Lezione III

3.1 Comportamento dei materiali sotto carico

Abbiamo fin ora analizzato la risposta dei materiali alle piccole deformazioni. In realta' le caratterisctiche meccaniche dei materiali si estendono al di fuori della regione in cui e' valida la legge di Hooke (regione di linearita'). Tale regione viene investigata sia da misurazioni a scopo industriale, il cui interesse e' limitato per lo piu' ad accertare la resistenza a rottura, sia da prove a carattere scientifico, volte a determinare le costanti di elasticita' dei materiali e piu' in generale a studiare i fenomeni che si manifestano durante l'azione del carico.
Le proprieta' elastiche e resistenti del materiale sperimentato si ottengono dall'esame del diagramma di deformazione, (spesso tracciato automaticamente da un apparecchio annesso alla macchina di prova) su provini di materiale di forma e dimensioni opportune. Il diagramma ha per ordinate il carico sul provino, per ascisse la deformazione corrispondente.

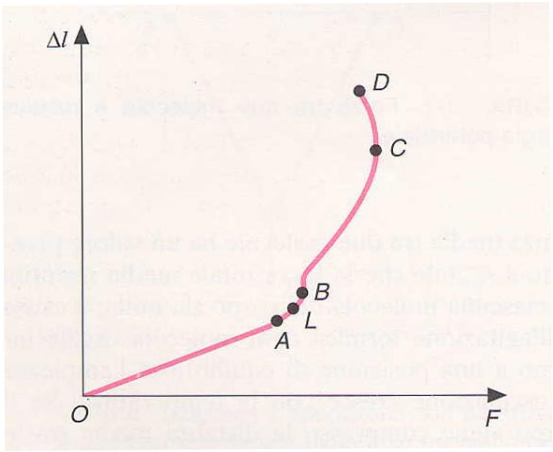

Figura 3.1 A limite di proporzionalita', L limite elastico, B punto di snervamento, C punto di carico massimo, D punto di rottura.

L'esame del diagramma di deformazione permette di classificare i materiali nelle seguenti categorie: duttili, fragili e plastici. In particolare un generico diagramma forza F – allungamento Δl ($=l-l_0$, secondo le definizioni nella trattazione delle trazioni e compressioni) e' riportato in figura 3.1.
Inizialmente l'allungamento Δl aumenta linearmente al crescere della trazione: in figura questo comportamento è rappresentato dal tratto rettilineo OA dove il punto A viene detto limite di proporzionalità. Superato A la proporzionalità scompare, ma per valori dell'allungamento che non superano quello corrispondente al punto L (limite elastico), quando la forza traente viene tolta il filo riprende la sua lunghezza primitiva: le deformazioni corrispondenti al tratto OL sono quindi elastiche.
Per i metalli il limite di elasticità aumenta con la temperatura, diminuisce invece se vengono ricotti, cioè lasciati raffreddare lentamente dopo essere stati arroventati. Se la forza traente supera il valore corrispondente al limite elastico quando poi essa viene annullata il filo conserva una certa deformazione permanente. Al di là del limite elastico per molti metalli si ha la situazione seguente: l'allungamento Δl cresce con la trazione del filo e dopo un certo punto, chiamato punto di snervamento, al crescere della forza si ha corrispondentemente un aumento di lunghezza maggiore di quanto si verifica nel tratto elastico OL; appena sorpassato il punto C di carico massimo per evitare la rottura del filo si deve diminuire la trazione, cosicché il grafico cambia andamento e il suo punto estremo D corrisponde alla rottura del filo; il carico di rottura è la forza minima per spezzare il filo ed è indipendente dalla lunghezza di questo.

Ductile	Brittle
▪ metal moves	▪ material cleaves
▪ plastic deformation before fracture	▪ little/no plastic deformation before fracture
▪ rough surface	▪ Little energy absorbed before fracture
▪ More energy absorbed before fracture	

Schema 3.1

Il bronzo e molte leghe non hanno punto di snervamento e dopo il limite elastico il loro allungamento cresce uniformemente con la tensione; altri materiali (materiali fragili), come il vetro o l'acciaio con alta percentuale di carbonio, si spezzano appena viene superato il limite elastico.
Nei lapidei la risposta lineare si estende fin quasi alla rottura alla quale si perviene bruscamente con deformazioni plastiche permanenti piccole o inapprezzabili. Questo tipo di comportamento e' caratteristico dei materiali dei fragili a cui appartengono i vetri o l'acciaio con una elevata componente di carbonio. Lo schema 3.1 riassume le differenze tra materiali duttili e fragili
La tabella 3.1 riporta il carico specifico (cioe' per unita' di area) del limite elastico e carichi massimi specifici di alcuni materiali (vedi anche tabella 2.2).

Materiale	Limite elastico (Pa)	Carico massimo (Pa)
Acciaio	$2\div4 \times 10^8$	$5\div7 \times 10^8$
Alluminio	1.3×10^8	1.4×10^8
Ottone	3.8×10^8	4.6×10^8
Rame	1.5×10^8	3.4×10^8

Tabella 3.1- Carichi elastici e massimi per alcuni materiali.

La resistenza di un materiale alla frattura dipende dai punti deboli creati da difetti o incrinature all'interno della struttura che si muovono diversamente in materiali duttili o fragili.
Nelle fratture fragili, la crepa corre ortogonalmente al carico applicato e lascia alla rottura una superficie piatta.
Nelle fratture duttili , la frattura ha forma di V.

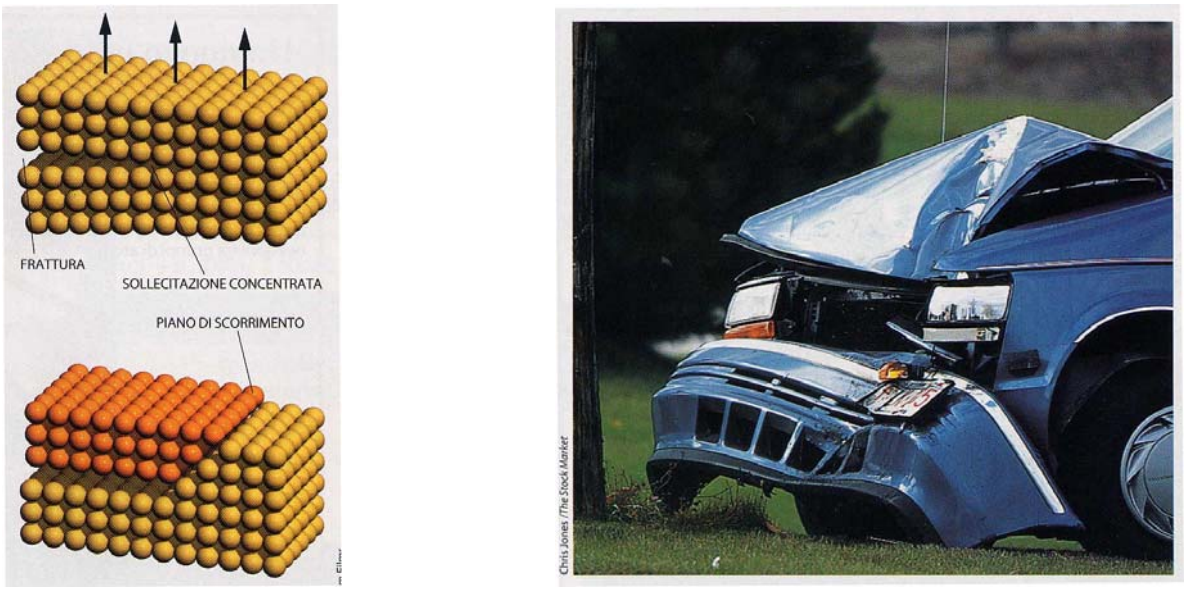

Figura 3.2 Sinistra: meccanismi microscopici della frattura plastica. Destra: effetti macroscopici

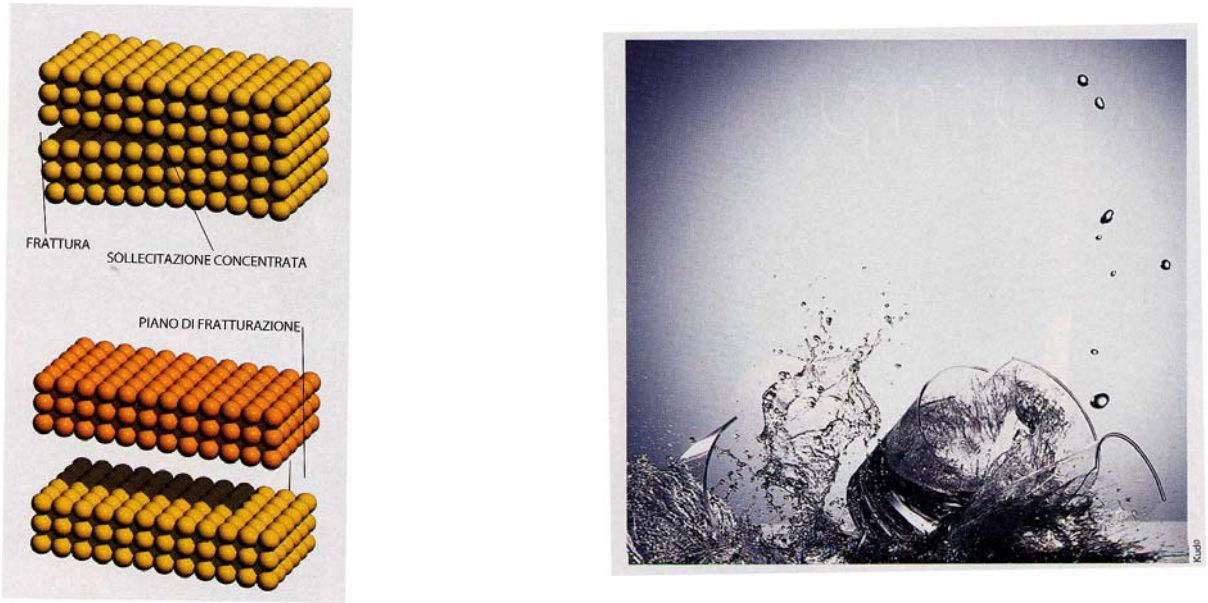

Figura 3.3 Sinistra: meccanismi microscopici della frattura fragile. Destra: effetti macroscopici

3.2 Comportamento dei materiali polimerici sotto carico

Nella Figura 3.4 sono riportati i tre tipici comportamenti sforzo-deformazione dei materiali polimerici. La curva A illustra il caratteristico sforzo-deformazione di un polimero fragile, come si nota dal fatto che esso si rompe essendo ancora in campo elastico. Il comportamento di un materiale plastico, curva B, è simile a quello trovato nei materiali metallici: all'inizio si ha deformazione elastica, seguita poi dallo snervamento e da una regione a comportamento plastico. Infine la deformazione mostrata dalla curva C è completamente elastica: questa elasticità,

simile a quella delle gomme (grandi e recuperabili deformazioni prodotte da bassi carichi), è mostrata da una classe di polimeri chiamati elastomeri.

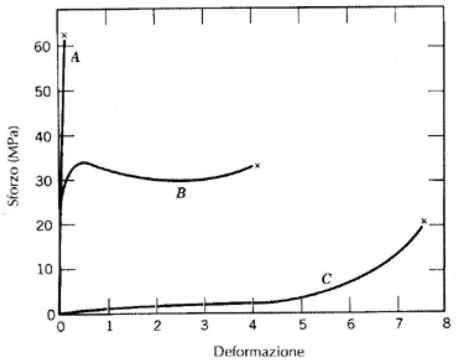

Figura 3.4 Curva sforzo-deformazione per un polimero fragile (A), plastico (B), ed altamente elastico (elastomero) (curva (C).

Il modulo elastico (chiamato anche modulo a trazione o, più semplicemente modulo) e la duttilità come allungamento percentuale vengono determinati, nel caso dei polimeri, con la stessa metodologia utilizzata per i metalli. Per i polimeri a comportamento plastico (curva B), quale limite di snervamento si assume il valore massimo della curva, il quale incorre subito alla fine del tratto di curva a comportamento elastico (Figura 3.5); il valore della sollecitazione in questo punto di massimo è chiamato appunto carico di snervamento (σ_s). La resistenza a trazione (TS), invece, corrisponde alla sollecitazione alla quale avviene la rottura (Figura 3.5); TS può essere più grande o più piccolo di σ_s. Per questi materiali, quando si parla di resistenza si intende in genere la resistenza a trazione.

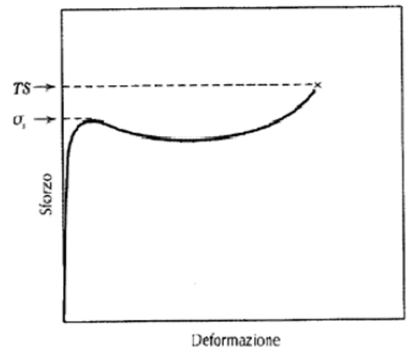

Figura 3.5 Curva schematica sforzo-deformazione per un polimero plastico dove si mostra come vengono determinati il carico di snervamento ed il carico di rottura

La tabella 3.2 riporta le proprietà meccaniche per alcuni materiali polimerici. I polimeri sono, sotto molti aspetti, meccanicamente diversi dai metalli. Per esempio, il modulo elastico dei materiali polimerici altamente elastici può variare da soli 7 MPa, fino a 4 GPa nel caso di alcuni polimeri molto rigidi; mentre per i metalli i valori dei moduli sono decisamente più grandi e vanno da 48 a 410 GPa. I carichi massimi a trazione per i polimeri sono nell'ordine dei 100 MPa - mentre per alcune leghe metalliche sono di 4100 MPa. D'altro canto, laddove l'allungamento massimo per i metalli non supera mai il 100%, alcuni polimeri altamente elastici possono arrivare ad allungamenti fino al 1000%.
Un altro aspetto da notare è il fatto che le caratteristiche meccaniche dei polimeri sono molto sensibili alle variazioni di temperatura, soprattutto per temperature vicino alla temperatura ambiente. Si consideri, ad esempio, la curva sforzo-deformazione per il polimetilmetacrilato (Plexigas) a diverse temperature tra 4 e 60°C (Figura 3.6). Osservando questo grafico, è interessante notare diverse particolarità: l'aumento della temperatura determina (1) una diminuzione del modulo elastico, (2) una riduzione del carico di rottura, (3) un aumento della duttilità a 4°C il materiale è completamente fragile, mentre si ha una considerevole deformazione plastica sia a 50 che a 60°C.

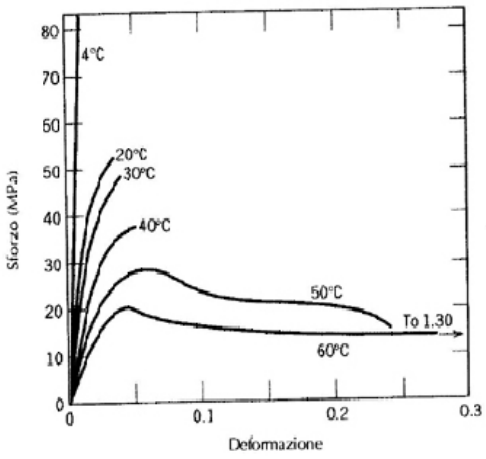

Figura 3.6 Influenza della temperatura sulla curva sforzo-deformazione per il polimetilacrilato.

Anche l'influenza della velocità di deformazione sul comportamento meccanico è importante. In generale, la diminuzione della velocità di deformazione ha lo stesso effetto sulla curva sforzo-deformazione di un aumento di temperatura: ovvero il materiale diventa più morbido e duttile. La comprensione dei meccanismi di deformazione dei materiali polimerici è importante dal momento ci permette di governare le caratteristiche meccaniche di questi materiali. A titolo di esempio nella figura 3.7 sono mostrati alcuni aspetti della deformazione plastica macroscopica di un provino durante i vari stadi della deformazione. Nel punto di snervamento si inzia a formare una piccola strizione (neck) nella zona centrale del provino. In questa zona le catene polimeriche sono orientate parallelamente alla direzione dello sforzo e lo sforzo si localizza. Conseguentemente, in questo punto si

sviluppa una maggiore resistenza alla deformazione, che puo' continuare solamente estendendo la strizione lungo il tratto utile del provino non ancora deformato (cold drawing).

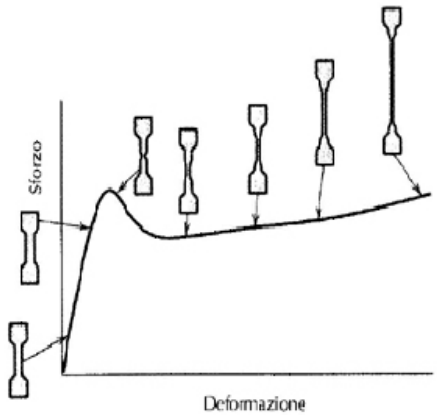

Figura 3.7 Curva sforzo-deformazione di un polimero. Sono riportati anche i profili del provino durante vari stadi della deformazione

Materiale	*Peso specifico* Mg/m^3	*Modulo a trazione (GPa)*	*Resistenza a trazione (MPa)*	*Carico di snervamento (MPa)*	*Allungamento a rottura (%)*
Polietilene (bassa densità)	0.917–0.932	0.17–0.28	8.3–31.4	9.0–14.5	100–650
Polietilene (alta densità)	0.952–0.965	1.06–1.09	22.1–31.0	26.2–33.1	10–1200
Cloruro di polivinile	1.30–1.58	2.4–4.1	40.7–51.7	40.7–44.8	40–80
Politetrafluoroetilene	2.14–2.20	0.40–0.55	20.7–34.5	—	200–400
Polipropilene	0.90–0.91	1.14–1.55	31–41.4	31.0–37.2	100–600
Polistirene	1.04–1.05	2.28–3.28	35.9–51.7	—	1.2–2.5
Polimetilmetacrilato	1.17–1.20	2.24–3.24	48.3–72.4	53.8–73.1	2.0–5.5
Fenolo–formaldeide	1.24–1.32	2.76–4.83	34.5–62.1	—	1.5–2.0
Nylon 6,6	1.13–1.15	1.58–3.80	75.9–94.5	44.8–82.8	15–300
Poliestere (PET)	1.29–1.40	2.8–4.1	48.3–72.4	59.3	30–300
Policarbonato	1.20	2.38	62.8–72.4	62.1	110–150

Fonte: *Modern Plastics Encyclopedia* '96. Copyright 1995, McGraw–Hill. Ristampa autorizzata.

Tabella 3.2

3.3 Isteresi meccanica

Se la forza deformatrice applicata a un corpo supera il limite elastico, la deformazione che il corpo subisce dipende non solo dalla forza applicata, ma anche dalle deformazioni subite in precedenza, cioe' dalla storia del corpo. I1 discorso vale per ogni tipo di sollecitazione; per fissare le idee, si consideri il caso di una prova di trazione su un filo e si riportino in ascisse l'intensita' F della forza applicata e in ordinate l'allungamento Δl provocato. Se la forza considerata non supera il limite elastico corrispondente al punto L di figura 3.8, quando essa viene ridotta il punto rappresentativo dello stato del sistema viene a trovarsi sempre sul tratto OL di figura e continua a rimanervi se l'intensita' della forza viene nuovamente aumentata. Se pero' la forza traente supera il limite elastico, quando poi viene ridotta il punto rappresentativo non percorre piu' il tratto OL, ma l'allungamento diminuisce con F piu' lentamente, cioe' rispetto all'andata a parita' di carico corrisponde una deformazione maggiore; quando poi la trazione e' annullata si ha un allungamento residuo OM diverso da zero e per riportare la lunghezza del filo al valore primitivo e' necessario sottoporre il filo a una compressione. Questo fenomeno, cioe' la pigrizia mostrata da un materiale nel ripetere la sua storia, prende il nome di isteresi.

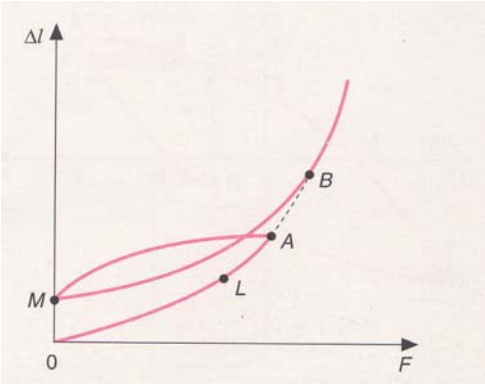

Figura 3.8

Se F viene nuovamente aumentata il grafico si ricongiunge a quello primitivo ma in un punto B posto al di sopra di quello A di distacco.
Se il campione in esame viene sottoposto a una forza variabile con continuita' tra F e -- F (valori positivi indicano trazioni e quelli negativi compressioni), dopo un certo numero di variazioni si stabilisce una situazione in cui la deformazione che si ha nella fase di diminuzione del carico (tratto AM'A' di figura 3.9) a parita' di quest'ultimo e' sempre maggiore di quella che si ha nella fase di aumento del carico (tratto A'MA): al variare periodico del carico lo stato del materiale varia periodicamente secondo un ciclo di isteresi. Durante un ciclo il materiale converte in calore parte del lavoro compiuto su esso; infatti, quando la forza vale F e l'allungamento aumenta di dl il lavoro corrispondentemente compiuto risulta Fdl ed e' rappresentato dall'area del rettangolo 1234 di figura, quando l'allungamento diminuisce variando di - dl, la forza ha un'intensita' minore e il lavoro e' rappresentato dall'area (considerata negativa) del rettangolo 2365: il lavoro complessivo nelle due fasi e' quindi rappresentato dall'area del rettangolo 1564. E' adesso evidente che il lavoro compiuto in un ciclo e' rappresentato dalla superficie racchiusa dal ciclo di isteresi.

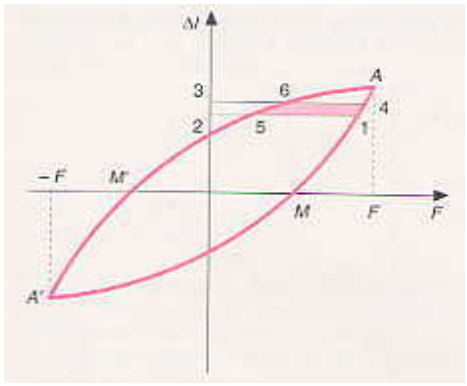

Figura 3.9 Ciclo di isteresi meccanico

Sergio Rosati, Fisica generale, Casa editrice Ambrosiana, Milano 1994
William D. Callister, Scienza e ingegneria dei materiali, EdiSES, Napoli 2002