

Geologia Strutturale 2022-23

**REOLOGIA DEI
MATERIALI**

Prof. L. Ferranti



Reologia

La reologia è lo studio della deformazione e del flusso di corpi ideali

I comportamenti dei corpi sottoposti a stress possono essere descritti dalla relazione che intercorre tra lo sforzo applicato e la deformazione prodotta.

Ci sono tre comportamenti ideali principali:

- 1) Comportamento elastico;
- 2) Comportamento viscoso;
- 3) Comportamento duttile.

Tuttavia le rocce mostrano un comportamento che può essere idealizzato

attraverso la combinazione di più comportamenti reologici che possono essere descritti da modelli analoghi variamente combinati.

Elasticità

Quando un materiale è sottoposto ad uno sforzo si deforma. Il materiale è detto perfettamente elastico se, quando lo sforzo è rimosso, la deformazione scompare istantaneamente e totalmente.

Questa teoria si basa su quattro assunzioni cioè che **il materiale è** :

- 1) **omogeneo**;
- 2) **isotropico**;
- 3) **le deformazioni elastiche sono infinitesimali**;
- 4) **il materiale ha una relazione sforzo-deformazione lineare**.

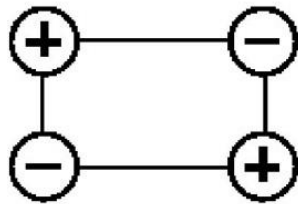
Un corpo è **omogeneo** se è composto ovunque dello stesso materiale.

Un corpo è **isotropo** se le proprietà fisiche sono uguali in tutte le direzioni.

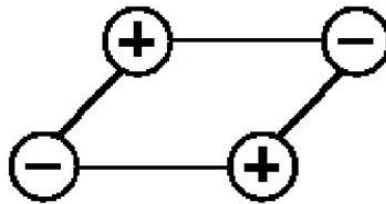
Tuttavia questi concetti sono legati alla scala di osservazione.

Cosa accade alla scala atomica?

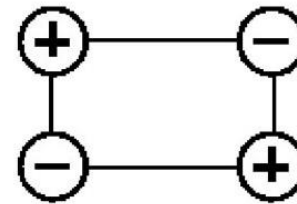
In elastic strain, we increase or decrease the bond length, r , but we don't actually break the bond. For example, an elastic simple shear of a crystal might look like:



original state

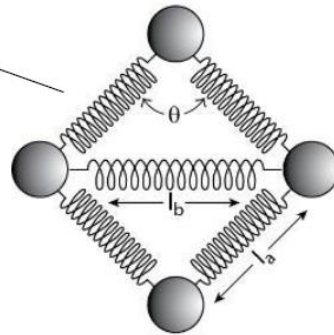


stress applied



stress removed

Atomic bonds are elastic, like springs

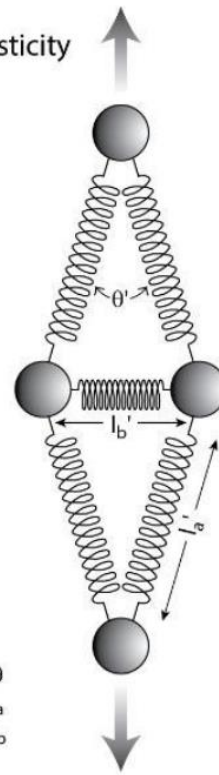


- Bonds:
- a) Equilibrium
 - b) Stretched
 - c) Broken

l = undistorted length
 l' = distorted length

$\theta' < \theta$
 $l'_a > l_a$
 $l'_b < l_b$

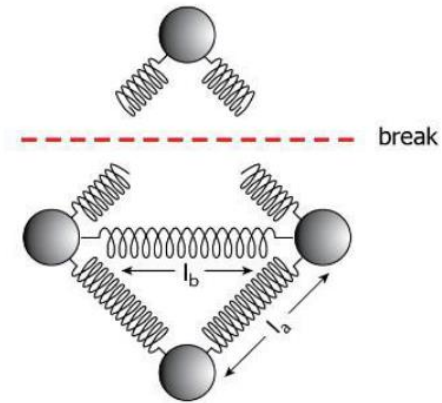
Elasticity



(a)

(b)

Failure



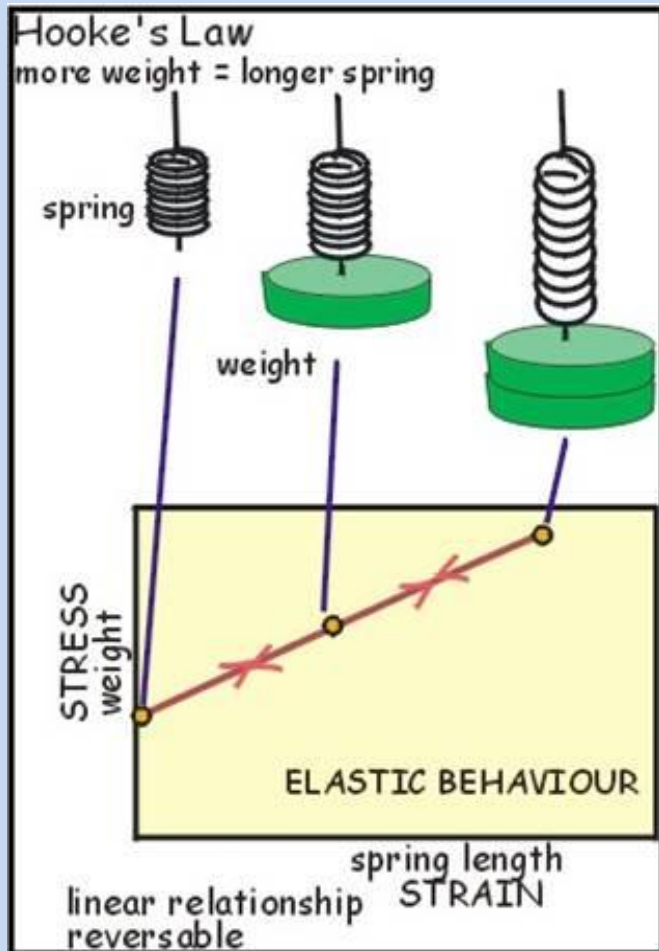
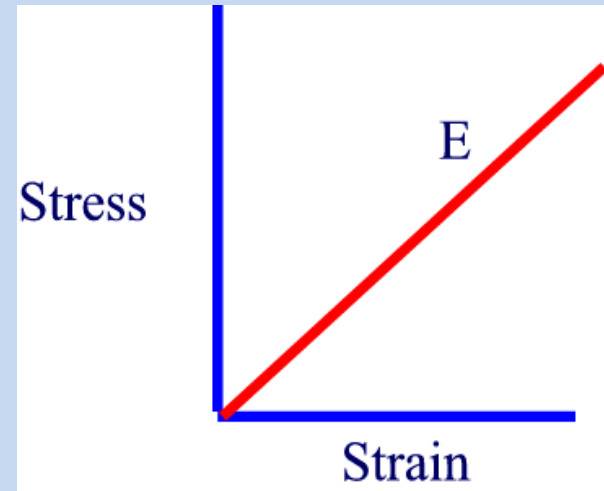
(c)

Relazione tra stress e strain

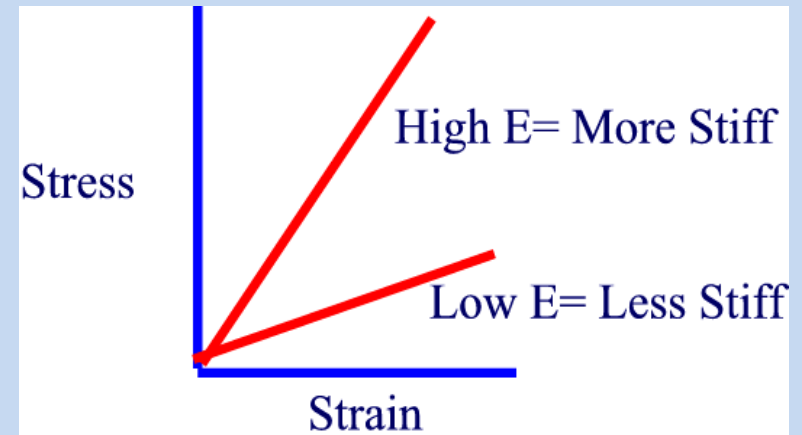
La relazione tra stress e strain è lineare:

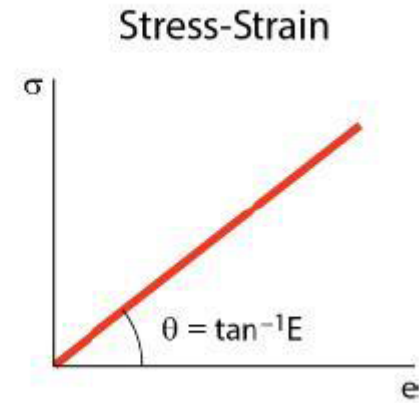
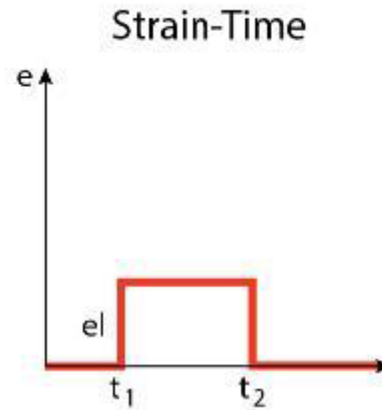
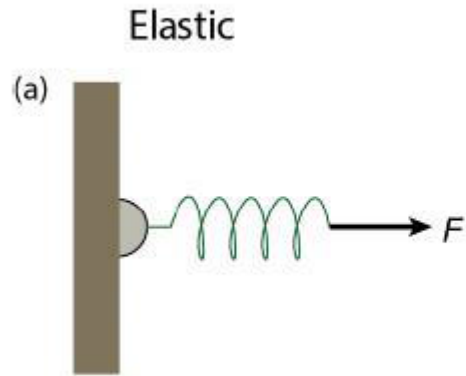
$$\sigma = E \varepsilon$$

La costante elastica E è detta Modulo di Young



$E \sim 10^{11}$ Pa per rocce cristalli. Se E cresce la retta diventa più inclinata ovvero la roccia è più "dura" (ci vuole più stress per romperla)





Medium	E (GPa)	ν (Poisson's ratio)
Iron	196	0.29
Rubber	0.01–0.1	almost 0.5
Quartz	72	0.16
Salt	40	~0.38
Diamond	1050–1200	0.2
Limestone	80	0.15–0.3
Sandstone	10–20	0.21–0.38
Shale	5–70	0.03–0.4
Gabbro	50–100	0.2–0.4
Granite	~50	0.1–0.25
Amphibolite	50–110	0.1–0.33
Marble	50–70	0.06–0.25

Elasticità

La relazione lineare tra sforzo e deformazione dipende dal tipo di strain coinvolto:

1. **longitudinal** strain: $\sigma = E \epsilon$, dove E è il *modulo di Young*

(il rapporto tra lateral strain and longitudinal strain è il **rapporto di Poisson** ν)

2. **shear** strain: $\tau = G \gamma$, dove G è il *modulo di rigidità*

3. **dilational** strain: $\sigma = K \Delta$, dove K è il *bulk modulus o incompressibility; resistenza al cambiamento di volume*

Il max dello strain elastico in natura è $\ll 5\%$

Viscosità

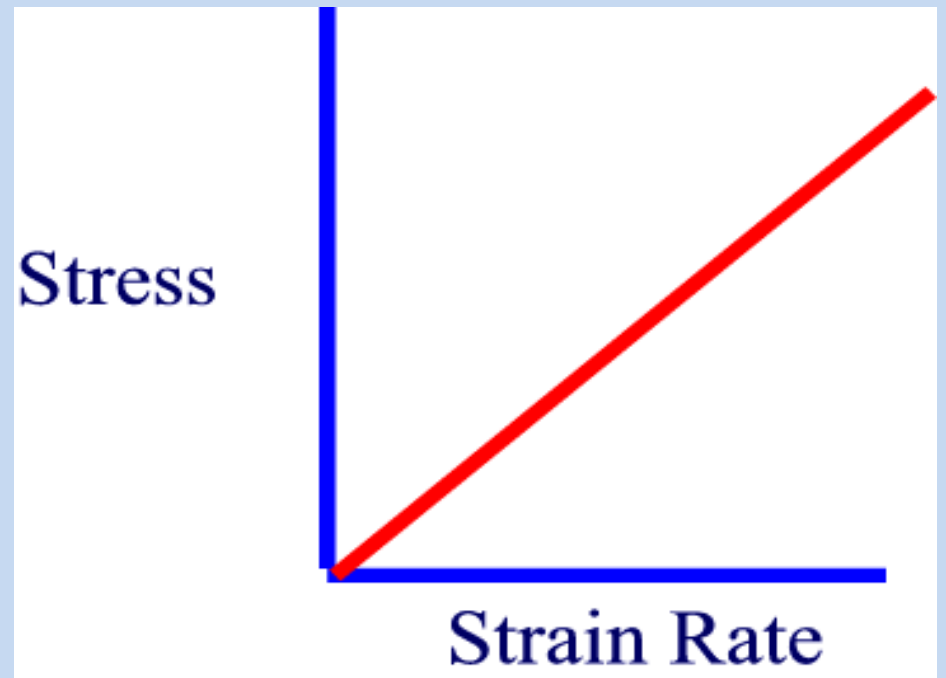
Quando un liquido è versato in un contenitore di forma irregolare , si deforma, in un tempo relativamente breve, in modo tale da assumere la stessa forma del contenitore. Questo comportamento rivela che un liquido perfetto non possiede una resistenza interna per cui fluisce sotto l'azione di infinitesimi stress da taglio.

I liquidi reali possiedono una resistenza definita come viscosità.

La relazione tra sforzo di taglio e strain rate è lineare:

$$\tau = \eta \, d\gamma / dt$$

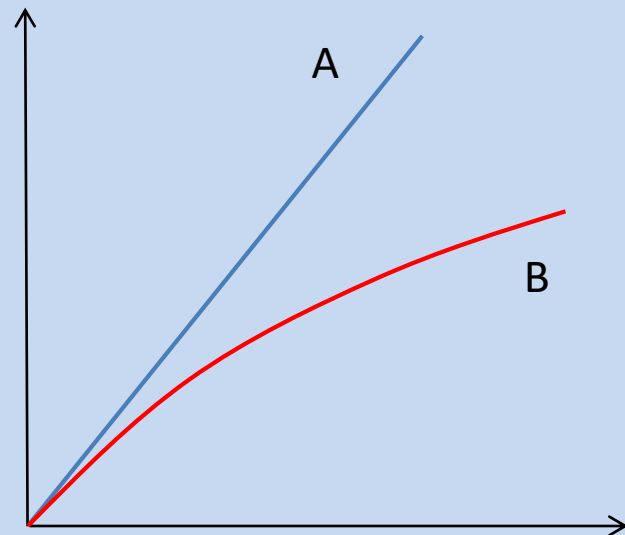
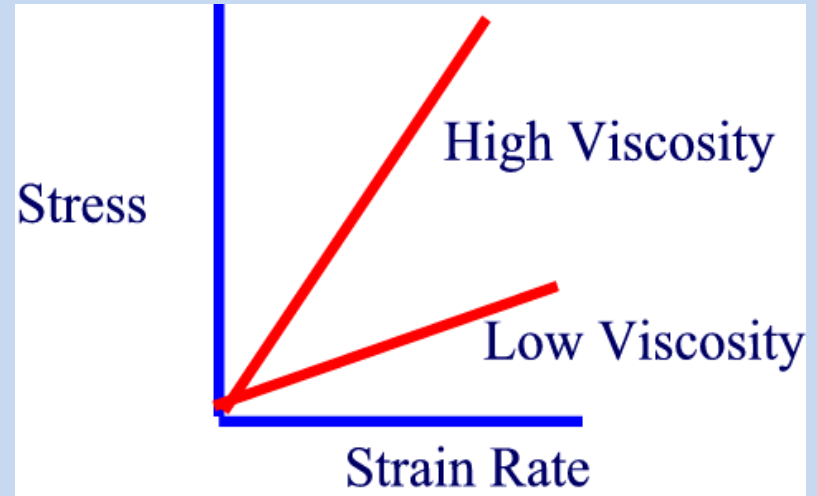
Dove η = coefficiente di viscosità



La viscosità è misurata in poise che corrisponde a 0.1 Pa s

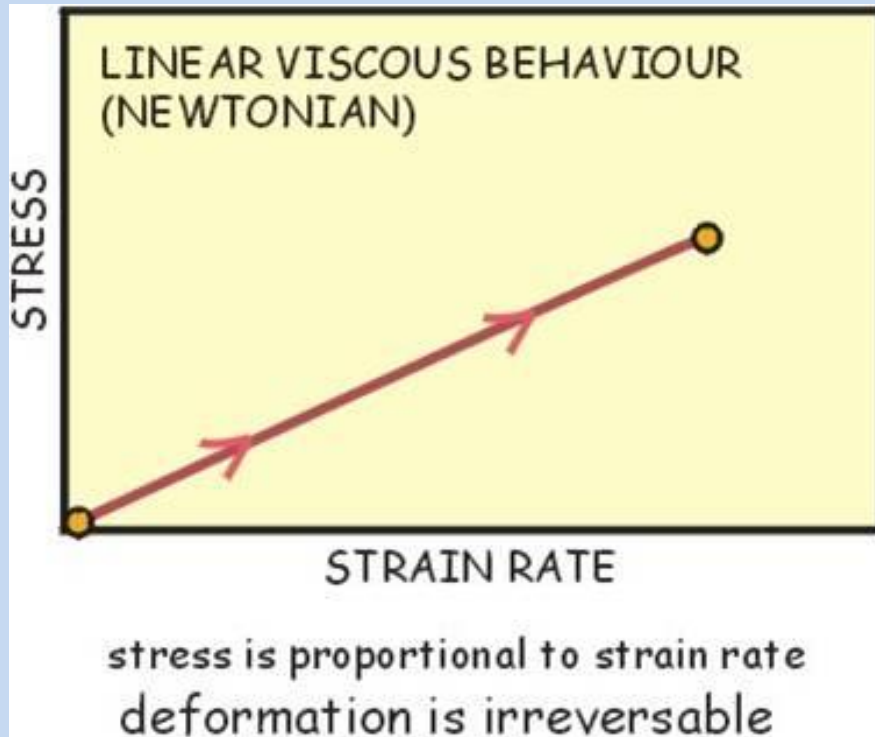
Più alta è la viscosità e meno velocemente il liquido fluisce
Mentre più bassa è la viscosità e più velocemente il liquido fluisce.

Se i liquidi seguono la legge lineare allora sono detti newtoniani (A) altrimenti sono detti non newtoniani (B).



Comportamento lineare-viscoso

Lo stress è proporzionale allo **strain rate** e non allo strain come abbiamo visto per la deformazione elastica.



The greater the pull (stress) the faster it stretches (rate of strain).

Se smettiamo di applicare lo stress il materiale non continua a deformarsi (lo strain rate diventa nullo) ma lo strain che si è accumulato non viene recuperato - il materiale è deformato in maniera permanente

Viscosità newtoniana

$$\sigma = \eta \dot{\epsilon}$$

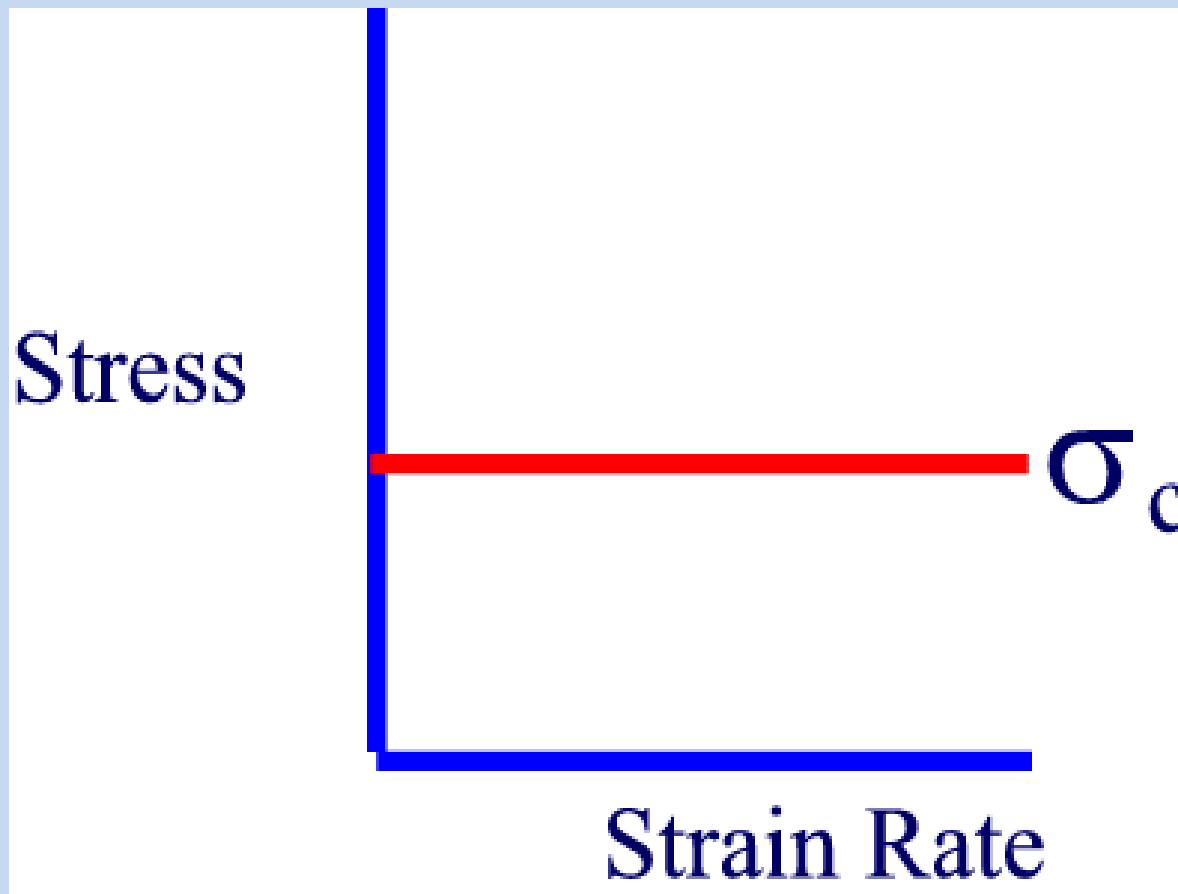
**Comportamento
lineare-viscoso**

TABLE 5.5	REPRESENTATIVE VISCOSITIES (IN Pa · s)
Air	10^{-5}
Water	10^{-3}
Olive oil	10^{-1}
Honey	4
Glycerin	83
Lava	$10-10^4$
Asphalt	10^5
Pitch	10^9
Ice	10^{12}
Glass	10^{14}
Rock salt	10^{17}
Sandstone slab	10^{18}
Asthenosphere (upper mantle)	$10^{20}-10^{21}$
Lower mantle	$10^{21}-10^{22}$

From several sources, including Turcotte and Schubert (1982).

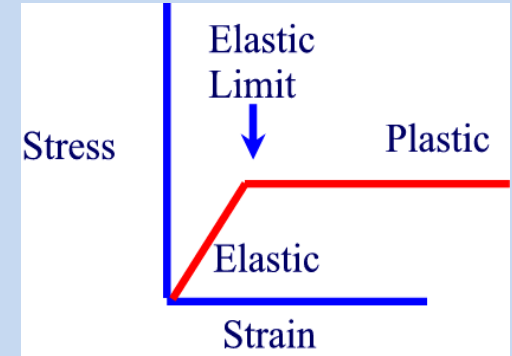
Duttività

La duttilità riguarda i solidi e non i liquidi. Un corpo a comportamento plastico è quello che non subisce una deformazione fino a quando lo sforzo raggiunge una soglia al di sopra della quale la deformazione è illimitata.

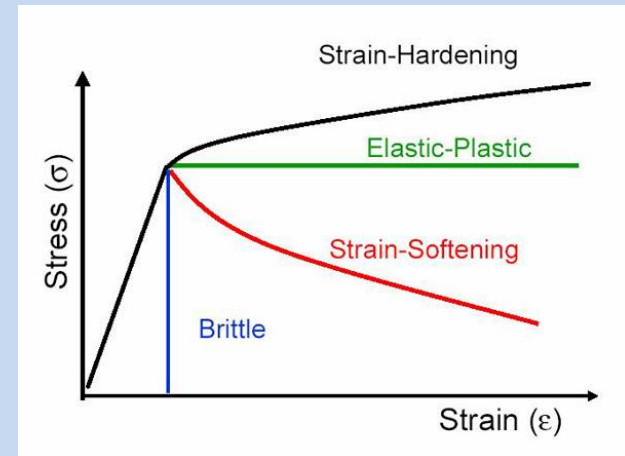


Combinazioni di comportamenti ideali

Nella realtà ci si aspetta una risposta prima elastica e poi plastica. Questo comportamento è detto **elastico-duttile**

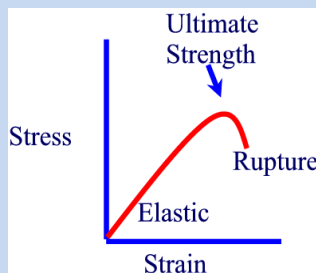


È comunemente trovato che per avere un comportamento plastico dopo quello elastico bisogna aumentare lo sforzo debolmente. Questo comportamento è detto di strain **hardening**. Se invece a parità di strain diminuisce lo stress il comportamento è detto strain **softening**.



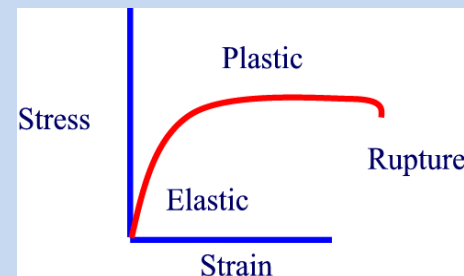
deformazione fragile:

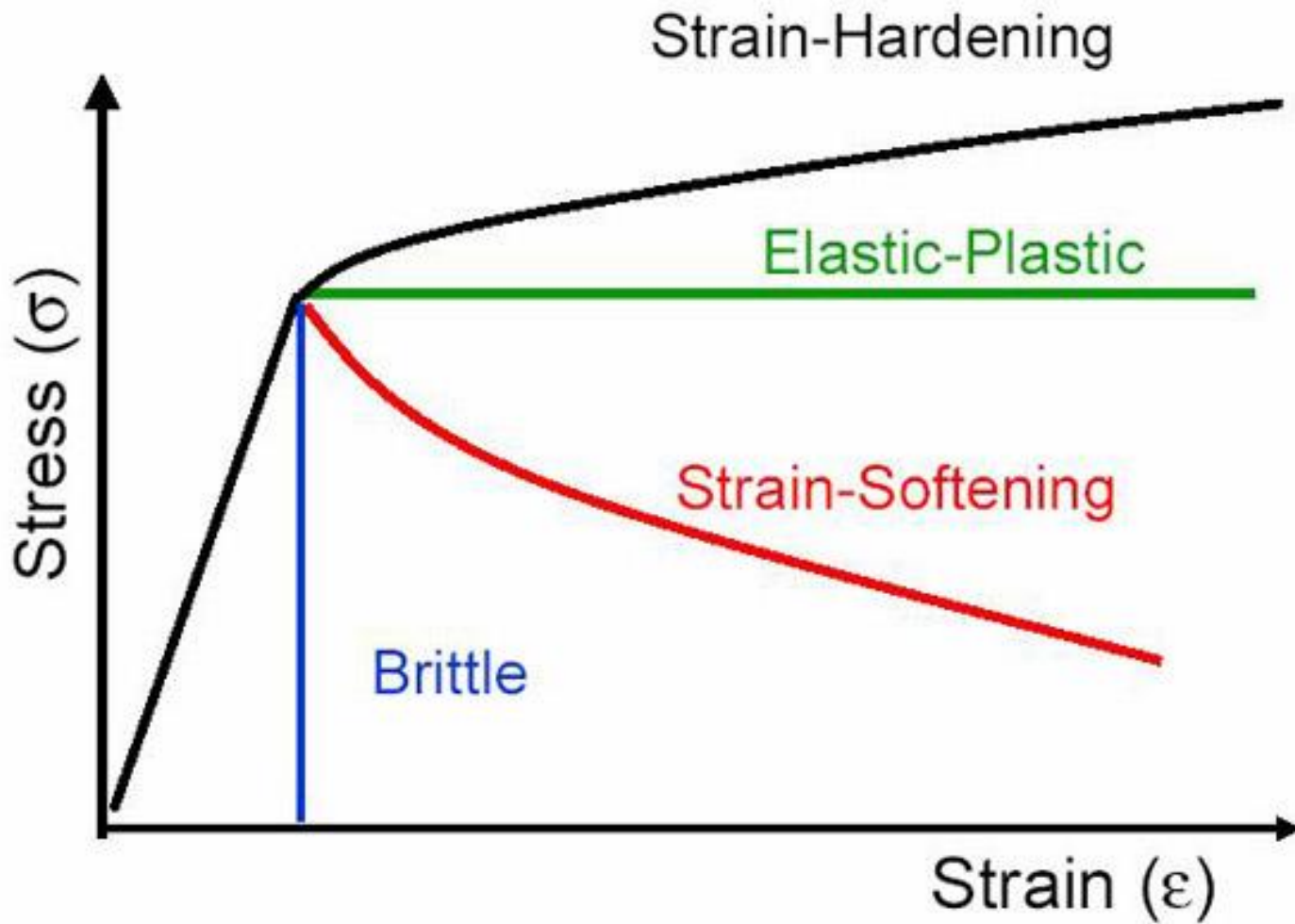
comportamento elastico prima della rottura



deformazione duttile:

comportamento elastico-plastico prima della rottura





Strain softening

A basse temperature un elemento che favorisce la deformazione duttile è l'infiltrazione di fluidi nel reticolo cristallino che permette l'accomodamento di fratture attraverso la mobilità delle dislocazioni. Il fenomeno è chiamato **hydrolytic weakening**: i fluidi penetrano nel cristallo attraverso microfratture, piani di geminazione e piani di kink-band. L'acqua trasporta molecole di ossigeno nella struttura del cristallo rompendo i legami e indebolendo il cristallo. A più alte temperature la dissociazione dell'acqua fornisce un'abbondante sorgente di protoni che migrano nel reticolo cristallino idrolizzando e indebolendo i legami con l'ossigeno. Il processo agisce direttamente sulle dislocazioni libere e sugli aggrovigliamenti di dislocazioni (tangle) che si formano durante lo strain hardening. L'indebolimento dei legami con l'ossigeno permette alle dislocazioni di migrare verso i bordi dei granuli o verso i piani di geminazione, di kink-band o di fatturazione. L'hydrolytic weakening è un processo che riduce la resistenza del cristallo ed è quindi contrapposto allo strain hardening.

I meccanismi che portano ad una diminuzione della resistenza della roccia fanno parte del processo dello strain softening.

Il softening in termini meccanici può essere espresso come una diminuzione dello stress a velocità deformative costanti o ad un aumento della velocità a parità di stress applicato. Probabilmente nei casi reali è una combinazione dei due elementi.

I meccanismi che portano allo strain softening possono essere riassunti in sette tipi:

- 1) variazioni nel meccanismo deformativo;
- 2) softening geometrico;
- 3) ricristallizzazione continua;
- 4) softening associato a reazioni metamorfiche;
- 5) softening chimico;
- 6) effetti di pressione di poro;
- 7) shear heating.

La **diminuzione di granulometria** permette a processi che accumulano grandi quantità di strain come il GBS di poter agire, infatti, il GBS è caratterizzato da una legge che lega lo strain rate alla granulometria inversamente proporzionale alla seconda o terza potenza.

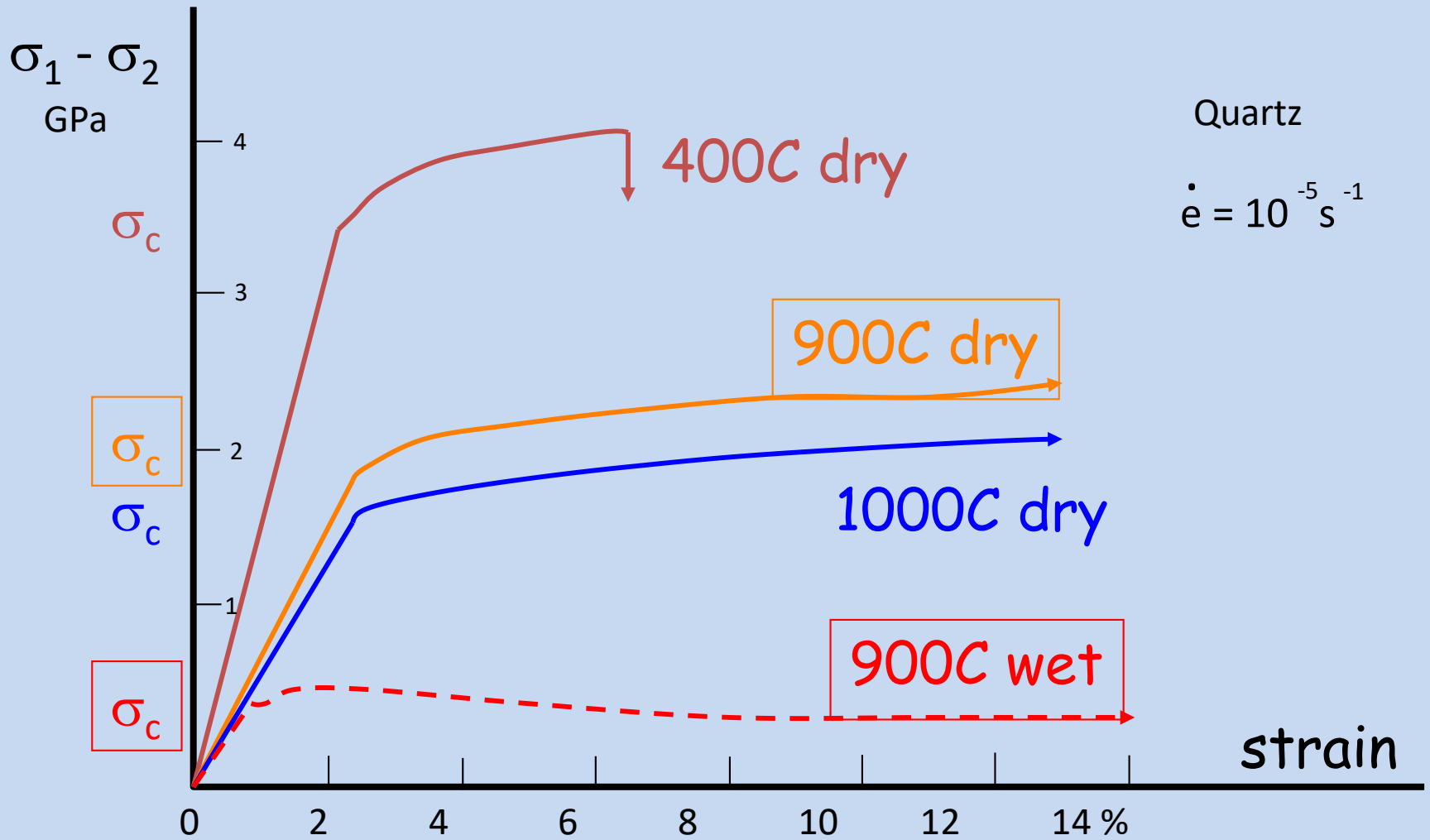
Il **softening geometrico** è un processo molto importante che tuttavia non è stato molto preso in considerazione dai geologi. Il processo si basa sull'evidenza che i granuli che inizialmente si deformano per dislocation creep sono quelli che si trovano in una posizione adatta affinché i piani cristallografici di slip possano essere attivati, nel corso della deformazione la rotazione dei granuli permette a nuovi di attivare i loro piani di slip. Questo processo porta ad una configurazione sempre più favorevole alla deformazione intracristallina e quindi ad un generale indebolimento della roccia.

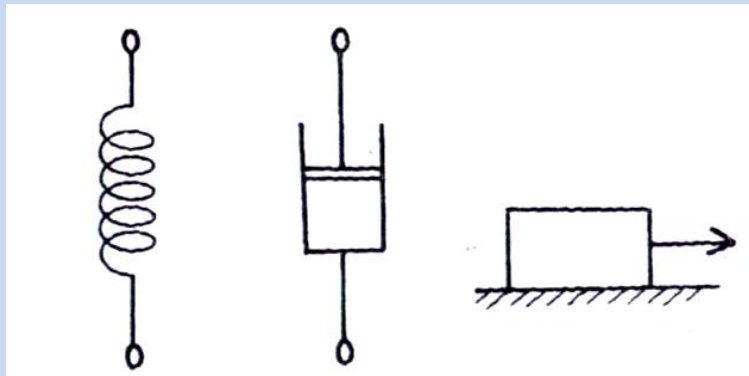
Questo meccanismo è spesso associato alla **ricristallizzazione** continua che permette di avere sempre granuli "nuovi" che possono essere deformati.

Il softening associato al **metamorfismo** si basa sulla trasformazione di minerali più duri in minerali meno competenti e di più piccola granulometria, ad esempio la trasformazione del feldspato durante un metamorfismo retrogrado, in quarzo e fillosilicati più duttili e più piccoli.

Il **softening chimico** è essenzialmente dovuto all'hydrolytic weakening descritto precedentemente.

La presenza di un fluido e di una **pressione di poro** può ridurre la resistenza di una roccia. La pressione di poro abbassa la resistenza alla fratturazione e quindi portare alla cataclasi. Un altro effetto della pressione di poro è la crescita della duttilità ad opera dell'effetto Rebinder. Infine lo **shear heating** è l'effetto del calore generato in una zona di taglio caratterizzata da alti valori dello stress e alte velocità deformative.

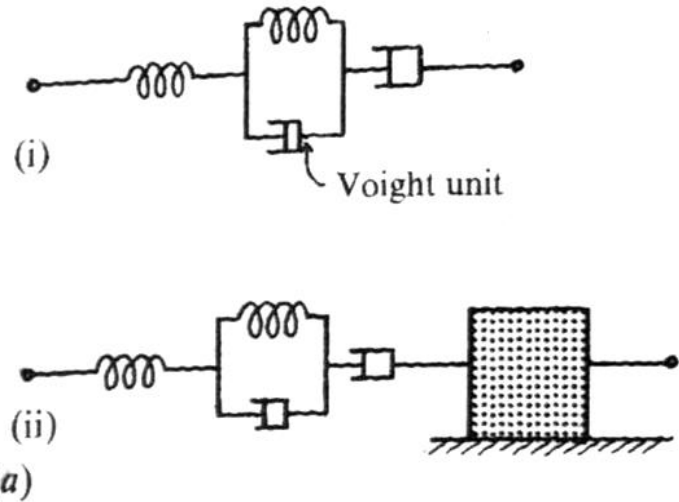




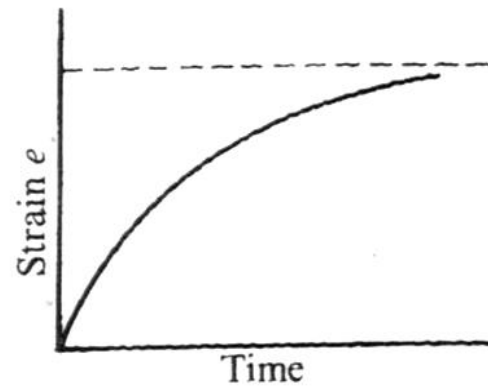
elastico

viscoso

duttile



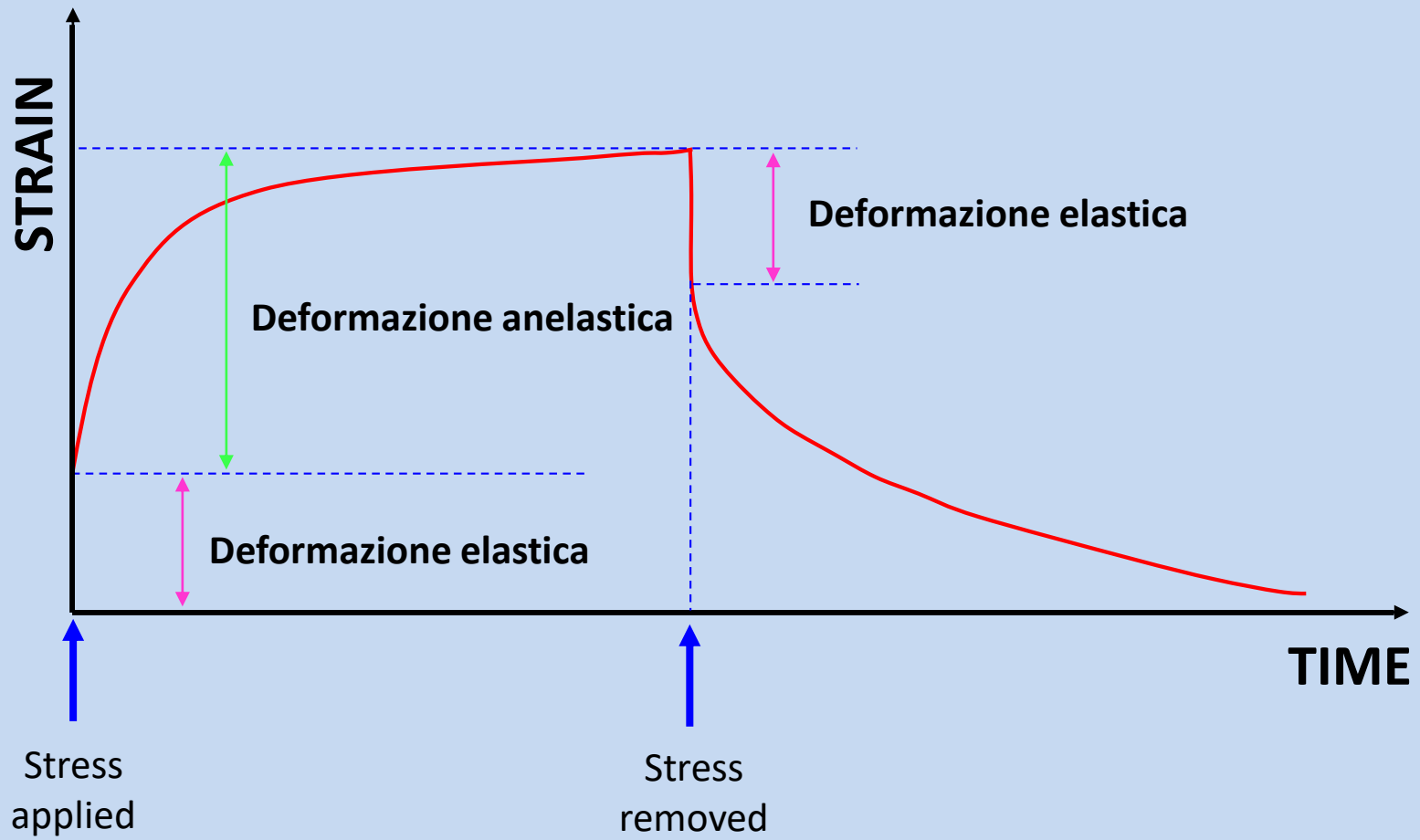
(a)



(b)

Fig. 1.44. (a) Linking of spring and dashpot elements in series and parallel to form (i) an elasto-viscous and (ii) a Bingham Body. (b) Time strain behaviour of a Voigt model.

Comportamento anelastico o viscoelastico



DEFORMAZIONE E TEMPO



FIGURE 9.38 Sharply dressed man with deformed marble bench that plastically sagged and locally fractured under the influence of gravity [and users].

CREEP

flusso viscoso
molto lento

CREEP

è la deformazione prodotta negli esperimenti di lunga durata sotto stress differenziali che sono molto al di sotto del valore di resistenza alla frattura della roccia.

