiungere per avere ulteriori deformazioni plastiche, favorendo la frattura interna del materiale

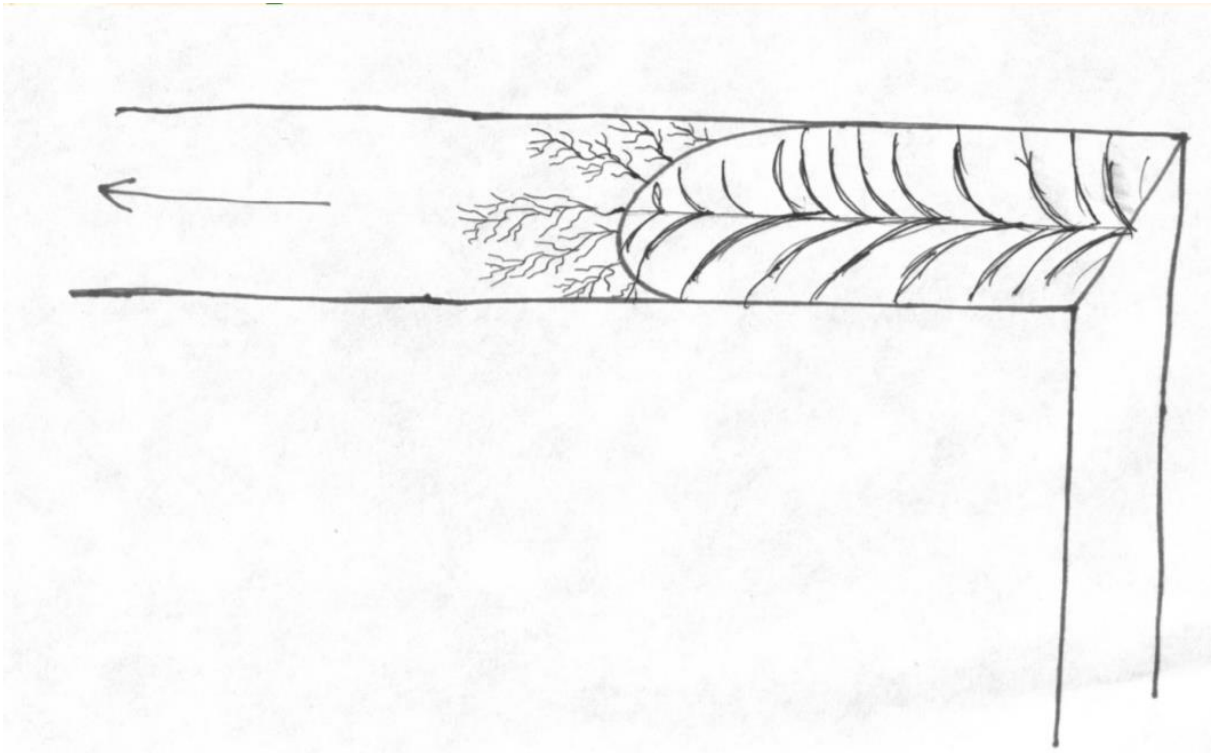
Frattura (intragranulare) fragile



Micrografia elettronica a scansione di una superficie di frattura fragile di un acciaio 1010 temprato (x 5000). (*Courtesy of C.W. Ramsay.*)

Frattura (intragranulare) fragile

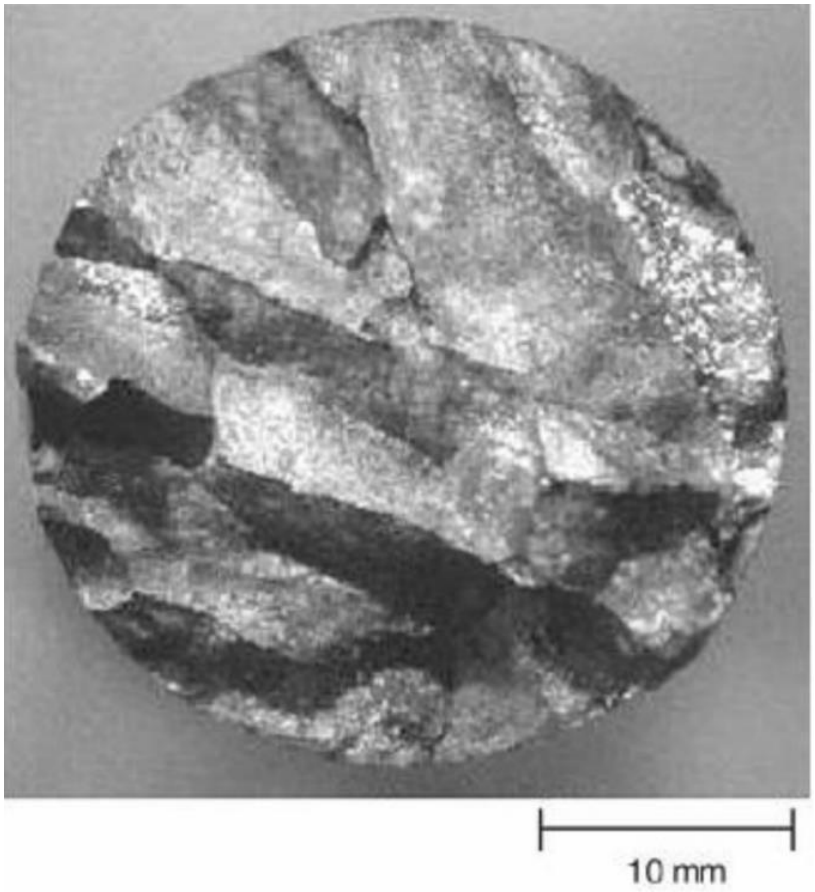
Il fronte della cricca è convesso rispetto alla direzione di propagazione in quanto la propagazione è più veloce nelle regione interne, dove si verificano delle condizioni di deformazione piana.



V. Dattoma, R. Nobile - Costruzione di Macchine

Frattura (intragranulare) fragile

La rottura fragile di tipo intergranulare è dovuta alla segregazione di impurità ai bordi dei grani durante le lavorazioni e i trattamenti termici.



Frattura (intragranulare) fragile

La frattura fragile è favorita dai seguenti fattori:

- **microstruttura**: grani di dimensioni più elevate riducono la tenacità del materiale
- **ambiente**: il contatto con agenti chimici può favorire l'infragilimento (ad esempio l'infragilimento degli acciai causato dall'idrogeno)
- **basse temperature**: tutti i metalli sono caratterizzati da una temperatura di transizione vetrosa, al di sotto della quale la rottura è di tipo fragile
- **concentrazione di sforzo**: i piccoli raggi di raccordo favoriscono l'innesco di rotture fragili
- **carichi impulsivi**: gli urti amplificano il carattere

Frattura (intragranulare) fragile

La segregazione introduce dei punti deboli nella struttura del materiale.

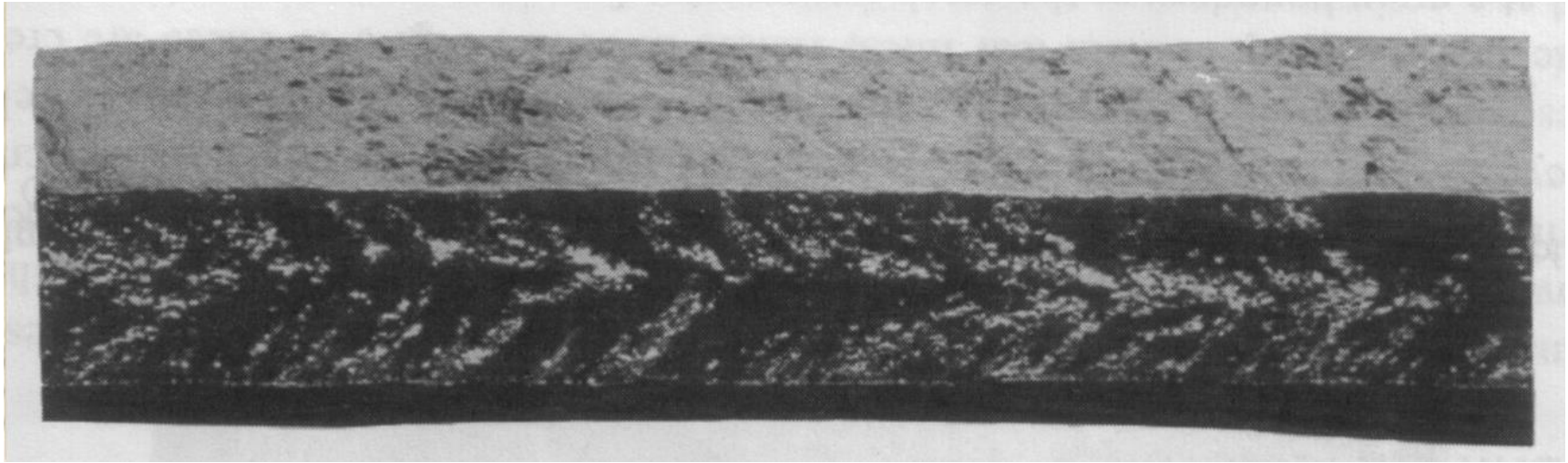
La superficie di frattura appare brillante perché sono visibili i bordi dei grani separatisi, ma mancano le superfici piane di clivaggio.

Frattura con Chevron-pattern (tipica in frattura rapida di materiali duttili)

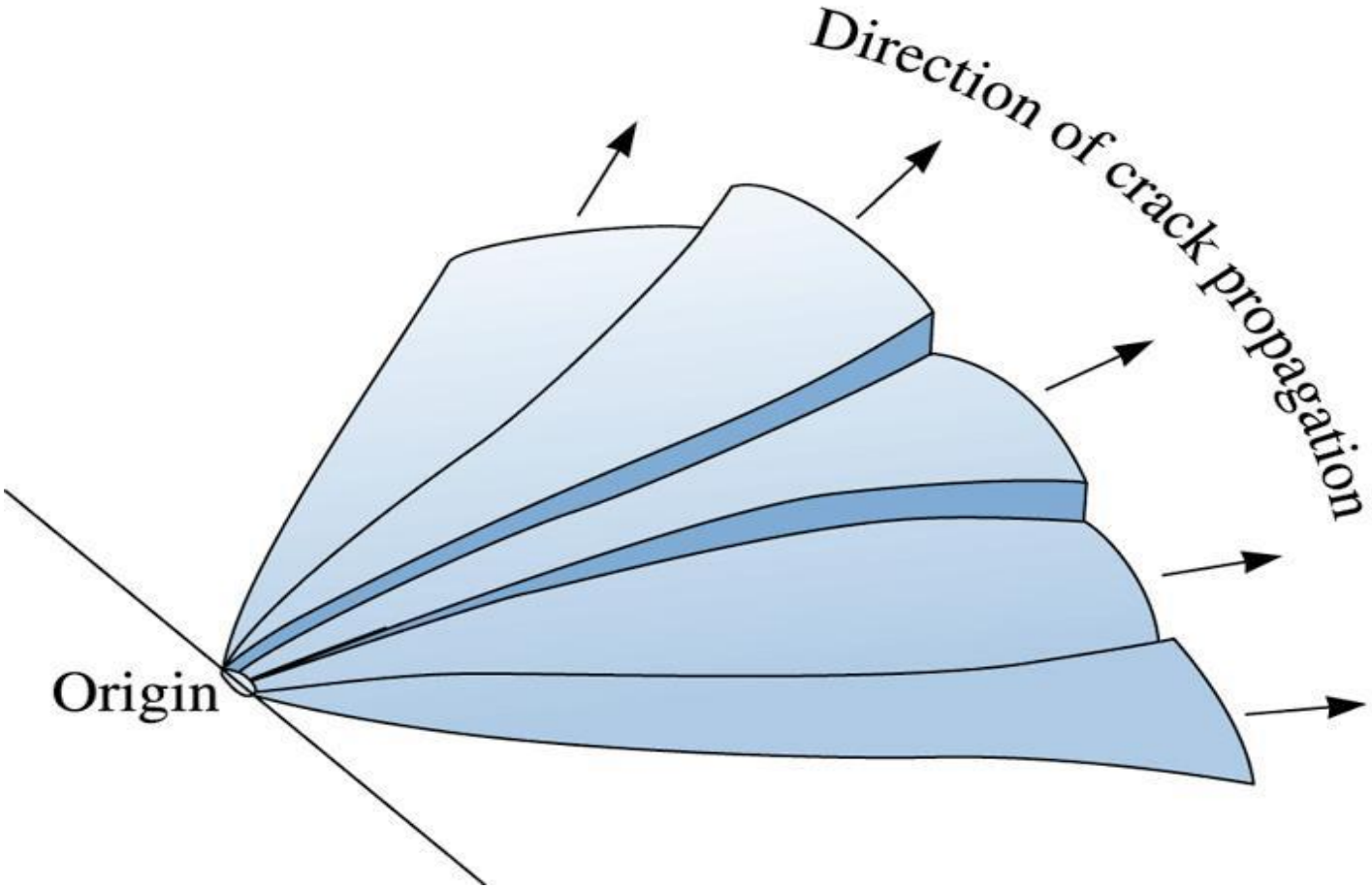
(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Il pattern Chevron in un acciaio 4340 temprato con diametro di 0,5 pollici. L'acciaio ha ceduto in modo fragile a causa di un colpo d'urto.

Frattura con Chevron-pattern (tipica in frattura rapida di materiali duttili)



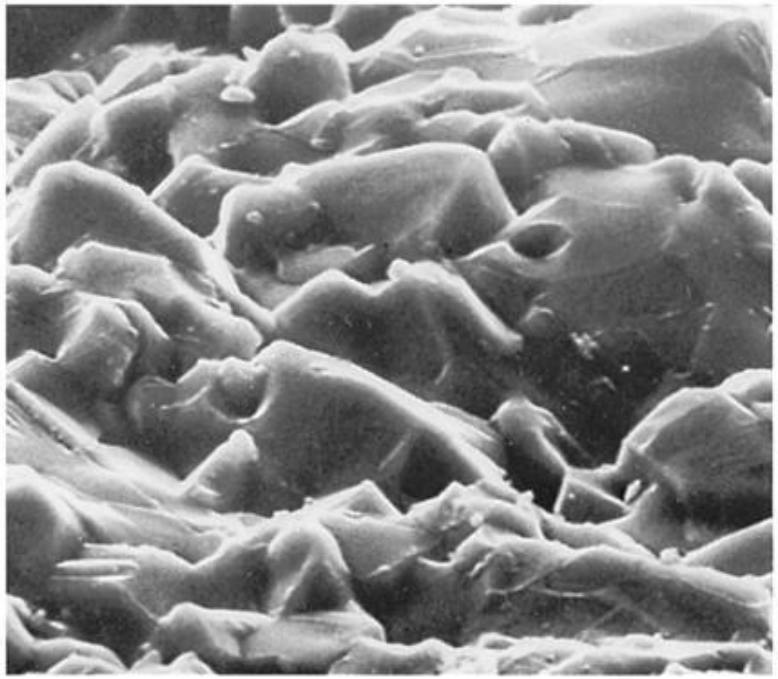
- La superficie di frattura mostra una tessitura tipo chevron
- La punta della tessitura a chevron permette di individuare la zona dove la rottura si è innescata



Il pattern Chevron si forma mentre la fessura si propaga dall'origine a diversi livelli. Il modello punta all'origine

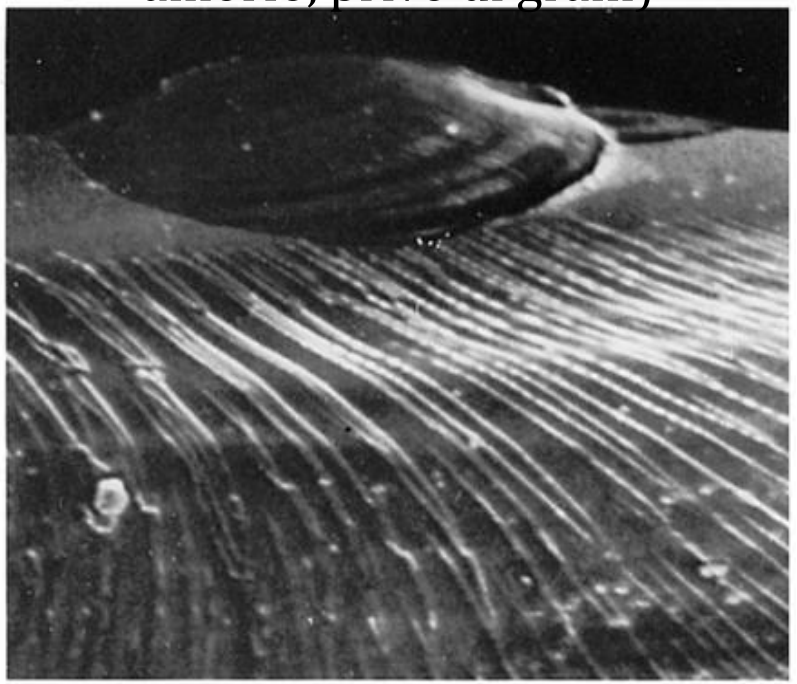
Frattura di materiali fragili

Frattura intergranulare in un materiale ceramico



(a)

Frattura nel vetro (materiale amorfo, privo di grani)



(b)

(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

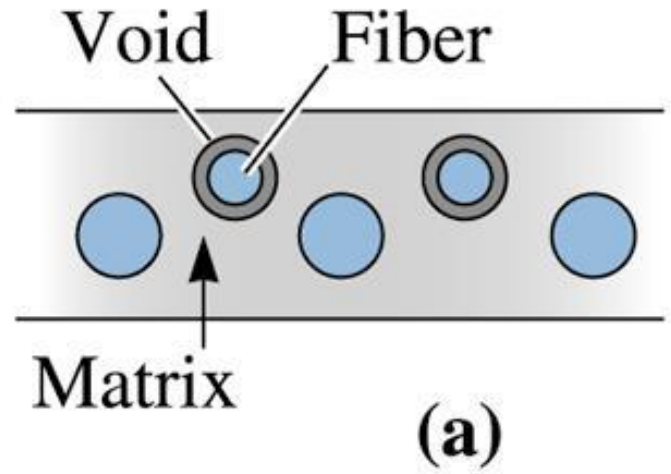
Scansione di micrografie elettroniche di superfici fratturate in ceramica.

La superficie della frattura Al_2O_3, mostra le facce della scollatura (x 1250)

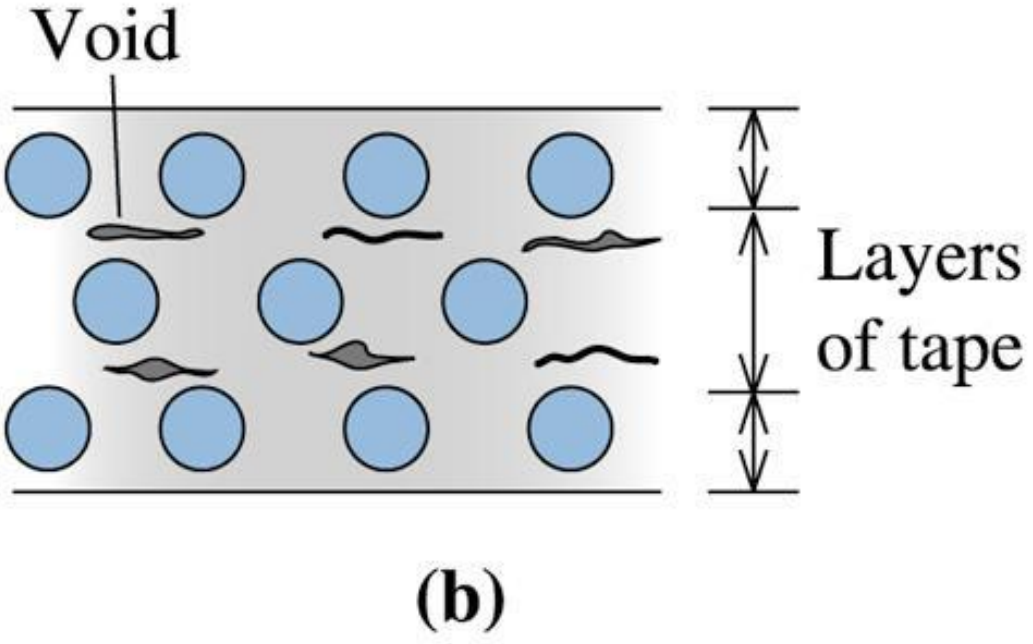
La superficie della frattura del vetro, che mostra la zona dello specchio (in alto) e le linee di rottura caratteristiche della frattura concoide (x 300)

Meccanismi di frattura in materiali compositi

I compositi rinforzati con fibre possono rompersi con diversi meccanismi.



A causa del debole legame tra la matrice e le fibre, le fibre possono staccarsi dalla matrice, creando vuoti.



Se i singoli strati della matrice sono scarsamente legati, la matrice può delaminarsi, creando vuoti.

(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

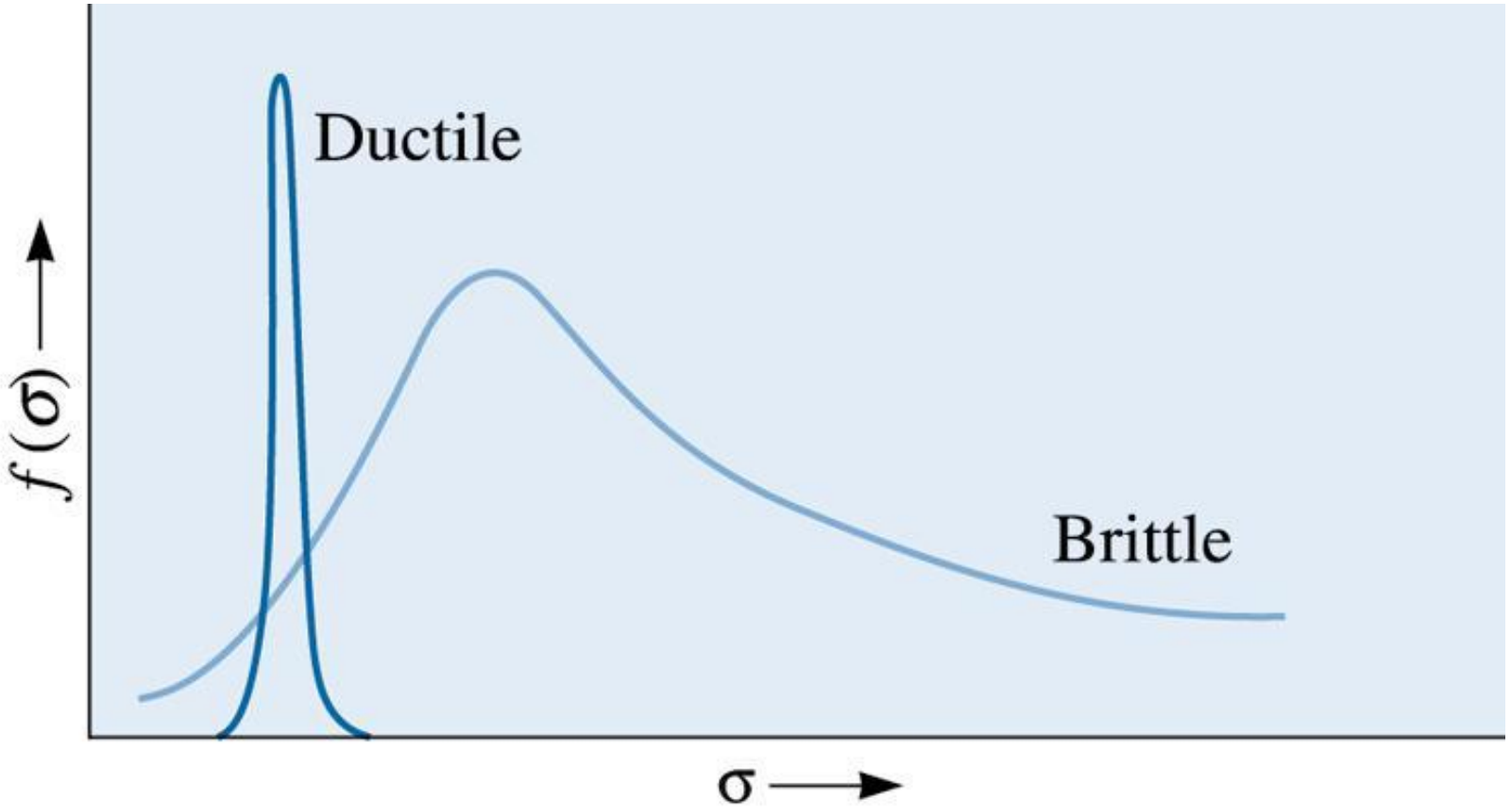
Trattazione statistica della resistenza meccanica in materiali fragili

- La statistica e il modulo di Weibull -

Distribuzione di Weibull: una distribuzione matematica che mostra la probabilità di fallimento o sopravvivenza di un materiale in funzione dello stress.

Distribuzione di Weibull

- Probabilità di frattura in funzione dello sforzo applicato -



(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

La distribuzione di Weibull descrive la frazione dei campioni che si rompe ad ogni dato stress applicato

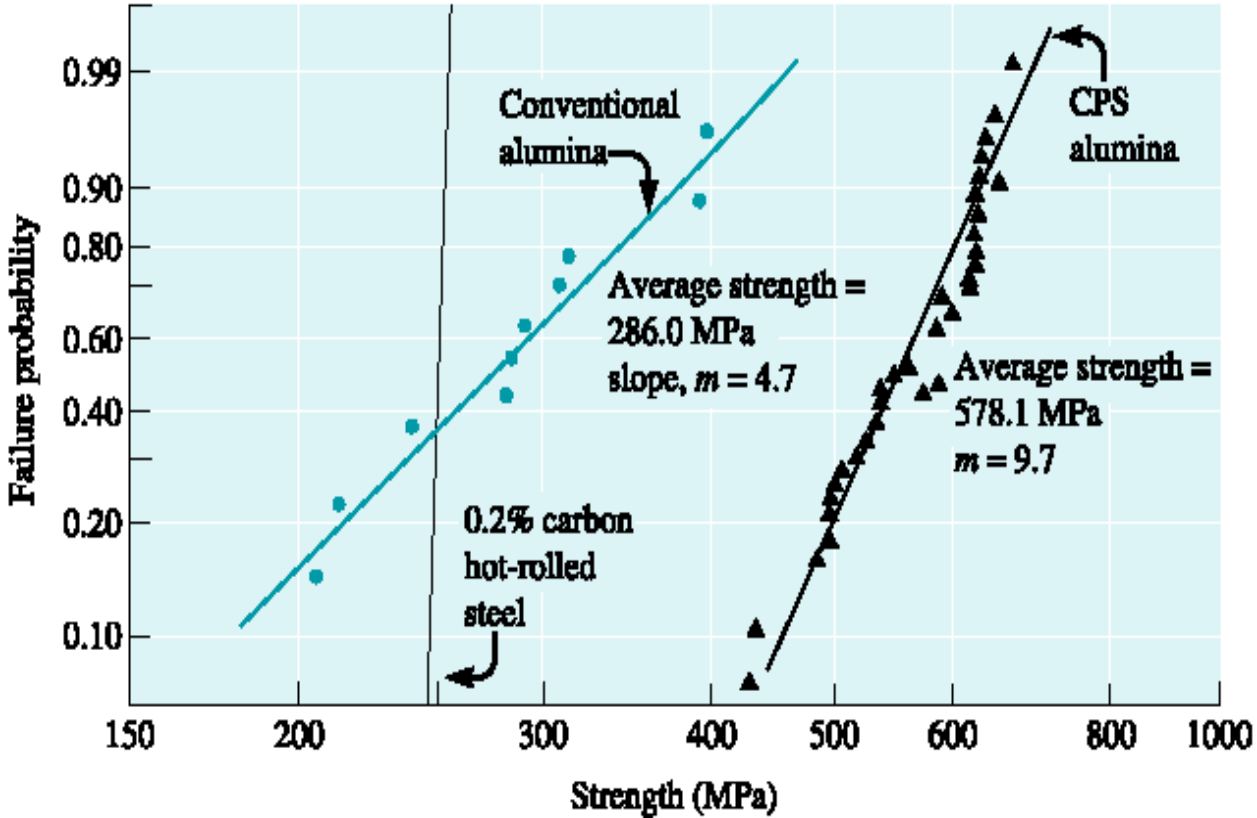
Distribuzione di Weibull

- Probabilità di frattura in funzione dello sforzo applicato -

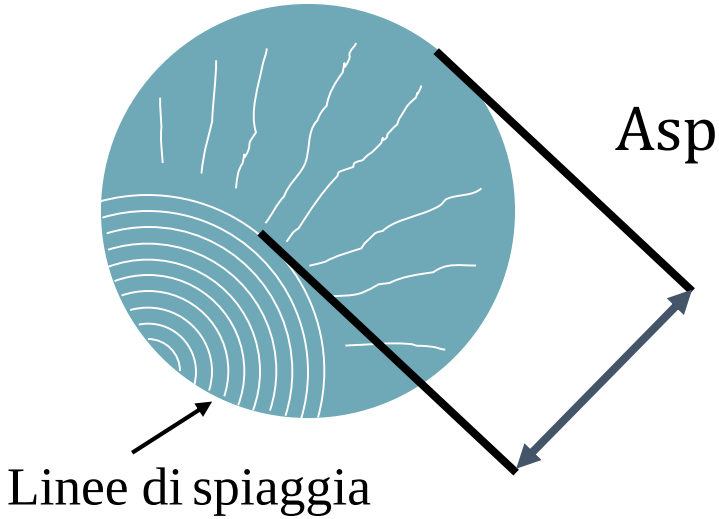
Rappresentazione con scale logaritmiche dà luogo a rette la cui pendenza è il modulo di Weibull

$$1 - F(V) = \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right]$$

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1 - F(V)}\right)\right] = m(\ln \sigma - \ln \sigma_0)$$

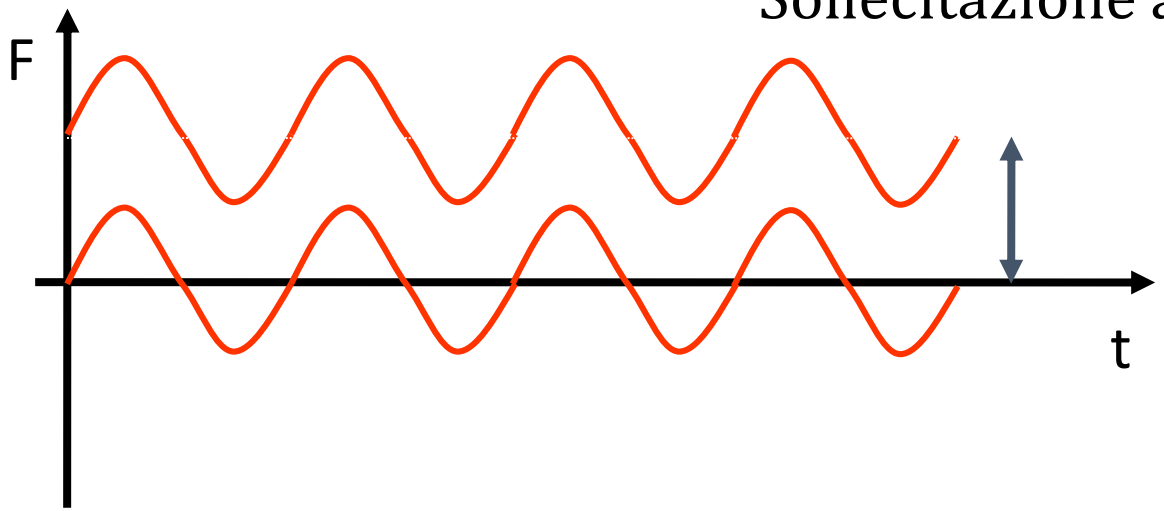


Fatica



Aspetto di frattura a fatica

Sollecitazione a fatica



Fatica

- **Fatica**: diminuzione della resistenza o del cedimento di un materiale a causa di sollecitazioni ripetitive che possono essere al di sopra o al di sotto della resistenza allo snervamento.
- **Creep**: deformazione permanente ad alte temperature dipendente dal tempo, che si verifica a carico costante o sollecitazione costante.
- **Linee di spiaggia o a conchiglia**: pattern che compaiono spesso su un componente soggetto a fatica.
- **Prove di fatica a flessione rotante**: una vecchia tipologia di test di fatica.
- **Curva S-N (nota anche come curva di Wöhler)**: grafico che indica lo stress in funzione del numero di cicli nella fatica.

Fatica

Fasi

- Innesco della cricca
- Crescita della cricca lungo le bande di scorrimento
- Crescita della cricca per sforzo di trazione
- Rottura

Fattori che influenzano la resistenza a fatica

- Concentrazione degli sforzi
- Rugosità superficiale
- Condizione superficiale
- Ambiente corrosivo

Fatica

Il cedimento strutturale nei materiali metallici (tenaci!) può avvenire per sovraccarico o per fatica.

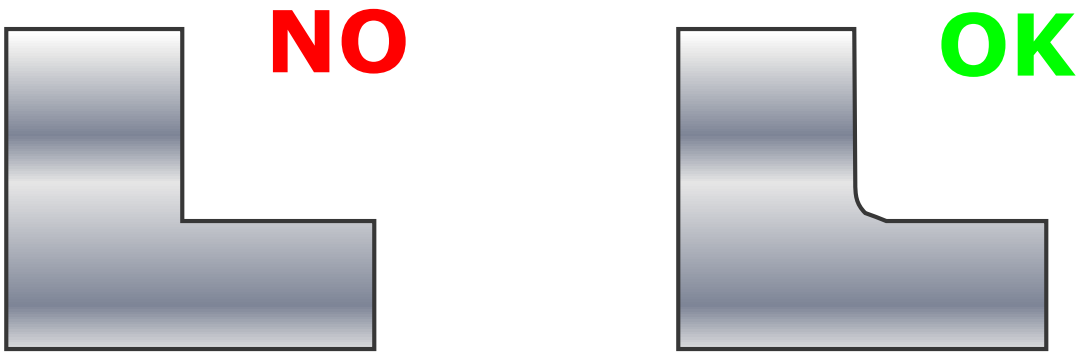
La verifica di un componente soggetto a carichi ciclici va effettuata secondo i **criteri tradizionali (σ_y + coeff. di sicurezza)**, ma anche tenendo presenti i **fenomeni di fatica**.

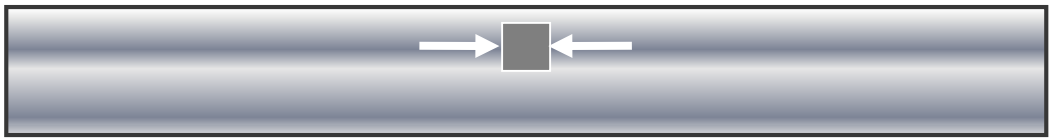
Uno dei parametri a disposizione del progettista è il **grado di finitura superficiale**. Infatti la durata della fase I di sviluppo del danno di fatica, detta anche fase di innesco può essere notevolmente ridotta – e talvolta annullata - dalla presenza di difetti microgeometrici. Questo fatto è particolarmente importante qualora il componente non sia sostituibile.

Fatica

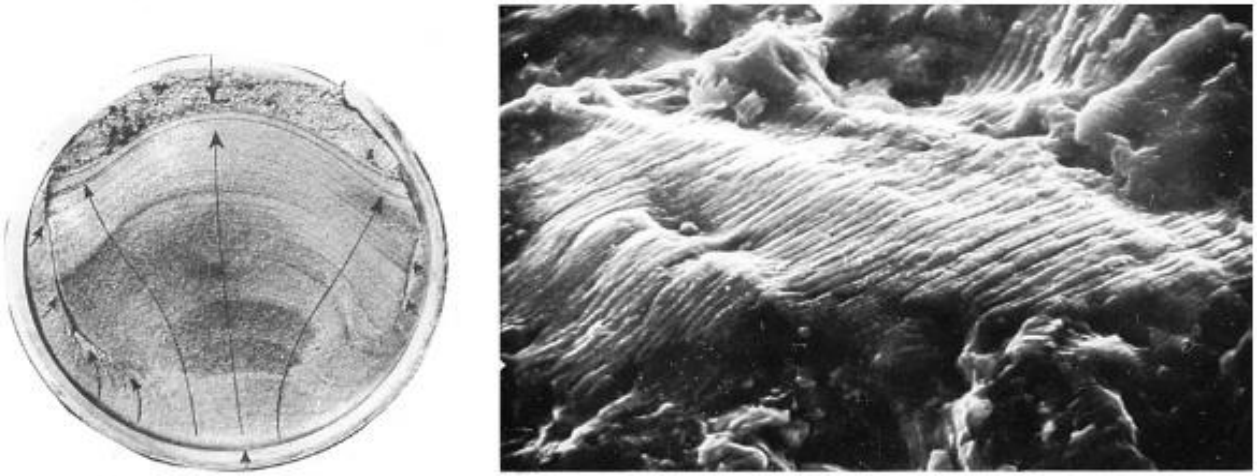
Altri possibili interventi

- Geometria
- Trattamenti superficiali (pallinatura, cementazione, ecc.)
- Protezione dagli agenti corrosivi





Superficie di frattura di componenti rotti per fatica

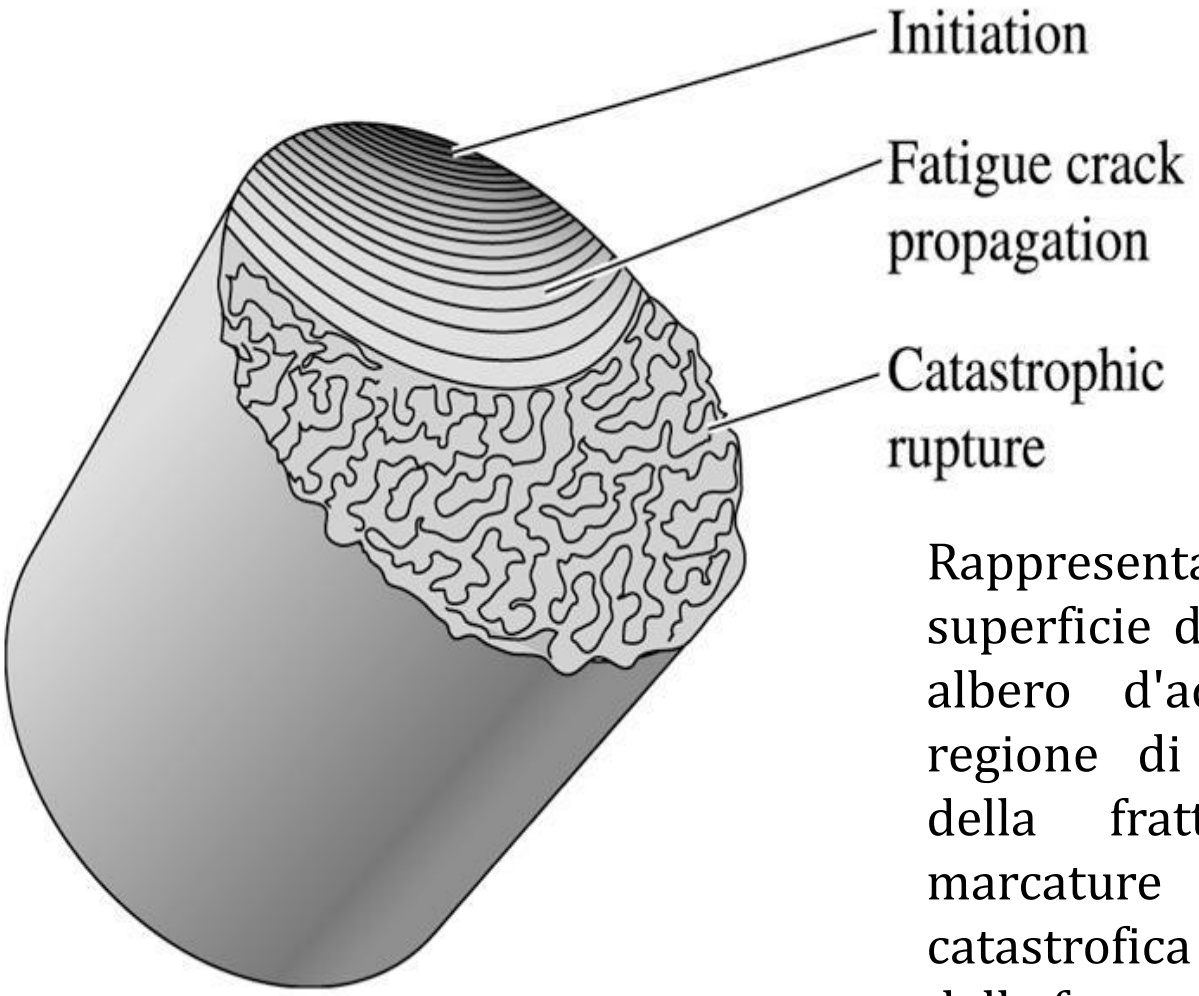


Fatigue fracture surface.

A bassi ingrandimenti, i segni di spiaggia indica la fatica come meccanismo di frattura. Le frecce mostrano la direzione di crescita del fronte della cricca, la cui origine è nella parte inferiore della fotografia. (*Image* (a) *is from C.C. Cottell, "Fatigue Failures with Special Reference to Fracture Characteristics,"* Failure Analysis: The British Engine Technical Reports, *American Society for Metals, 1981, p. 318.*)

Ad ingrandimenti molto elevati, si osservano striature ravvicinate che si sono formate durante la fatica (x 1000).

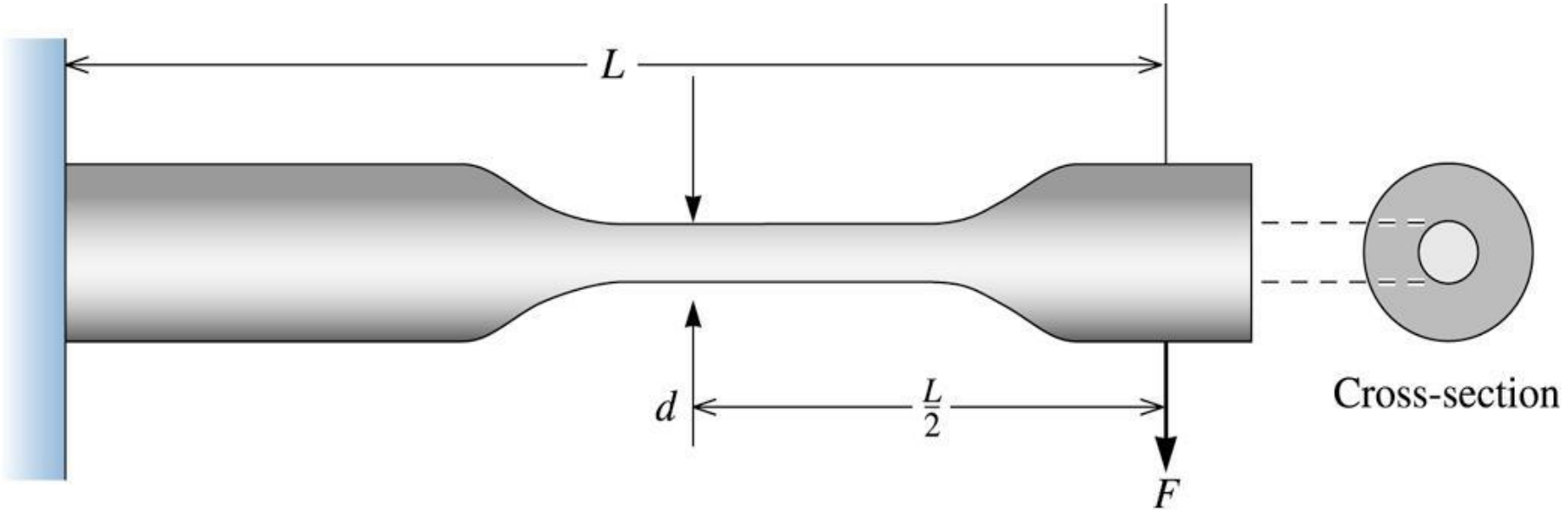
Superficie di frattura di componenti rotti per fatica



(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Rappresentazione schematica di una superficie di frattura da fatica di un albero d'acciaio. Si evidenzia la regione di inizio, la propagazione della frattura da fatica (con marcature del fascio) e la rottura catastrofica quando la lunghezza della frattura supera un valore critico alla sollecitazione applicata.

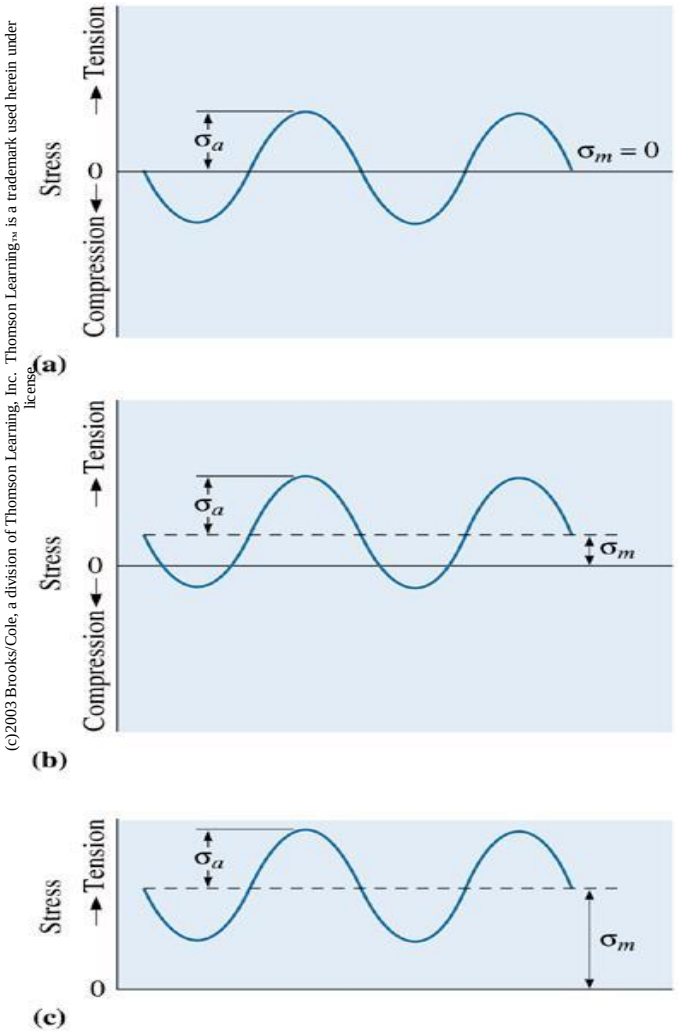
Geometria di un tipico provino per test di fatica



(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Geometria del provino per la prova di fatica a flessione rotante

Possibili carichi ciclici



(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

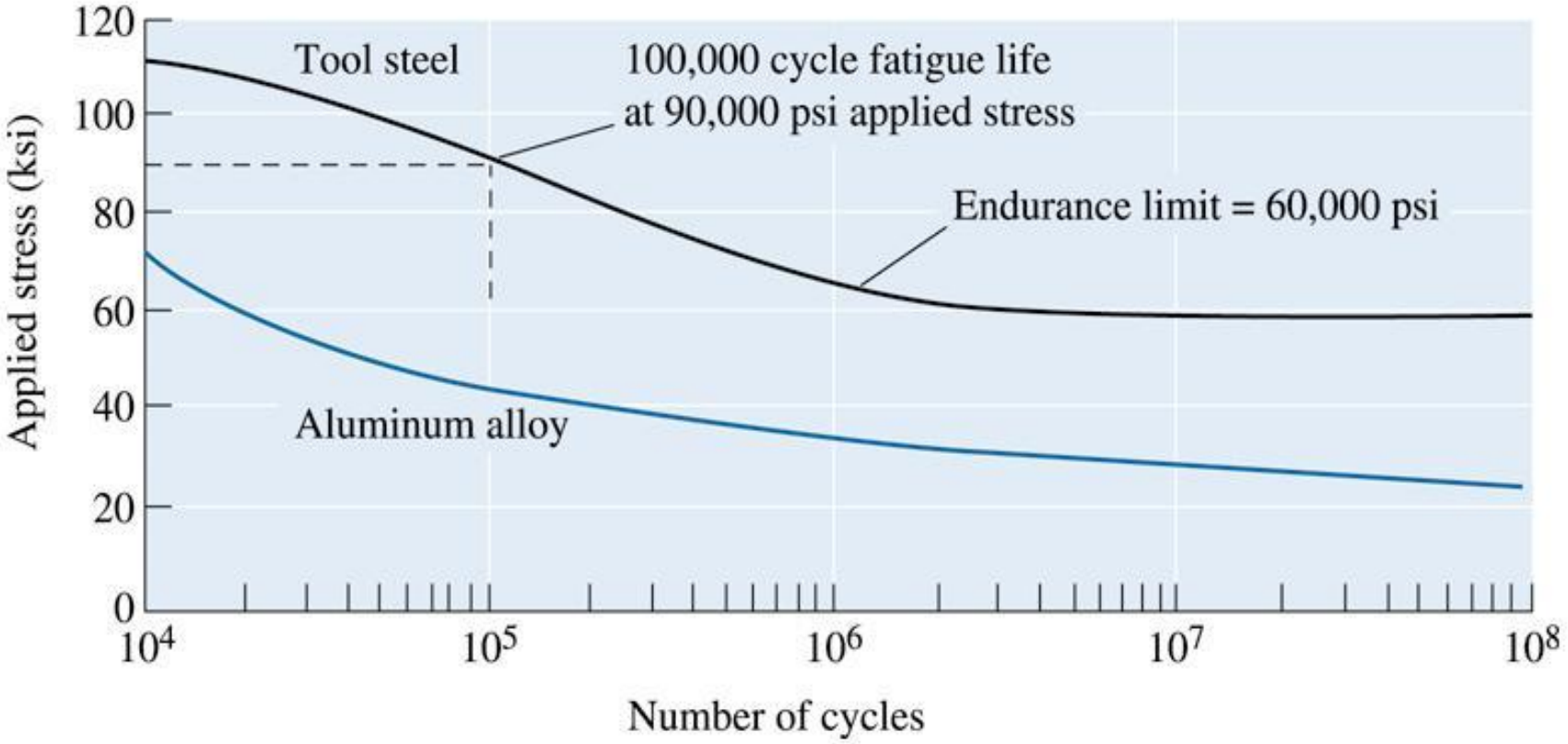
Esempi di carichi ciclici:

Sollecitazioni uguali in tensione e compressione

Sollecitazioni maggiori di trazione rispetto alle sollecitazioni di compressione

Sollecitazioni in un unico verso (ad esempio solo tensioni o solo compressioni)

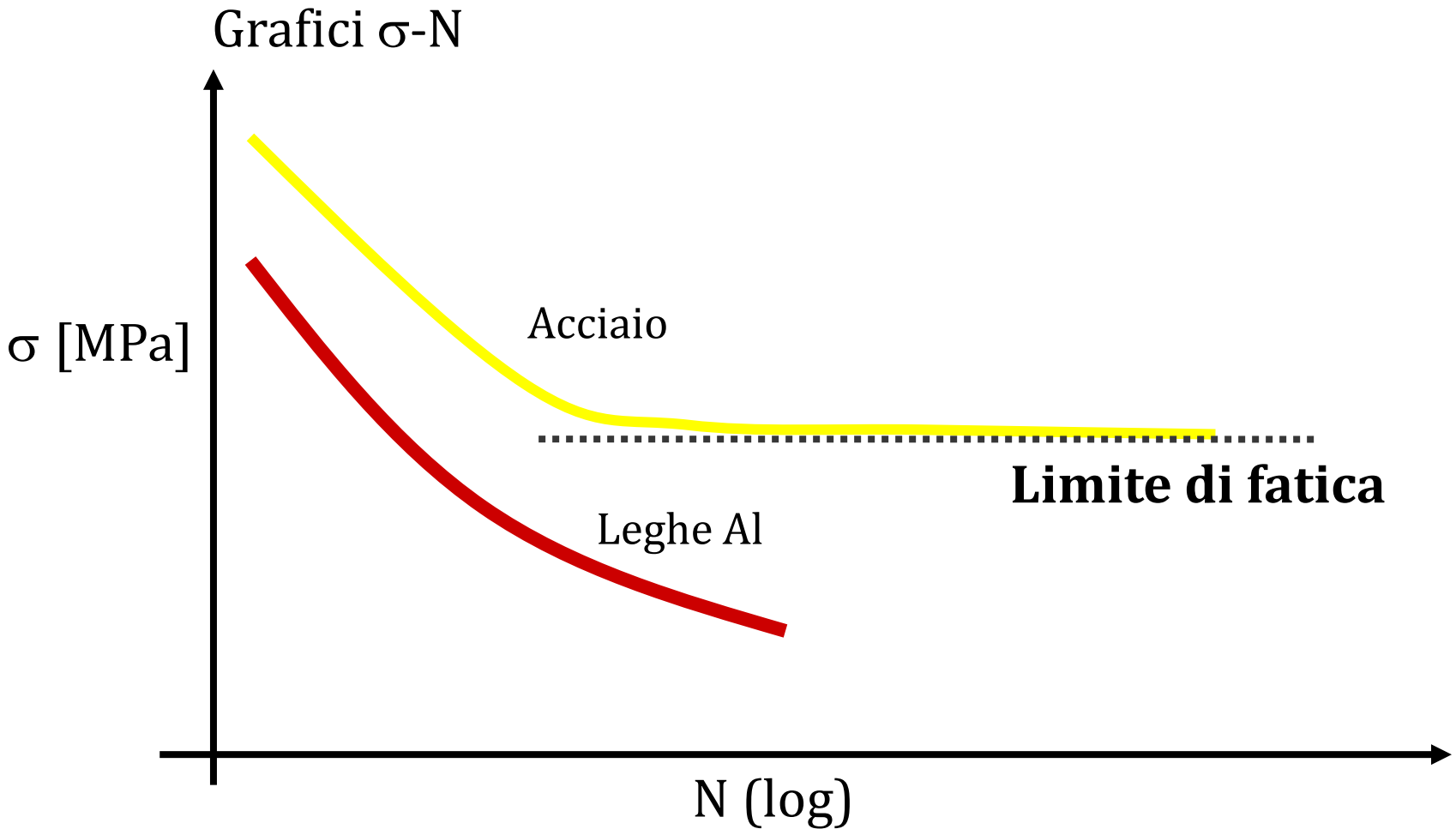
Curva di Wöhler



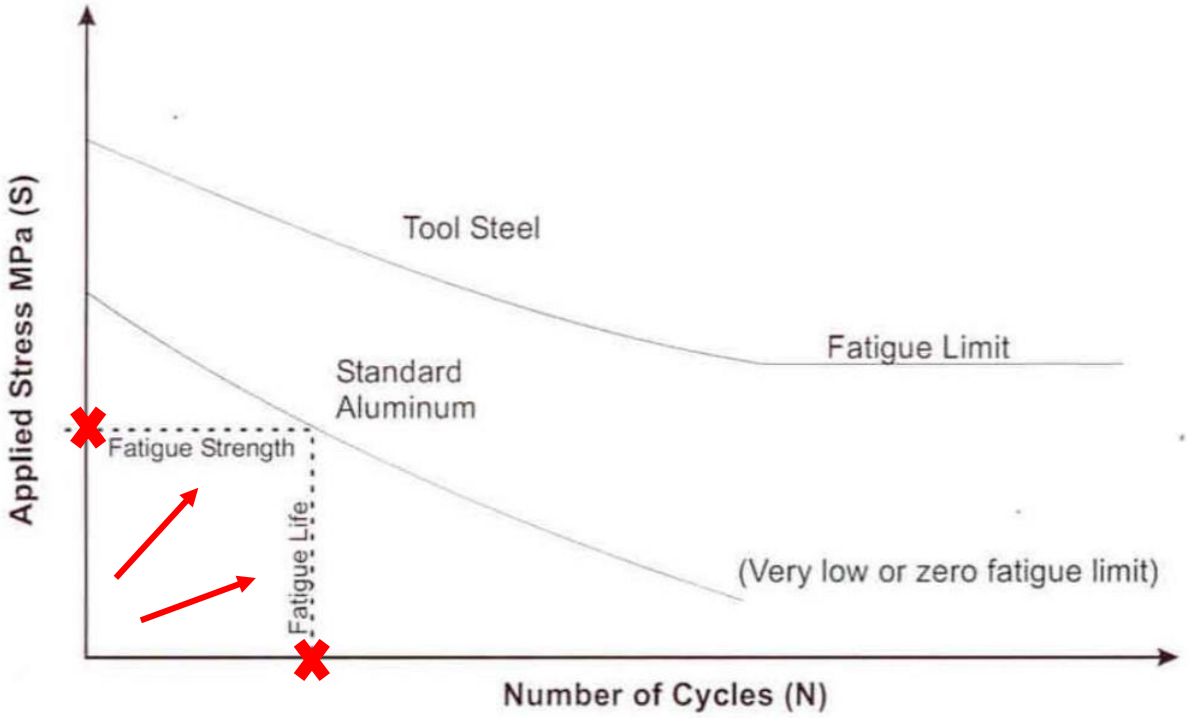
(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

La curva di Wöhler rappresenta l'andamento dello stress in funzione del numero di cicli a rottora (S-N). Nell'immagine sono riportate le curve per un acciaio per utensili e una lega di alluminio.

Limite di fatica



Limite di fatica – rapporto di fatica



$$\varphi = \frac{\sigma_l}{\sigma_r}$$

Rapporto di fatica:
il rapporto tra limite di fatica o resistenza a fatica e resistenza a trazione statica di un materiale

Limite di fatica – rapporto di fatica

Per gli **acciai**:
il limite di fatica medio per provini a flessione rotante è solitamente ottenuto con le seguenti relazioni:

$\sigma_l = 0{,}5\ \sigma_r$ per $\sigma_r \leq 1400$ MPa

$\sigma_l = 700$ MPa per $\sigma_r > 1400$ MPa

Nel caso della **ghisa**:
il limite di fatica può essere ottenuto mediante la seguente relazione:

$\sigma_l = 0{,}4\ \sigma_r$

Le **leghe** di **magnesio** ed **alluminio non hanno un limite di fatica** e si assume un valore compreso fra il 30 e il 40% della resistenza a trazione per una vita pari a 10^8 o $5 \cdot 10^8$ cicli:

$\sigma_l = 0{,}3\text{-}0{,}4\ \sigma_r$ per $\sigma_r \leq 340$ MPa

$\sigma_l = 140$ MPa per $\sigma_r > 340$ MPa

Limite di fatica – rapporto di fatica

Caratteristiche delle prove	
Tensione	Monoassiale
Storia temporale	Ampiezza costante
	Valor medio nullo
Sollecitazione	Flessione rotante
	Trazione-compressione
Provini	Dimensioni ridotte
	Ottima finitura superficiale

Caratteristiche delle prove per la determinazione sperimentale della curva di Wöhler.

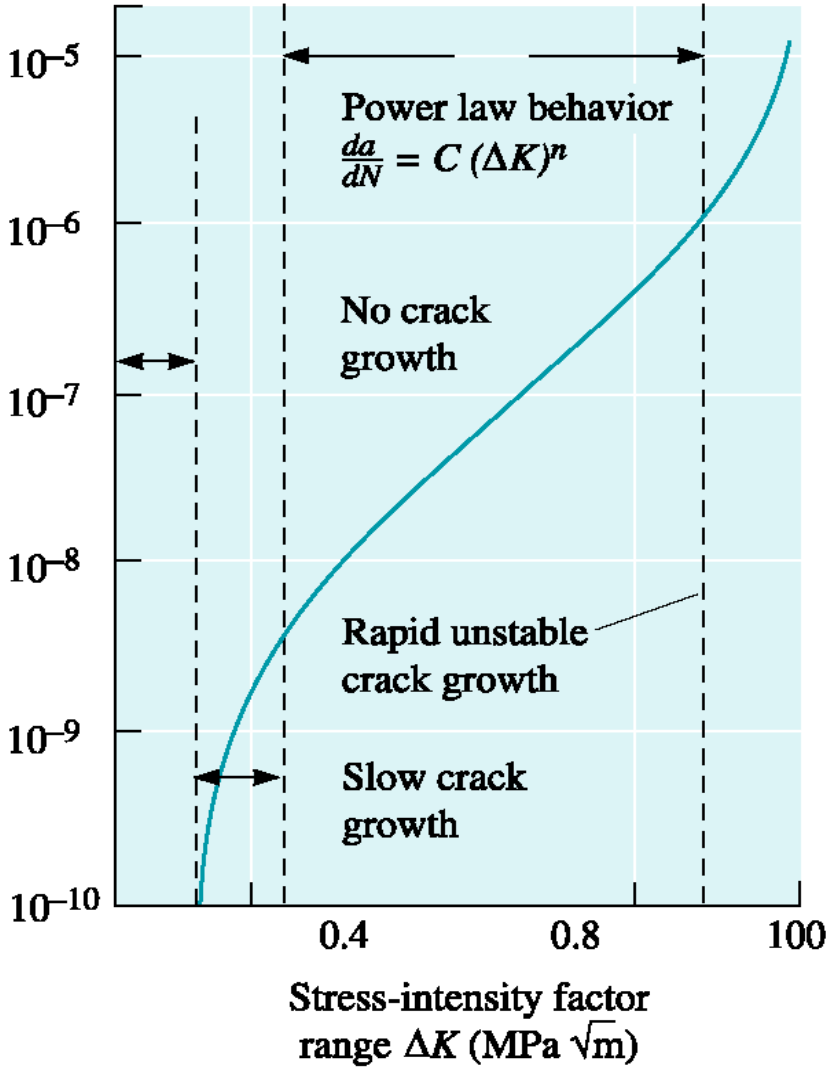
Materiale	ϕ	N_l
Acciaio	0.5	10^6
Ghisa	0.4	10^6
Ghise grige	0.34-0.46	10^6
Titanio e leghe	0.40-0.65	10^6
Leghe rame	0.25-0.5	10^8
Leghe nichel	0.35-0.5	10^8
Leghe alluminio	0.4	$5\ 10^8$
Leghe magnesio	0.35	10^8

Valore di φ e di N_l per alcuni materiali.

Risultati del test di fatica

- **Limite di resistenza**: un concetto antiquato che definiva uno stress al di sotto del quale un materiale non fallisce in un test di fatica.
- **Durata della fatica**: il numero di cicli consentiti in una particolare sollecitazione prima che un materiale si rompa per fatica.
- **Resistenza alla fatica**: lo stress richiesto per causare un rottura a causa della fatica in un dato numero di cicli, ad esempio 500 milioni di cicli.
- **Sensibilità all'intaglio**: misura l'effetto di un intaglio, un graffio o altre imperfezioni sulle proprietà di un materiale, come la resistenza o la durata a fatica.
- **Pallinatura**: un processo in cui le sfere metalliche vengono lanciate contro un componente.

Rapidità di crescita della cricca sotto carichi ciclici in funzione del fattore di intensificazione degli sforzi



Tasso di crescita della cricca rispetto ai diversi fattori di intensificazione dello stress per un acciaio ad alta resistenza. Per questo acciaio, C = 1.62×10^{12} e n = 3,2 per le unità presentate.

Creep

A temperature elevate diventa importante anche il movimento di atomi poiché cresce la concentrazione di vacanze e la velocità di diffusione.

Quindi, un **materiale sottoposto ad un carico costante** anche non elevato, **al di sopra di una certa temperatura si deforma nel tempo in modo continuo e permanente** ($T>0.3\text{-}0.4$ per i metalli, $T>0.4\text{-}0.5$ per i ceramici, $T \geq Tg$ per i materiali amorfi).

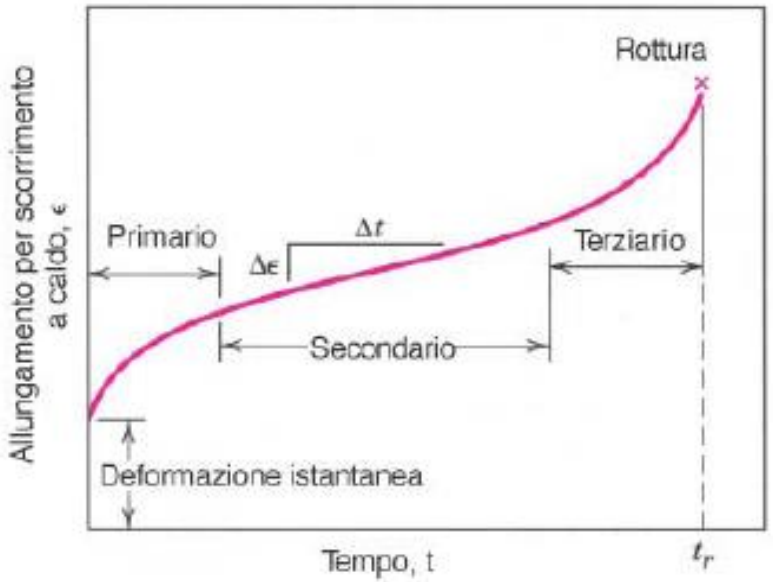
Il fenomeno è detto SCORRIMENTO VISCOSO A CALDO o CREEP.

Creep

È un fenomeno per il quale il materiale cede per meccanismi che si innescano in tempi lunghi e/o a causa di elevate temperature

La **curva di sollecitazione da rottura** rappresenta un metodo per riportare i risultati di una serie di test di scorrimento, tracciando la sollecitazione applicata rispetto al tempo di rottura.

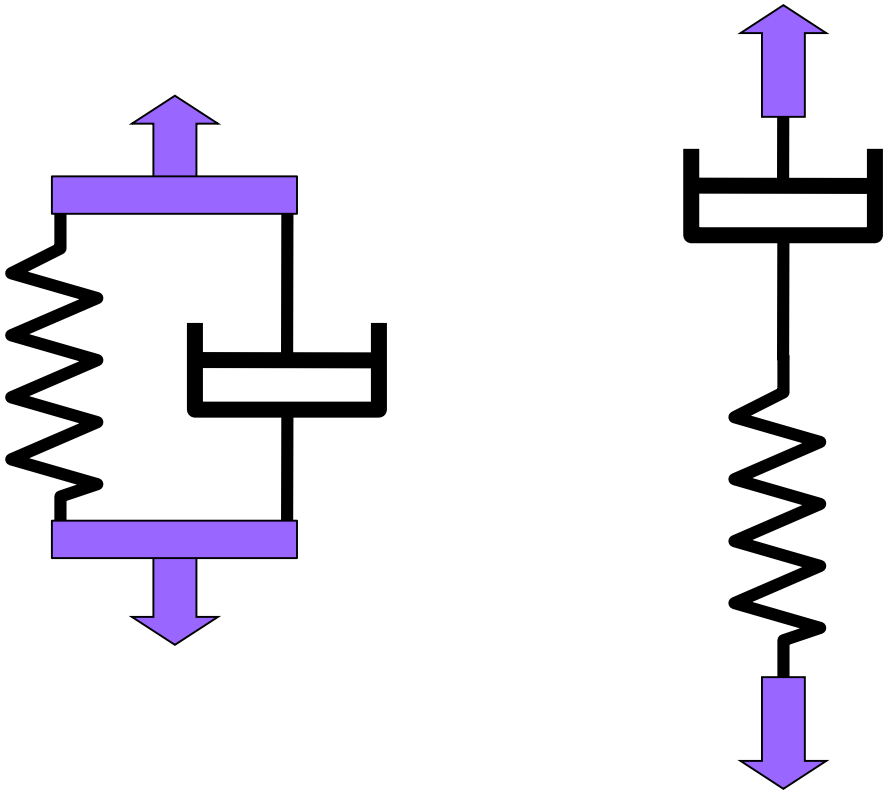
Creep



Creep primario: la velocità di deformazione dε/dt diminuisce ad es. per effetto dell'incrudimento
Creep secondario: oltre all'incrudimento si ha anche il ripristino della struttura (grazie a meccanismi diffusivi)
Creep terziario: la formazione di pori, cavità e collo determina la diminuzione della sezione effettiva

Creep nei polimeri

Nei materiali polimerici si ha scorrimento viscoelastico se la temperatura è maggiore di quella di transizione vetrosa (T_g).

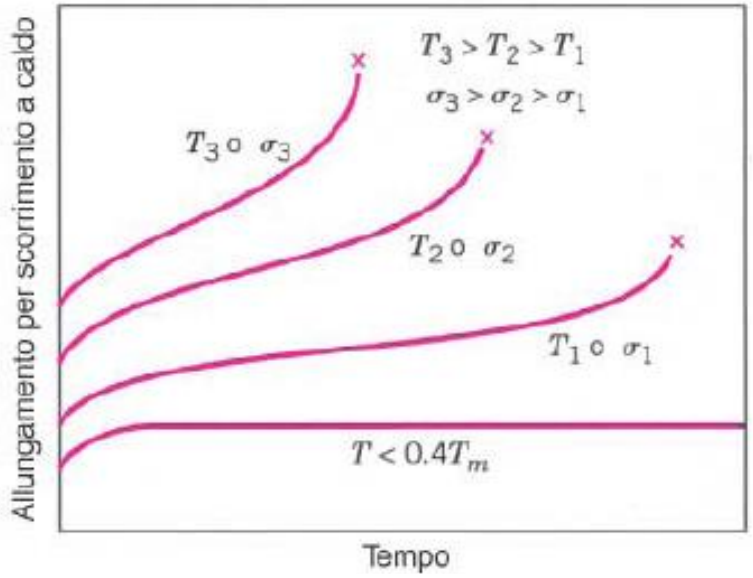


Meccanismi responsabili del creep

- **moto di dislocazioni** (metalli e materiali ceramici) che possono anche modificare il loro piano di scorrimento e quindi superare ostacoli grazie ai meccanismi di diffusione possibili a queste temperature.

- **scorrimento dei bordi di grano** (in cui la concentrazione di vacanze è elevata): materiali a grana grossa o monocristalli sono quindi maggiormente resistenti al creep.

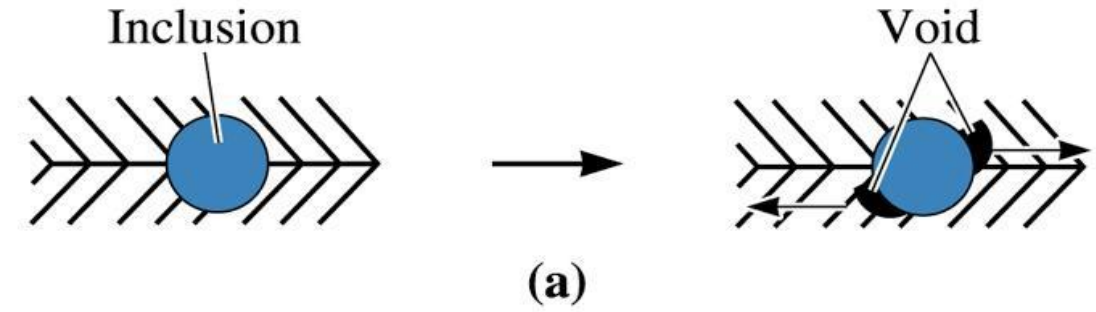
- **rammollimento della fase vetrosa** che va quindi minimizzata se si vuole aumentare la resistenza al creep (materiali refrattari).



Curva di creep per temperature crescenti e carichi costanti

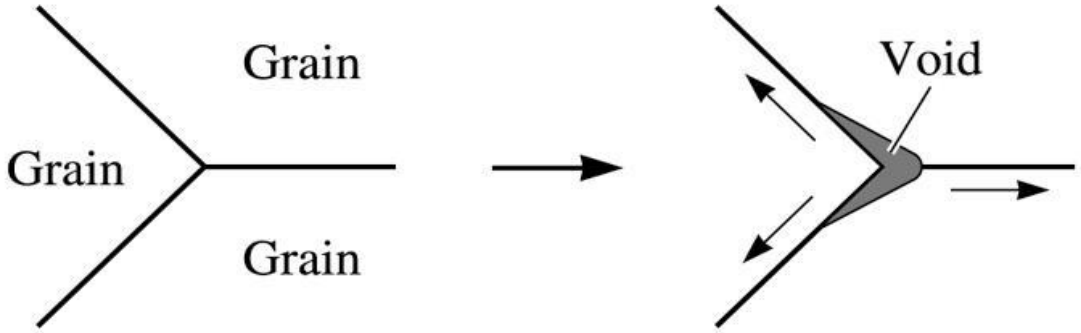
Meccanismi associati al creep: slittamento dei bordi di grano

Lo scorrimento del grano durante il creep provoca:



(a)

- la creazione di vuoti in un'inclusione intrappolata al limite del grano

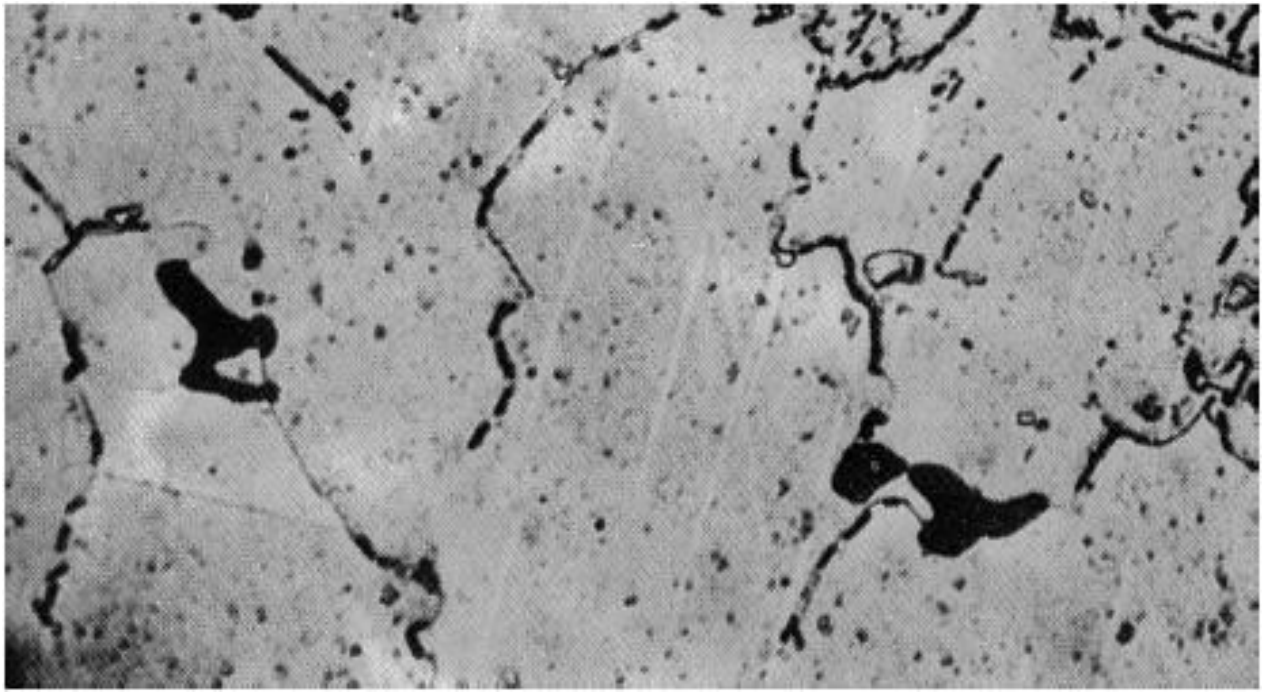


(b)

- la creazione di un vuoto in un punto triplo in cui tre grani si incontrano.

(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Osservazione di cavità determinate da meccanismi di creep



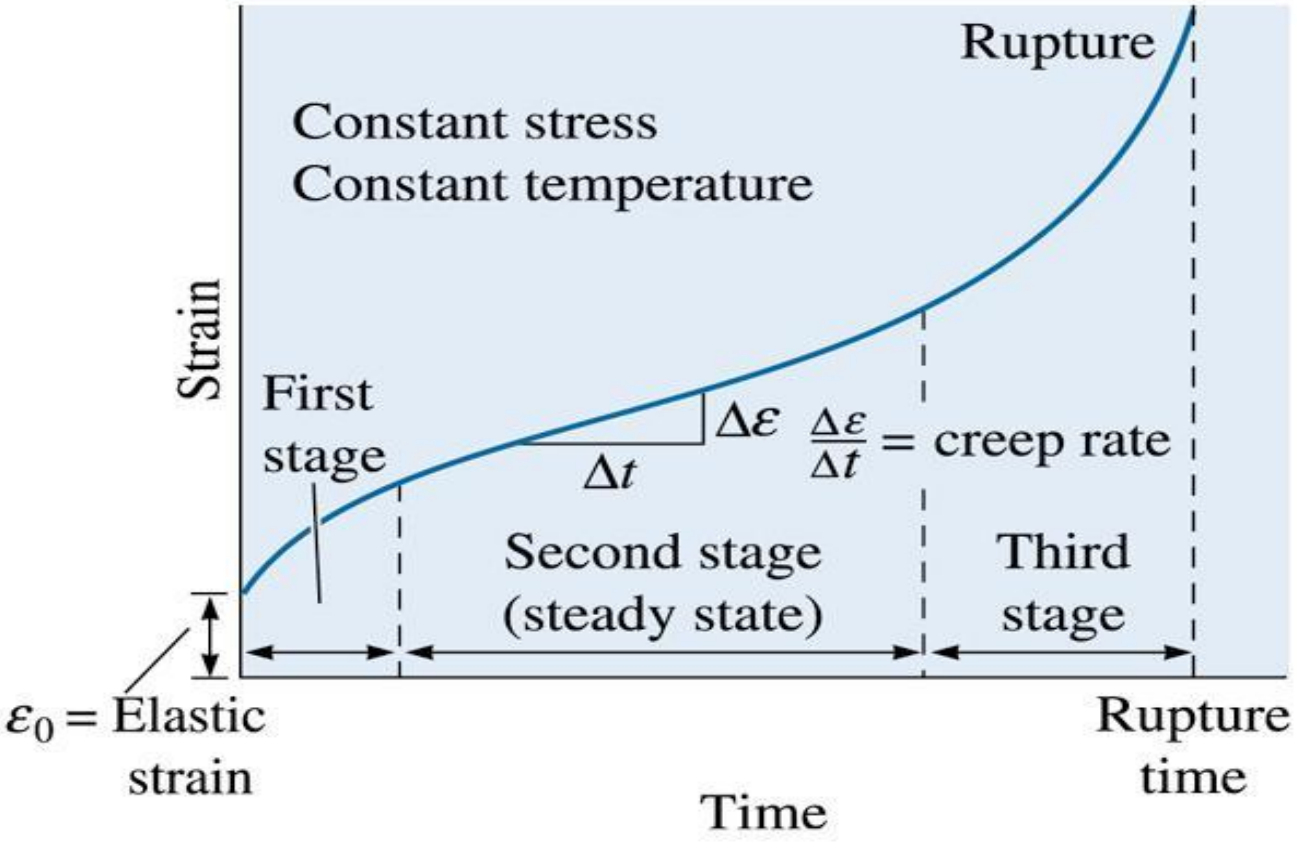
Cavità dovute al creep formate ai bordi del grano in un acciaio inossidabile austenitico (x 500).

(*From* ASM Handbook, *Vol. 7, (1972) ASM International, Materials Park, OH 44073*.)

Valutazione del comportamento dei materiali rispetto al creep

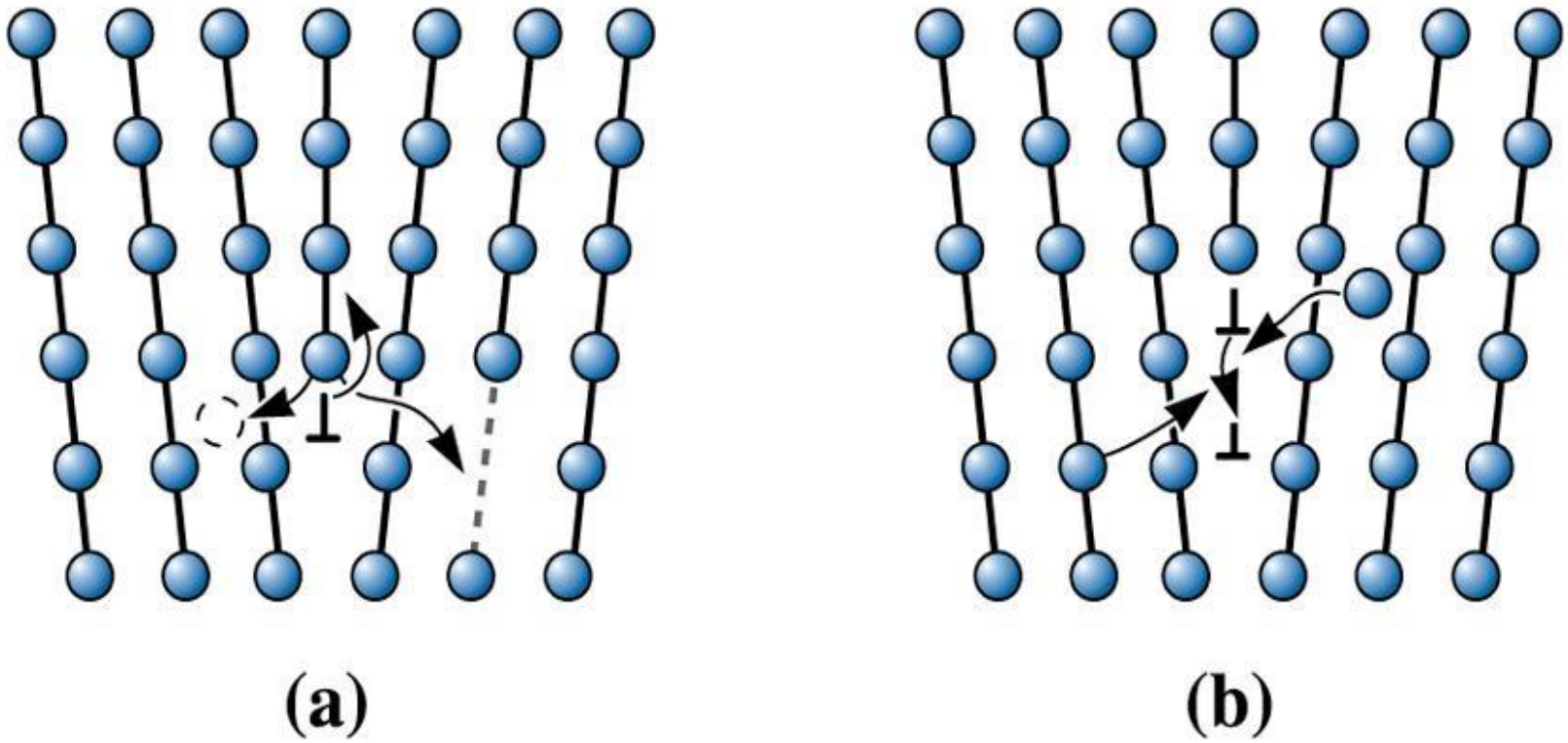
- **Test di scorrimento o test di creep**: misura la resistenza di un materiale alla deformazione e al cedimento, quando sottoposto a un carico statico inferiore alla resistenza allo snervamento a una temperatura elevata.
- **Climb**: movimento di una dislocazione perpendicolare al suo piano di scorrimento per diffusione di atomi verso o dalla linea di dislocazione.
- **Velocità di scorrimento**: velocità con cui un materiale si deforma quando viene applicato uno stress ad alta temperatura.
- **Tempo di rottura**: tempo necessario per un campione a fallire a causa di una temperatura e stress particolari.

Tipico andamento della deformazione in funzione del tempo data un certo sforzo applicato ed una certa temperatura



(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

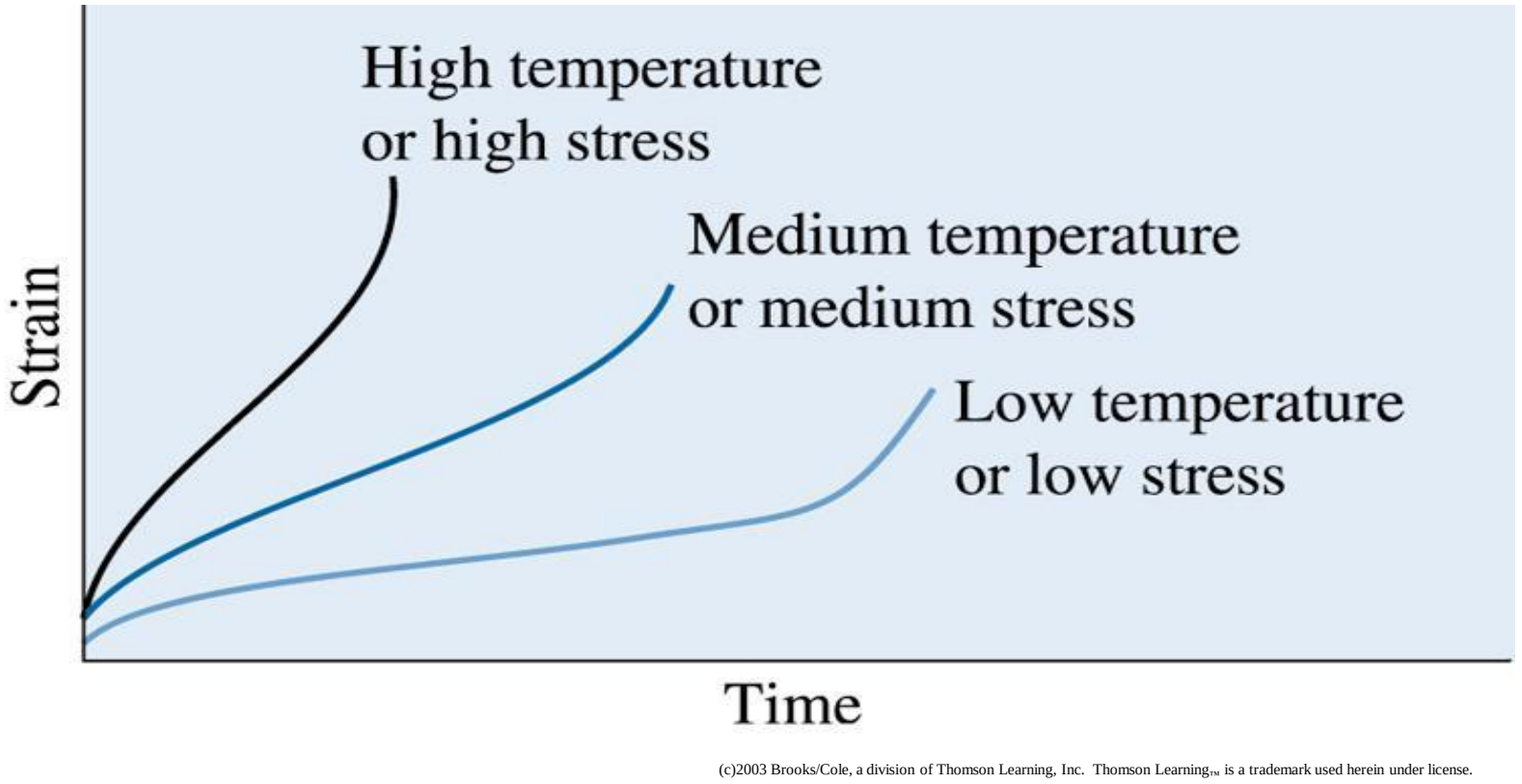
Una tipica curva di scorrimento che mostra la deformazione prodotta in funzione del tempo per uno stress e una temperatura costanti



(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Le dislocazioni possono salire (a) quando gli atomi escono dalla linea di dislocazione per creare difetti interstiziali o per riempire le vacanze oppure (b) quando gli atomi sono collegati alla linea di dislocazione creando vacanze o eliminando difetti interstiziali.

Effetto della temperatura e dello sforzo



(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Effetto della temperature e dello stress applicato su una curva di creep.

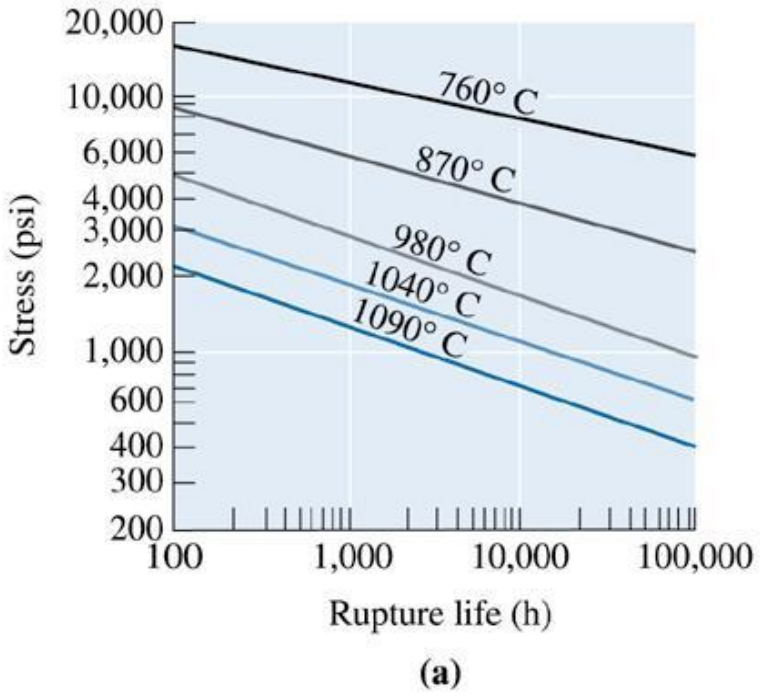
Utilizzo nella pratica dei dati di creep

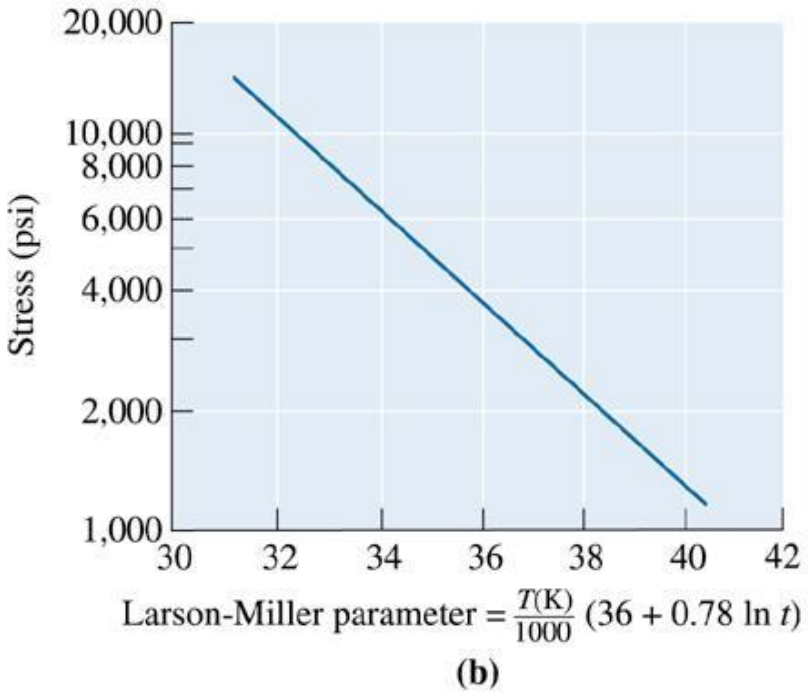
- **Curva di sollecitazione da rottura**: metodo per riportare i risultati di una serie di test di scorrimento, disegnando la sollecitazione applicata rispetto al tempo di rottura.

- **Parametro Larson-Miller**: parametro utilizzato per mettere in relazione lo stress, la temperatura e il tempo di rottura in scorrimento.

Utilizzo nella pratica dei dati di creep
Parametro di Larson-Miller

Risultati di una serie di test di creep:





(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Curve di rottura da sforzo per una lega ferro-cromo-nichel

Parametro Larson-Miller per la ghisa sferoidale