

UNITAT 6 Propietats i assaigs

6.1 Els materials i els processos industrials

Els materials, juntament amb l'energia, són els dos elements imprescindibles de tot procés industrial. En aplicar aquest procés cal tenir els coneixements tècnics i científics necessaris i disposar dels materials i de les eines adequades per treballar-los. Els materials són, doncs, un element imprescindible del procés industrial: no es poden construir objectes i aparells o fabricar cap mena de producte si no es disposa dels materials adequats i es coneixen bé les seves propietats.

En qualsevol procés industrial, com en qualsevol altre procés tecnològic, cal elaborar un **projecte** abans de dur-lo a terme. En aquest projecte és on es decideix com ha de ser el producte o aparell i el procés de transformació dels materials necessari per fabricar-lo. Per això, caldrà prendre una de les decisions més importants: **triar els materials** que seran utilitzats. A l'hora de prendre aquesta decisió intervenen molts factors diferents i, per tant, caldrà estudiar el problema sota diferents **criteris de selecció de materials**.

Les propietats

Si s'ha de dissenyar i fabricar un pot de cuina, caldrà que el material triat resisteixi temperatures altes sense deformar-se, que sigui lleuger, bon conductor de la calor, etc. Si s'han de fer unes botes d'aigua, caldrà utilitzar un material impermeable, flexible, amb bon aïllament tèrmic, etc.

Les qualitats estètiques

També el color, la textura i la forma, és a dir, les qualitats estètiques, seran importants. El color té una importància fonamental quan es tracta d'objectes de seguretat que hagin de ser localitzats ràpidament, una superfície molt polida facilita la seva neteja, una forma atractiva ajuda a «vendre» el producte o pot fer més còmode i segur el seu ús, etc.

El procés de fabricació

Alguns materials només es poden treballar amb uns quants processos, d'altres permeten utilitzar tècniques de fabricació variades. Cal tenir en compte si es disposa de la maquinària necessària per treballar el material, si els operaris la podran utilitzar i si es domina la tècnica que s'haurà d'aplicar.

El cost

Quan es dissenya un producte cal tenir en compte la seva qualitat final, el tipus d'usuaris a què va dirigit, la vida útil prevista, etc. No tots els materials són abundants i fàcils d'obtenir, la qual cosa incideix en el seu cost. A més, segons el material triat, hem vist que haurem d'utilitzar determinats processos de fabricació; també hi ha processos cars i d'altres més barats. El material triat tindrà un cost, de la mateixa manera que el procés de fabricació utilitzat també el té. Tots dos incidiran directament en el preu final del producte i, per tant, en la seva rendibilitat.

La disponibilitat

De vegades es produeixen «sèries curtes» (poques quantitats) d'un determinat producte. D'altres cops es fan sèries molt llargues. La *vida prevista* al mercat també és diferent segons el tipus de producte. Aquests factors s'han de tenir en compte per assegurar-nos que disposarem de la quantitat de material necessària o que després d'un temps determinat, encara podrem utilitzar aquest material per a la fabricació de més unitats del producte o de les seves peces de recanvi.

L'impacte ambiental

Les operacions d'extracció i transformació de les matèries primeres son més o menys agressives per al medi ambient segons el material que se'n vulgui obtenir. De la mateixa manera, quan ha finalitzat la vida útil del producte, cal tenir present les possibilitats de reutilització o reciclatge, i les conseqüències ecològiques que pot suposar la seva eliminació.

Activitats

1. **Fes una llista de les propietats més importants que han de tenir els materials dels objectes següents:**
Hi poden haver diverses respostes vàlides, sempre que es justifiquin convenientment.
 - a) Fulla de ganivet.
 - b) Radiador de calefacció.
 - c) Jersey.
 - d) Para-xocs d'un automòbil.
2. **No sempre hem disposat de tants materials diferents com els que tenim a l'abast avui dia. Investiga quins son els materials que s'utilitzaven fins l'any 1800 i en quin moment es van descobrir o començar a utilitzar materials com ara els plàstics, l'alumini, les fibres acríliques, el titani o el Kevlar.**
3. **Indica i justifica quins són els criteris de selecció de materials que, segons el teu parer, tenen més importància a l'hora de fabricar:**
Hi poden haver diverses respostes vàlides, sempre que es justifiquin convenientment.
 - a) Una escultura decorativa.
 - b) Un satèl·lit de comunicacions.
 - c) Circuits integrats per a càmeres de vídeo.
 - d) Una central nuclear.
 - e) Mobles de fusta tropical.
 - f) Un got d'un sol ús.
 - g) Bateria per a rellotges de polsera.

Tots els objectes que fem servir quotidianament són fruit d'un procés tecnològic i si estan fets d'uns materials concrets és perquè aquests materials han estat escollits perquè compleixen uns requisits estètics i unes propietats físiques i químiques concretes.

Les substàncies que es troben a la natura no tenen les propietats que ens interessen fins que no són sotmeses a un procés adequat, és a dir, fins i tot els materials que fem servir per construir coses són fruit d'un procés tecnològic. Exemples d'aquests materials serien els plàstics, els aliatges, els ciments, les ceràmiques...

En aquesta unitat aprofundirem en algunes de les propietats dels materials. Ara bé, no n'hi ha prou amb conèixer aquestes propietats de manera qualitativa. Cal mesurar-les per poder comparar entre diferents materials i per dissenyar els objectes i les peces amb més seguretat. La realització dels **assaigs** de propietats és la manera d'obtenir aquests valors, que permeten comparar el comportament de diferents materials.

6.2 Propietats mecàniques

En aquest apartat ens referirem als materials que es troben en estat sòlid a temperatura ambient, ja que aquests són uns dels més interessants des del punt de vista tecnològic.

Les propietats mecàniques descriuen el comportament dels materials davant l'aplicació de forces externes. Aquestes forces s'oposen a unes altres internes, anomenades **forces de cohesió**, que mantenen units els àtoms dels materials i que són les responsables del seu estat sòlid. Si les forces externes són molt inferiors a les de cohesió interna, el material resistirà sense problemes i, pràcticament, no es deformarà. En canvi, si les forces

PROPIETATS I ASSAIGS

externes superen les internes, el material es deformarà o, fins i tot, es trencarà.

Cada material té un comportament diferent i particular quan li són aplicades forces externes. Necessitem, doncs, conèixer les propietats mecàniques dels materials per tal de poder triar el més adequat per a cada aplicació i per poder calcular les dimensions dels elements que formen una aplicació tecnològica.

Per conèixer i mesurar les seves propietats mecàniques, els materials se sotmeten a unes proves de laboratori anomenades *assaigs*. Els conceptes i els valors obtinguts en aquests assaigs són la base de la disciplina coneguda amb el nom de **resistència de materials**, fonamental en el disseny d'estructures i d'elements de màquines.

Resistència mecànica i assaig de tracció

La **resistència mecànica** és la capacitat que té un material per suportar esforços sense deformar-se o trencar-se.

Segons la manera d'aplicar-los sobre el material, es distingeixen diferents tipus d'esforç:

- **De tracció:** quan intenten estirar.
- **De compressió:** quan intenten aixafar.
- **De flexió:** quan intenten doblegar.
- **De torsió:** quan intenten retorçar.
- **De cisallament:** quan intenten tallar

Per a cadascun d'aquests esforços es defineix un tipus diferent de **resistència mecànica**: a la **tracció**, a la **compressió**, a la **flexió**, a la **torsió** i al **cisallament**.

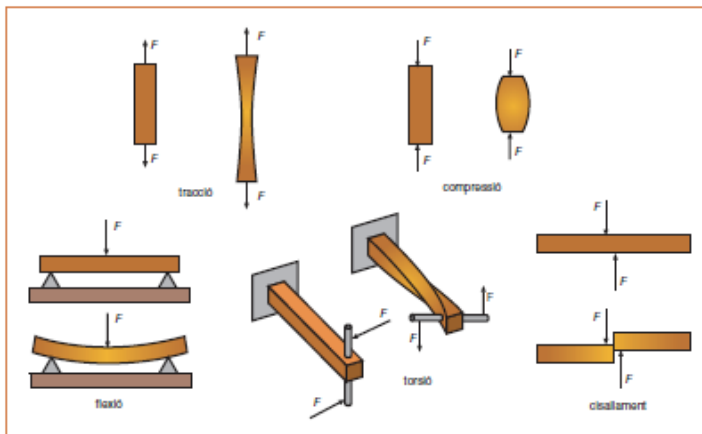


Fig. 6.2. Diferents tipus d'esforç.

D'interès

Les propietats mecàniques dels materials són:

Duresa: és la resistència que oposa un cos a ser penetrat per un altre.

Elasticitat: és la capacitat d'un cos de recuperar la seva forma inicial un cop ha cessat la causa que el deforma.

Plasticitat: és la capacitat que tenen alguns materials sòlids d'adquirir deformacions permanents sense arribar a trencar-se.

Ductilitat: és la propietat que mesura la capacitat que té un material per estendre's en forma de fils sense arribar a trencar-se davant esforços de tracció.

Mal-leabilitat: és la propietat que mesura la capacitat que té un material per estendre's en forma de lamines sense arribar a trencar-se davant esforços de compressió.

Tenacitat: és la capacitat d'absorbir energia davant esforços bruscos exteriors abans de trencar-se o deformar-se.

Fragilitat: és la qualitat contrària a la tenacitat. Els cossos fràgils són aquells que es trenquen fàcilment quan reben esforços bruscos (cops), encara que aquests siguin poc intensos.

Fatiga: és la resistència al trencament d'un material sotmès a esforços de magnitud o sentit variable.

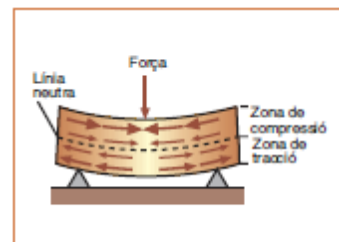


Fig. 6.3. Detall d'una flexió.

PROPIETATS I ASSAIGS

Hi ha objectes que, segons la seva forma o el material de què estan fets, suporten millor un tipus d'esforç que un altre. Així doncs, les cordes, els cables o les cadenes només poden tolerar esforços de tracció. El formigó és un material que suporta molt bé la compressió però no gaire la tracció. Les bigues han d'estar dissenyades per suportar esforços de flexió. Els arbres de transmissió de màquines i motors han de suportar esforços de torsió i els passadors, reblons i caragols molt sovint suporten esforços de cisallament.

Els esforços de **flexió** es poden considerar, en general, com la combinació d'una tracció i d'una compressió. En els materials que suporten flexió hi ha zones sotmeses a compressió, d'altres a tracció i també hi ha una zona longitudinal que no està sotmesa a cap força: s'anomena *línia neutra*. La intensitat d'aquests esforços (tant de tracció com de compressió) no és igual (homogènia) en totes les zones: augmenta a les zones més allunyades de la línia neutra i disminueix a les zones properes.

Cal tenir present que, de vegades, segons la forma del material, un esforç de compressió pot produir un corbament en lloc d'un aixafament. Aquest fenomen rep el nom de **vinclament** i es dona en materials *esvelts*, és a dir, en aquells que són molt llargs en comparació amb la seva secció transversal.

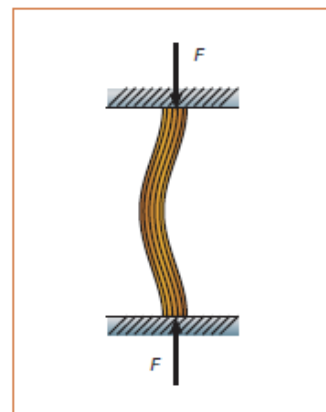


Fig. 6.4. Vinclament produït per la compressió d'una peça esvelta.

La forma, per tant, és un altre aspecte que influeix en la resistència mecànica. Segons sigui el tipus d'esforç que s'apliqui, hi ha formes més adequades que altres per suportar-lo:

Esforz aplicat	Formes més adequades per suportar-lo
Tracció	Secció elevada
Compressió	Secció elevada i poca longitud
Flexió	Secció elevada, cantell gran i poca longitud.
Torsió	Secció elevada
Cisallament	Secció elevada

Taula 6.1. Formes dels materials i tipus d'esforços.

La secció és la superfície que resulta al tallar una peça per un pla perpendicular al seu eix longitudinal. Així, diem que una barra rodona té una secció circular de valor $A = \pi \cdot D^2/4$, o bé $A = \pi \cdot r^2$, on D i r són, respectivament, el diàmetre o el radi de la barra.

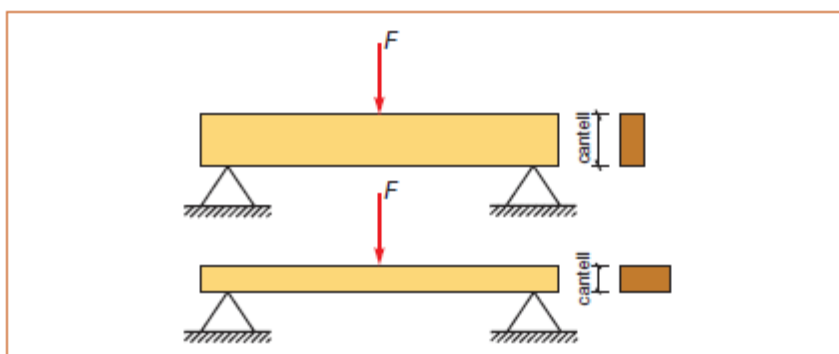


Fig. 6.5. Tot i que les dues bigues tenen la mateixa secció, la biga superior suporta millor els esforços de flexió perquè té un cantell més gran.

Models de deformació i comportament mecànic

Quan un material és deformat per l'aplicació d'un esforç, pot ser que la deformació sigui temporal o permanent. Si és temporal, és a dir, que el material torna a la seva forma original un cop retirat l'esforç, parlem de **deformació elàstica**. En canvi, si és permanent —es manté certa deformació malgrat haver retirat l'esforç— parlem de **deformació plàstica**.

Hi ha materials que es trenquen sense experimentar, pràcticament, cap deformació prèvia. D'aquests es diu que tenen un **comportament fràgil**, el qual és típic de materials com el vidre o la ceràmica. En canvi,

hi ha altres materials —com el coure o l'alumini— que es deformen ostensiblement abans de trencar-se. En aquest cas parlem de **comportament dúctil** o de materials dúctils.

Quan es dissenya una estructura, cal triar bé els materials per assegurar-se que no tindran un comportament fràgil. Una deformació prèvia al trencament o l'aparició d'esquerdes permeten detectar el perill de col·lapse d'una estructura i evitar, per tant, possibles accidents. També cal dimensionar bé les peces perquè les deformacions no arribin a ser plàstiques (irreversibles). El comportament elàstic de les estructures és molt útil a les zones que pateixen terratrèmols, per exemple, ja que permeten absorbir gran quantitat d'energia mecànica en forma de deformacions elàstiques, i redueixen així el perill de trencament.

Assaig de tracció

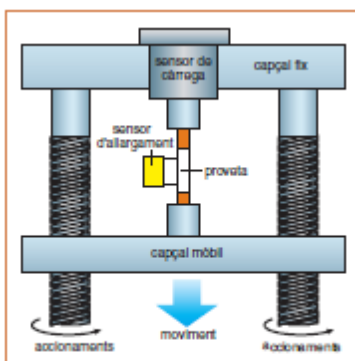


Fig. 6.6. Màquina per a l'assaig de tracció.

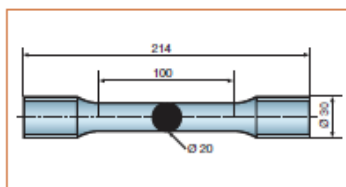


Fig. 6.7. Dibuix acotat d'una proveta.

L'assaig de tracció és una de les proves de laboratori més utilitzades i que més informació proporciona sobre les propietats mecàniques dels materials. Per tal que els valors obtinguts en aquests assaigs no depenguin de les dimensions de la peça que estem utilitzant, sinó només del seu material, s'utilitzen els conceptes **d'esforç unitari** i **d'allargament unitari**.

Els **assaigs de tracció** es porten a terme amb unes mostres de material amb unes formes i dimensions determinades anomenades provetes. Les provetes acostumen a ser de secció circular uniforme i eixamplades als extrems per poder-les fixar a la màquina universal d'assaigs o a un sistema hidràulic, que són els encarregats d'exercir l'esforç de tracció. Es construeixen totes iguals per poder comparar els resultats de provetes construïdes amb diversos materials.

Una de les formes geomètriques més utilitzades és la que té una longitud entre punts calibrats de 200 mm i un diàmetre de 20 mm, encara que també n'hi ha de 100 mm entre punts calibrats i 20 mm de diàmetre.

Esforç unitari



L'**esforç unitari** (σ) o simplement *esforç*, és la relació entre la força F aplicada a un material i la secció A sobre la qual s'aplica.

És a dir, la força aplicada per unitat de secció:

$$\sigma = \frac{F}{A} \left[\frac{N}{mm^2} \right] [MPa]$$

Les unitats de l'esforç unitari són similars a les de la pressió: força/superfície. La unitat en el sistema internacional (SI), per tant, és la mateixa: el Pa (pascal):
 $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$.

Aquesta unitat, però, és massa petita, i per això són més utilitzats els seus múltiples: el MPa (10^6 Pa) o el GPa (10^9 Pa). A més és útil recordar l'equivalència: $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$.



L'**esforç unitari** o simplement **esforç**, també es coneix per tensió —o tensió normal—, ja que la força es considera perpendicular —normal— a la secció transversal de la peça.



EXEMPLE 1

Calculem els esforços σ_1 i σ_2 per a cadascuna de les barres d'acer de la figura, de diàmetres $\varnothing_1 = 10$ mm i $\varnothing_2 = 45$ mm, quan els apliquem una força de tracció $F = 2000$ N.

Resolució

$$F_1 = F_2 = 2000 \text{ N} \quad \varnothing_1 = 10 \text{ mm} \quad \varnothing_2 = 45 \text{ mm}$$

$$\sigma_1 = \frac{F}{A_1} = \frac{2000 \text{ N}}{\pi \cdot (5 \text{ mm})^2} = 25,46 \text{ N/mm}^2 = 25,46 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = \frac{F}{A_2} = \frac{2000 \text{ N}}{\pi \cdot (22,5 \text{ mm})^2} = 1,26 \text{ N/mm}^2 = 1,26 \text{ MPa}$$

Com es pot observar, tot i haver aplicat la mateixa força, l'esforç és diferent en cada cas perquè depèn de la secció del material.

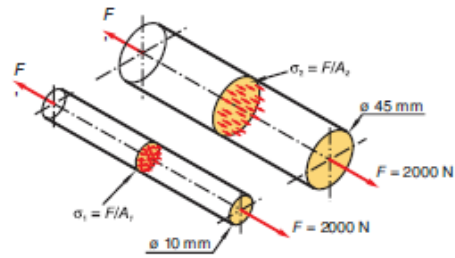


Fig. 6.8

Allargament unitari

Quan s'aplica un esforç de tracció prou intens a un material, aquest s'allarga i incrementa la seva longitud.



L'allargament unitari (ϵ) és la relació entre l'allargament ΔL d'una peça i la llargària inicial L_0 que tenia abans d'aplicar l'esforç de tracció.

Es a dir, l'allargament per unitat de longitud:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ (sense unitats)}$$

L'allargament unitari es pot expressar també en tant per cent (%):

$$\epsilon(\%) = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100$$

Quan s'aplica un esforç de tracció prou intens a un material, aquest s'allarga i incrementa la seva longitud.

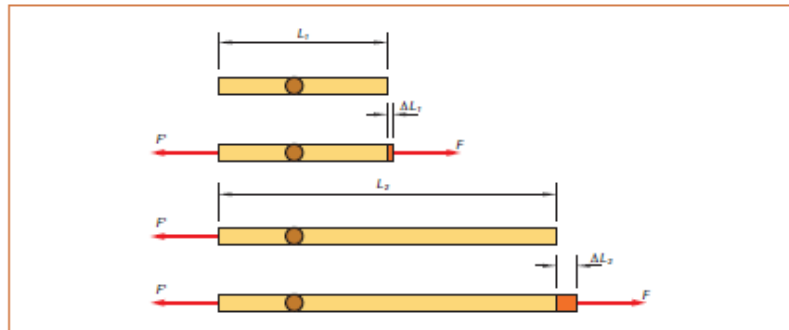


Fig. 6.9. L'allargament depèn de la llargària inicial de la peça. Tot i aplicar la mateixa força, tenir la mateixa secció i ser del mateix material, el valor de l'allargament és diferent en cada cas, ja que depèn de la llargària inicial de la peça. En canvi, el valor de l'allargament unitari ϵ és igual en tots dos casos perquè es tracta del mateix material.

EXEMPLE 2



Tenim dues barres d'acer del mateix material, la mateixa secció, però diferent llargària inicial: $L_1 = 1$ m i $L_2 = 4$ m i els apliquem la mateixa força de tracció $F = 2000$ N. La barra curta s'allarga $\Delta L_1 = 30$ mm i la llarga $\Delta L_2 = 120$ mm. Quins són els allargaments unitaris ϵ_1 i ϵ_2 experimentats per cadascuna de les barres?

Resolució

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta L_1}{L_1} = \frac{30 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1 \text{ m}} = 0,03 \quad \epsilon_1 \% = \frac{\Delta L_1}{L_1} \cdot 100 = 3 \%$$

$$\epsilon_2 = \frac{\Delta L_2}{L_2} = \frac{120 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{4 \text{ m}} = 0,03 \quad \epsilon_2 \% = \frac{\Delta L_2}{L_2} \cdot 100 = 3 \%$$

Tot i haver-se allargat una longitud diferent, l'allargament unitari és idèntic perquè es tracta del mateix material.

Diagrama de tracció

El diagrama de tracció s'utilitza molt per expressar les característiques mecàniques dels materials i es realitza a partir dels assaigs de tracció. En aquests assaigs es fan servir provetes normalitzades (fig. 6.7), normalment de secció circular que, mitjançant màquines de laboratori (fig. 6.6), se sotmeten a esforços de tracció fins a trencar-les. El diagrama de tracció presenta els esforços unitaris a l'eix de les ordenades i els allargaments unitaris a l'eix de les abscisses. Hi ha zones i punts importants d'aquest diagrama que cal destacar:

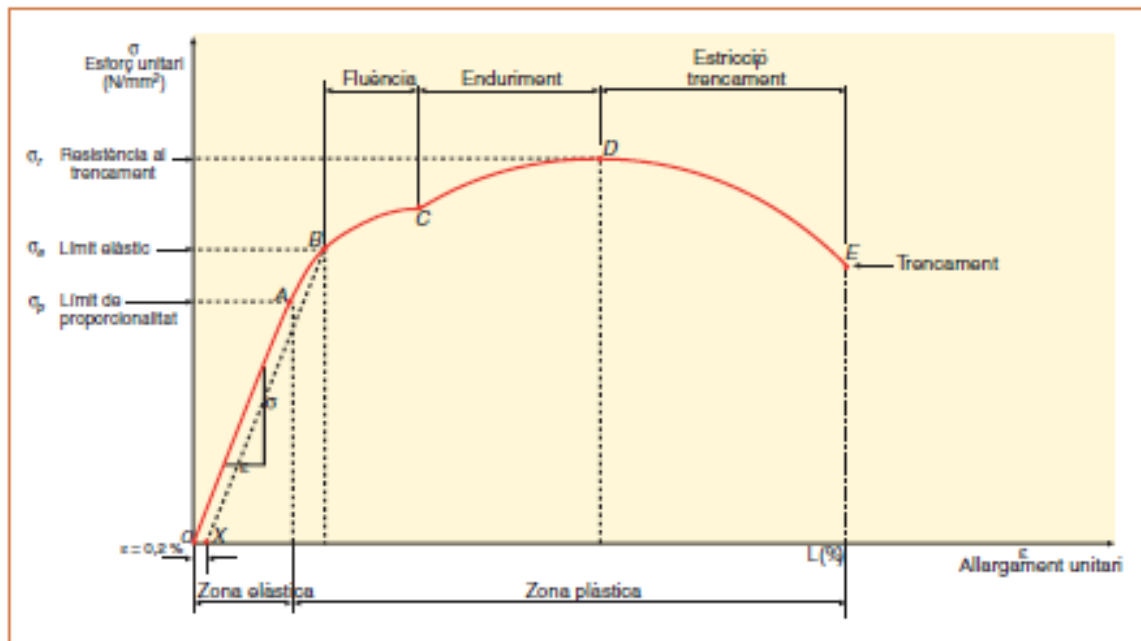


Fig. 6.10. Diagrama de tracció per a un material dúctil com l'acer.

En aquestes pàgines web trobareu més informació sobre aquest assaig.

<https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>

<http://www.tenso.es/utilidades/glosario.asp?termino=Ensayo%20de%20tracci%F3n>

Zona elàstica (O-A)

En aquesta zona, les deformacions produïdes són del tipus elàstic (desapareixen quan es deixa d'aplicar l'esforç). També s'anomena **zona proporcional**, ja que hi ha proporcionalitat directa entre els esforços i les deformacions. Es caracteritza perquè és una línia recta (OA) i a l'extrem superior, al punt A, se situa el límit de proporcionalitat (σ_p). Com a conseqüència, en aquesta zona es compleix la llei de Hooke, i el pendent de la recta correspon al mòdul elàstic (E) del material:

$$\epsilon = \frac{\sigma_p}{E} \rightarrow E = \frac{\sigma_p}{\epsilon}$$

El valor del mòdul elàstic es pot interpretar com la **rigidesa** del material. Com més gran és el mòdul elàstic, més rígid és el material i, per tant, menor és la deformació elàstica produïda quan hi apliquem un esforç.

Zona plàstica (A-E)

Límit elàstic (A-B)

A partir del punt A comencen les deformacions permanents. Al punt B se situa el *límit elàstic* al qual hem fet referència a l'inici d'aquesta unitat. En teoria, el **límit elàstic** és l'esforç unitari màxim que pot

PROPIETATS I ASSAIGS

suportar un material sense experimentar cap deformació permanent. A la pràctica, aquest valor és molt difícil d'obtenir i s'admet com a vàlid el valor de l'esforç que produeix una deformació permanent del 0,2% de la llargària calibrada, representat pel tram $O-X$ de la fig. 6.10 en l'eix de les ϵ .

Els elements de màquines i d'estructures es dissenyen amb unes dimensions que els permetin treballar per sota del seu límit elàstic, per tal d'evitar deformacions perilloses. L'esforç unitari màxim que s'utilitza en el disseny d'una peça es coneix com la **tensió màxima de treball**.

Aquesta tensió es calcula dividint el límit elàstic per un valor anomenat **coeficient de seguretat**:

On σ_e : límit elàstic del material.
 σ_t : tensió màxima de treball.
 n : coeficient de seguretat.

$$\sigma_e = \frac{\sigma_t}{n}$$

Com més gran sigui el coeficient de seguretat, més segura serà la peça. Tanmateix, l'aplicació de coeficients de seguretat elevats significa que s'obtidran peces més grans i, per tant, més pesants i més cares. Alguns valors del coeficient de seguretat es troben normalitzats per a diferents tipus d'elements, de màquines i d'estructures. Normalment, el coeficient de seguretat està comprès entre 1,2 i 4, i el valor més utilitzat és 2.

Fluència (B-C) i enduriment (C-D)

En el tram que va des del límit elàstic, punt B , i fins al punt C , es produeix el que s'anomena **fluència**. El material s'allarga sense gairebé incrementar l'esforç i, per això, es diu que flueix. En alguns materials, com l'acer, aquest tram és gairebé pla. En el tram entre els punts C i D , l'**enduriment** del material, provocat per la deformació, fa que calgui augmentar l'esforç o tensió per continuar deformant el material. En aquests trams, les deformacions sempre són permanents i com més dúctil sigui un material, més àmplia serà aquesta zona. En canvi, els materials fràgils pràcticament no presenten zona plàstica i passen directament de la zona elàstica al trencament. (fig. 6.11).

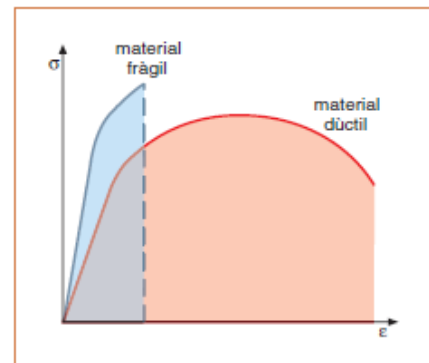


Fig. 6.11. Diagrama de tracció per a un material dúctil i un material fràgil.

Estricció i trencament (D-E)

Quan s'arriba al punt D , comença el trencament de la proveta, tot i que es disminueix l'esforç aplicat (fig. 6.10). L'esforç al punt D es coneix com a **esforç de trencament** (σ_r), i és l'esforç màxim que pot suportar el material abans de trencar-se. Les deformacions en aquest tram es caracteritzen per la disminució de la secció en un punt de la proveta, la qual cosa es coneix amb el nom de **estricció**. A mesura que s'aprima la proveta, l'esforç necessari per trencar-la disminueix i la corba decreix, fins que en el punt E , la proveta queda dividida en dos trossos. Quan en un assaig de tracció obtenim un valor de σ_r menor del que és normal per al tipus de material analitzat, això ens indica la presència de porus o defectes greus a la mostra. Aquesta és una aplicació típica de l'assaig de tracció.

Allargament

Un altre aspecte important que cal considerar és l'**allargament**. A l'assaig de tracció, la deformació del material és sempre un allargament. Hi ha un valor particular d'aquest, però, que té una importància especial; es tracta del que experimenta la mostra just en el moment de trencar-se. Un cop trencada la proveta, s'uneixen els dos trossos i es mesura la distància entre les marques de calibratge. L'allargament s'expressa en forma de percentatge i s'obté de la manera següent:

$$\epsilon\% = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \quad \text{on } \Delta L = L_f - L_0$$

On $\epsilon\%$: allargament en tant per cent.
 L_f : llargària final en mm.
 L_0 : llargària inicial o calibrada en mm.

PROPIETATS I ASSAIGS

El percentatge d'allargament és un valor que s'utilitza per mesurar la ductilitat dels metalls. Com més dúctil és un metall, més gran és aquest valor.

Característiques mecàniques d'alguns materials

Valors de l'assaig de tracció d'alguns materials					
Material	Densitat ρ (kg/m ³)	Mòdul elàstic E GPa (N/mm ²) · (10 ⁹)	Límit elàstic σ_e MPa (N/mm ²)	Esforç de trencament σ_t (N/mm ²)	Allargament ε (%)
Acer (alt en C)	7 840	207	380	615	25
Acer (baix en C)	7 860	207	295	395	37
Acer (mitjà en C)	7 850	207	350	520	30
Aliatge lleuger	2 800	72	97	186	18
Alumini	2 710	69	85	100	25
Bronze	8 800	110	152	380	70
Cautxú	980	4,60	—	28	de 500 a 760
Coure	8 940	110	69	220	45
Ferro	7 870	207	130	260	45
Fosa esferoïdal	7 120	165	275	415	18
Llautó	8 530	110	75	303	68
Nílo	1 140	2,7	—	85	de 15 a 300
Níquel	8 900	207	138	483	40
Plata	10 490	76	55	125	48
Polietilè	960	1,08	—	26	de 10 a 1200
Polipropilè	900	1,35	—	36	de 100 a 600
PVC	1 400	3,3	—	47	de 40 a 80
Titani	4 510	107	240	330	30

Taula 6.2. Valors característics obtinguts amb assaigs de tracció de diversos materials.



Podem dir que els valors de E (mòdul elàstic) ens indiquen la rigidesa, els de σ_e (límit elàstic) l'elasticitat, els de σ_t (esforç de trencament) la resistència mecànica i els de ε (allargament) la plasticitat dels materials.

Activitats

- A un cable de coure de diàmetre $\varnothing = 4$ mm i llargària $L = 6$ m, li apliquem una força de tracció $F = 465$ N. Determina:
 - El valor de la tensió normal s que suporta.
 - El tipus de deformació que experimenta (justificant la resposta).
 - El coeficient de seguretat n amb que treballa el cable.
 - La força mínima F_{\min} que caldria aplicar per trencar el cable.
 - El seu comportament si fos de niló.
- A un cable d'acer alt en carboni de diàmetre $\varnothing = 2$ mm i llargària $L = 6$ m, li apliquem una força de tracció $F = 687$ N. Determina:
 - El valor de la tensió normal s que suporta.
 - El tipus de deformació que experimenta (justificant la resposta).
 - El coeficient de seguretat n amb que esta treballa el cable.
 - La força mínima F_{\min} que caldria aplicar per trencar el cable.
 - El seu comportament si fos de coure.
 - El seu comportament si fos de bronze.
- A un cable d'acer alt en carboni de diàmetre $\varnothing = 2$ mm li apliquem una força de tracció $F = 1027$ N. Determina:
 - El valor de la tensió normal s que esta suportant.
 - El tipus de deformació que experimenta (justificant la resposta).
 - El coeficient de seguretat n amb que esta treballant el cable.
 - El diàmetre que hauria de tenir si fos de coure per tal que la deformació estigues dins el límit elàstic.

f) El diàmetre que hauria de tenir si fos de ferro per tal que la deformació estigues dins el límit elàstic.

EXEMPLE 3



A un cable de coure de diàmetre $\varnothing = 3 \text{ mm}$ i llargària $L = 2 \text{ m}$ li apliquem una força de tracció $F = 350 \text{ N}$. Determina:

- a) El valor de la tensió normal σ que està suportant.
- b) El tipus de deformació que experimenta (justifica la resposta).
- c) El coeficient de seguretat n amb què està treballant el cable.
- d) La força mínima, $F_{\text{mín}}$, que caldria aplicar per trencar el cable.
- e) El seu comportament si fos de niló.
- f) El seu comportament si fos d'alumini.

Resolució

a) La tensió normal equival a l'esforç unitari.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{350 \text{ N}}{\pi \cdot (1,5 \text{ mm})^2} = 49,51 \text{ N/mm}^2 = 49,51 \text{ MPa}$$

b) Experimenta una **deformació elàstica** perquè l'esforç de tracció ($\sigma = 49,51 \text{ MPa}$) és inferior al límit elàstic del coure ($\sigma_e = 69 \text{ MPa}$).

$$c) \sigma_t = \frac{\sigma_e}{n} \Rightarrow n = \frac{\sigma_e}{\sigma_t} = \frac{69 \text{ MPa}}{49,51 \text{ MPa}} = 1,39$$

El coeficient de seguretat és $n = 1,39$

d) Perquè es produeixi el trencament s'ha de complir que $\sigma \geq \sigma_t$

En el cas del coure, $\sigma_t = 220 \text{ MPa}$

$$\frac{F}{A} \geq 220 \text{ MPa} \Rightarrow F \geq A \cdot 220 \text{ MPa} \Rightarrow F \geq \pi (1,5 \text{ mm})^2 \cdot 220 \text{ MPa} = 1555,09 \text{ N}$$

Per trencar el cable de coure caldrà aplicar una força $F \geq 1,555 \text{ kN}$

e) Si fos de niló, com que la resistència al trencament és de 85 MPa , el fil no es trencaria, ja que $\sigma < \sigma_t$. Patiria una deformació elàstica (considerant que el niló no té límit elàstic).

f) Si fos d'alumini, com que la resistència al trencament és de 100 MPa , el fil no es trencaria, ja que $\sigma < \sigma_t$. Patiria una deformació elàstica, ja que l'esforç o tensió normal ($\sigma = 49,51 \text{ MPa}$) no supera el límit elàstic de l'alumini ($\sigma_e = 85 \text{ MPa}$).

EXEMPLE 4

Quin esforç unitari experimentarà un tub de titani (Ti) amb una secció rectangular de dimensions exteriors $L_1 = 10 \text{ mm}$ i $L_2 = 5 \text{ mm}$, un gruix $e = 1 \text{ mm}$ i una llargària $L = 1,5 \text{ m}$ quan li apliquem una força de tracció $F = 6000 \text{ N}$? Quina serà la massa m i el pes G d'aquest tub?

Resolució

Per calcular la secció efectiva del tub, caldrà restar la secció interior (buida) de la secció exterior tenint en compte el gruix:

$$A = (10 \text{ mm} \cdot 5 \text{ mm}) - (8 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm}) = 26 \text{ mm}^2$$

Calculem l'esforç unitari o tensió normal:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{6000 \text{ N}}{26 \text{ mm}^2} = 230,77 \text{ N/mm}^2 = 230,77 \text{ MPa}$$

La massa m i el pes G del tub els podem determinar a partir de la densitat i el volum del cos, tal com s'ha explicat. Llavors tenim que:

$$m = \rho \cdot V \quad \text{i} \quad G = \rho \cdot V \cdot g$$

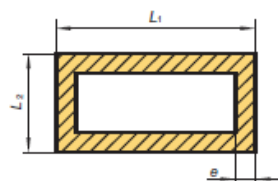
Com es pot observar, ens cal calcular el volum. Llavors el volum de qualsevol cos de secció constant es pot obtenir multiplicant l'àrea de la base o secció per la seva longitud. Com a conseqüència, el volum del tub de titani valdrà:

$$V = A \cdot L; \quad V = 26 \text{ mm}^2 \cdot 1500 \text{ mm} = 39000 \text{ mm}^3 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{10^9 \text{ mm}^3} = 39 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

A la taula de dades de l'assaig de tracció trobem que la densitat del titani val $\rho = 4510 \text{ kg/m}^3$; llavors tenim que:

$$m = \rho \cdot V = 4510 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 39 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 = 0,1759 \text{ kg}$$

$$G = \rho \cdot V \cdot g = 0,1759 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1,7255 \text{ N}$$



ACTIVITATS

- 4> Calcula la tensió normal de tracció σ a què estan sotmesos els elements dels apartats següents quan han de suportar el pes d'una marquesina de massa $m = 780 \text{ kg}$.
- Barra de secció rectangular de $10 \times 15 \text{ mm}$.
 - Tub de diàmetre $\varnothing = 45 \text{ mm}$ amb gruix $e = 2 \text{ mm}$.
 - Tub de secció rectangular de $200 \times 80 \text{ mm}$ i gruix $e = 1,5 \text{ mm}$.
 - Barra rodona de diàmetre $\varnothing = 6 \text{ mm}$.
 - Barra sisavada de 20 mm de costat.
- 5> A partir dels valors mostrats a la taula de dades de l'assaig de tracció, indica quin o quins dels metalls:
- Són més rígids.
 - Presenten un comportament més dúctil.
 - Són més elàstics.
 - Són els més lleugers.
 - Tenen una resistència mecànica més elevada.

- 6> Si tenim dos objectes amb les característiques següents:

A: diàmetre $\varnothing_A = 30 \text{ mm}$, llargària $L_A = 1,5 \text{ m}$

B: amplada $L_{B1} = 10 \text{ mm}$, alçada $h = 70,68 \text{ mm}$, llargària $L_{B2} = 1 \text{ m}$

Reprodueix una taula com la de la dreta i indica quin serà més resistent per a cadascun dels esforços. Justifica les teves respostes.

Esforç	Objecte més resistent	Justificació
Tracció		
Compressió		
Torsió		
Cisallament		
Flexió		

- 7> Un cable d'acer de diàmetre $\varnothing = 3 \text{ mm}$ està suportant el pes d'una caixa de massa $m = 160 \text{ kg}$.
- Quin és el valor de la tensió normal σ a què està sotmès el cable?
 - Describeu el comportament del cable en aquesta situació.

La duresa

El diamant és el material més dur que es coneix. En canvi, el talc és el mineral més tou. En llenguatge col·loquial s'utilitza el terme de duresa com a contrari a fragilitat: diem que un material és dur quan és difícil de trencar. Aquest, però, no és el seu significat tecnològic correcte.



La duresa és la resistència o oposició que presenta un material a ser ratllat o penetrat per un altre material.

La broca és una eina capaç de foradar perquè està feta d'un material més dur que el que ha de foradar. La llima pot polir metalls perquè és més dura que aquests. La duresa és deguda a les forces de cohesió existents entre els àtoms del material. Com més fortes siguin aquestes forces, més dur serà el material. Per comparar i mesurar la duresa s'utilitzen diferents tipus d'assaigs. La majoria d'aquests assaigs consisteixen a forçar la penetració d'un objecte de material molt dur (el penetrador) sobre el material a assajar (la mostra o la proveta). Com més penetració s'aconsegueixi, aplicant la mateixa força, més tou serà el material que s'està estudiant. Un dels mètodes més utilitzats per mesurar la duresa dels metalls és l'assaig Brinell, que està regulat per la norma UNE-EN ISO 6506-1.

Assaig de duresa Brinell

L'assaig Brinell utilitza un penetrador de material molt dur (carbur de tungstè) en forma d'esfera que se situa damunt de la mostra de material que s'ha d'assajar. S'aplica una càrrega damunt l'esfera durant un temps. Després es retiren la càrrega i l'esfera i es mesura el diàmetre de la marca que s'ha produït sobre la mostra o proveta. El grau de duresa, que en aquest cas s'anomena *duresa Brinell*, és proporcional al quocient entre la càrrega i la superfície de la marca i s'obté a partir de l'expressió:

$$HBW = 0,102 \cdot \frac{F}{A}$$

- on *HBW*: grau de duresa Brinell (sense unitats).
 0,102: constant (equivalent a $1/g = 1/9,806$ on g és l'acceleració de la gravetat).
F: càrrega aplicada (N).
A: superfície de la marca deixada sobre la proveta (mm^2).

Per obtenir el valor de la superfície de la marca (superfície esfèrica), es mesura el seu diàmetre amb un microscopi o lupa dotats d'una retícula graduada i s'opera segons l'expressió:

$$A = \frac{\pi \cdot D_1 \left[D_1 - \sqrt{D_1^2 - D_2^2} \right]}{2}$$

- on *D*₁: diàmetre de l'esfera (penetrador) (mm).
*D*₂: diàmetre de la marca deixada a la mostra o proveta (mm).

Els assaigs de duresa es fan amb unes màquines especials anomenades **duròmetres**. Per a acers i materials metàl·lics en general, s'utilitzen els valors següents:

- $\varnothing_{\text{esfera}} = 10 \text{ mm}$
 càrrega aplicada $F = 29,42 \text{ kN}$ (equivalent al pes d'una massa $m = 3\,000 \text{ kg}$)
 temps d'aplicació de la càrrega $t = 15 \text{ s}$

Per a materials tous s'apliquen càrregues més petites i per a provetes primes s'utilitzen penetradors de diàmetre menor. Tot plegat s'indica de la manera següent:

XX HBW (D/C/t)

- on *XX*: grau de duresa Brinell.
D: diàmetre del penetrador (mm).
C: $0,102 \cdot F$ (F és la càrrega aplicada en N).
t: temps que ha durat l'aplicació de la càrrega (s).

Duresa Brinell	
Material	HBW
Acer per a eines	500
Acer dur	210
Acer dolç	110
Bronze	100
Llautó	50
Alumini	25 a 30

Taula 6.3. Valors de la duresa Brinell per a diferents materials.

Relació entre la duresa i la resistència a la tracció

En el fons, tant els valors de duresa com els de resistència a la tracció indiquen el grau d'oposició que presenta un material a ser deformat plàsticament, ja sigui estirant-se, obrint un solc (ratlla) o un forat. Aquests dos valors, en un mateix material, són proporcionals a les forces de cohesió. És lògic pensar, doncs, que per a cada material existeixi un valor que expressi aquesta proporcionalitat. En el cas dels acers aquest valor és de 3,45:

$$\sigma_r(\text{MPa}) \text{ 3,45 HBW (relació vàlida únicament per a acers)}$$

L'avantatge d'aquesta relació és evident: permet obtenir valors molt aproximats de resistència al trencament sense realitzar un assaig de tracció costós. L'assaig de duresa sempre és més senzill que no pas el de tracció.

EXEMPLE 5

Quin és el significat d'un valor de duresa expressat com:

187 HBW 5/750/20?

Resolució

Significa que el material assajat té un grau de duresa Brinell de 187 i que l'assaig s'ha fet amb un penetrador de carbur de

diàmetre $\emptyset = 5$ mm, amb una càrrega $F = \frac{C}{0,102} = \frac{750}{0,102} = 7353$ N aplicada durant 20 s.

EXEMPLE 6

Després de realitzar l'assaig de duresa sobre una proveta de gruix $e = 20$ mm amb un duròmetre Brinell, observes que la marca deixada sobre el material té un diàmetre $D_2 = 1,73$ mm. Si a l'assaig has aplicat una càrrega $F = 1170$ N durant un temps $t = 15$ s amb un penetrador de diàmetre $D_1 = 10$ mm, determina la duresa del material de la proveta. De quin material podria tractar-se?

Resolució

Primer calculem la superfície de la marca

$$A = \frac{\pi \cdot D_1 [D_1 - \sqrt{D_1^2 - D_2^2}]}{2} = \frac{\pi \cdot 10 [10 - \sqrt{10^2 - 1,73^2}]}{2} = 2,368 \text{ mm}^2$$

i després el valor de duresa Brinell

$$\text{HBW} = 0,102 \cdot \frac{F}{A} = 0,102 \cdot \frac{1170 \text{ N}}{2,368 \text{ mm}^2} = 50,39$$

La duresa del material de la proveta és 50,39 HBW. Segons la taula de valors de duresa Brinell, podria tractar-se d'un llautó.

Activitats

- Després de realitzar l'assaig de duresa sobre una proveta de gruix $e = 20$ mm amb un duròmetre Brinell, observes que la marca deixada sobre el material té un diàmetre $d = 1,45$ mm. Si a l'assaig has aplicat una càrrega $F = 1260$ N durant un temps $t = 15$ s amb un penetrador de diàmetre $D = 12$ mm, determina la duresa del material de la proveta.
- Després de realitzar l'assaig de duresa sobre una proveta de gruix $e = 20$ mm amb un duròmetre Brinell, observes que la marca deixada sobre el material té un diàmetre $d = 1,94$ mm. Si a l'assaig has aplicat una càrrega $F = 1320$ N durant un temps $t = 15$ s amb un penetrador de diàmetre $D = 8$ mm, determina la duresa del material de la proveta. De quin material podria tractar-se?
- Donat un material de duresa Brinell 210, quina força s'ha hagut d'aplicar sobre ell durant 15 s si la marca deixada amb un penetrador de 8 mm de diàmetre té un diàmetre igual a 2,1 mm?

ACTIVITATS

- 8> En un laboratori de control de qualitat fan un assaig amb un duròmetre sobre una proveta de gruix $e = 12$ mm. Utilitzen una esfera de carbur de diàmetre $D_1 = 10$ mm a la qual apliquen una càrrega $F = 29\,418$ N durant un temps $t = 15$ s. Al microscopi observen que la marca deixada té un diàmetre $D_2 = 2,75$ mm.
- a) De quin material pot tractar-se?
b) A aquest material cal gravar-li una marca amb un punxó. De quin material podria ser aquest punxó?
- 9> Quin valor aproximat de duresa tindrà un acer amb un contingut alt de carboni? I una mostra de coure? Justifica les teves respostes.
- 10> Investiga sobre l'assaig de duresa Vickers i indica quines són les diferències més importants amb el Brinell.
- 11> Hi ha assaigs de duresa que no es basen en la penetració. Alguns exemples són l'assaig Shore i l'assaig Martens. Investiga aquests assaigs de duresa i presenta'n un petit informe.

Tenacitat

Quan hem parlat de la resistència, hem suposat que els esforços eren aplicats de manera constant o, si més no, progressiva. Però els esforços poden ser aplicats de manera sobtada, instantània, violenta, etc.; en aquest cas es parla de **xoc** i no pas d'esforç.



La **tenacitat** es defineix com la capacitat de **resistència al xoc**.

Aquesta sí que és la propietat contrària a la fragilitat. Els materials fràgils es trenquen sense deformació quan són sotmesos a un xoc, i pràcticament no absorbeixen energia cinètica de l'objecte que el provoca. Els materials tenaços, en canvi, són capaços d'absorbir molta energia cinètica en un xoc i transformar-la en deformació plàstica o elàstica, i evitar d'aquesta manera el trencament.

Normalment, la fragilitat (o manca de tenacitat) està lligada a la duresa: els materials durs acostumen a ser fràgils. Hi ha moltes aplicacions tècniques en què cal disposar de materials que siguin durs i tenaços alhora, les rodes del material mòbil ferroviari serien un bon exemple: cal que tinguin duresa per tal d'evitar el desgast que suposa el fregament amb el carril i, alhora, han de tenir prou tenacitat per suportar els cops que es produeixen als canvis de via, als creuaments i a les juntes o fissures del carril.

Assaig de resiliència



Es coneix amb el nom de **resiliència** l'energia necessària per trencar un material amb un sol cop. L'assaig de resiliència es denomina també assaig de resistència al xoc.

El valor de la resiliència obtingut a l'assaig és una mesura indirecta de la tenacitat dels materials. Com més alt sigui el valor de la resiliència, més tenaç serà el material assajat.

Tanmateix, la resiliència és directament proporcional a la tenacitat del material, però cal tenir present que la resiliència sola no és suficient per valorar la tenacitat: un material pot anomenar-se tenaç quan posseeix una bona resistència a la tracció juntament amb un valor elevat d'allargament i una bona resiliència.

Hi ha dues modalitats d'aquests tipus d'assaigs: el pèndol de *Charpy* i el d'*Izod*. Totes dues són molt similars i, per tant, només en descriurem una:

L'**assaig Charpy** es realitza en una màquina que incorpora un pèndol amb una massa de 22 kg situada al seu extrem. A la vertical del punt de gir del pèndol hi ha l'enclusa on es fixa la proveta. En el moment de realitzar l'assaig, es deixa caure el pèndol des de la posició inicial a una alçària fixa h . Un cop impactada la proveta, aquesta es trenca i el pèndol continua el seu recorregut. L'alçària final h' assolida pel pèndol a la posició

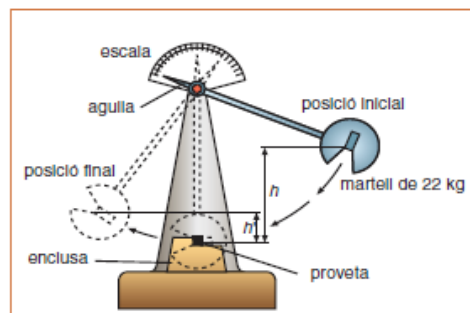


Fig. 6.14. Esquemes de l'assaig de Charpy.

PROPIETATS I ASSAIGS

final serà inferior a la inicial a causa de l'energia consumida en el trencament de la proveta. La diferència d'alçàries ($h - h'$) és directament proporcional a la resiliència.

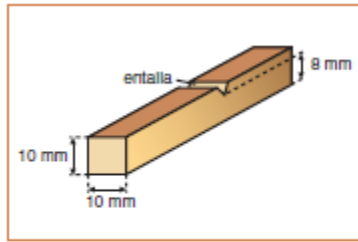


Fig. 6.15. Proveta de l'assaig Charpy.

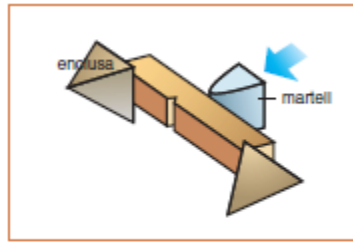


Fig. 6.16. Impacte de la proveta amb el martell.

Les provetes tenen mecanitzada una entalla, que té forma de V, que permet que el trencament es produeixi en el punt desitjat. La forma i les dimensions de les provetes estan normalitzades. Els valors de resiliència es donen un cop dividida l'energia cinètica perduda al xoc per la secció del material en el punt de trencament, així la resiliència no depèn del gruix del material:

$$K = \frac{E_c}{A}$$

- on
- K : valor de la resiliència del material (J/mm^2)
 - E_c : energia cinètica consumida en el trencament de la proveta (J)
 - A : secció de trencament de la proveta (mm^2)

EXEMPLE 8

En un assaig Charpy s'utilitza una proveta de secció quadrada de costats $L_1 = 10 \text{ mm}$ amb una entalla de $L_2 = 2 \text{ mm}$. El pèndol assoleix una alçada màxima $h' = 140 \text{ mm}$ després de trencar la proveta. Calcula quin és el valor de resiliència K del material assajat si l'alçada inicial del pèndol era $h = 400 \text{ mm}$.

Resolució

La secció de trencament de la proveta és:

$$A = 10 \cdot (10 - 2) = 80 \text{ mm}^2$$

L'energia consumida en el trencament de la proveta equival a la diferència d'energia potencial del pèndol en el moment inicial i el final:

$$E_c = m \cdot g \cdot h' - m \cdot g \cdot h = m \cdot g (h' - h) = 22 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot (140 \cdot 10^{-3} \text{ m} - 400 \cdot 10^{-3} \text{ m}) = -56,11 \text{ J}$$

El valor obtingut és negatiu perquè s'ha produït una pèrdua d'energia potencial. Per calcular el valor de resiliència s'utilitza l'energia en valor absolut.

El valor de la resiliència del material serà, doncs:

$$K = \frac{E_c}{A} = \frac{56,11 \text{ J}}{80 \text{ mm}^2} = 701,4 \cdot 10^{-3} \text{ J}/\text{mm}^2$$

Activitats

7. En un assaig Charpy s'utilitza una proveta de secció quadrada de costats $L_1 = 16 \text{ mm}$ amb una entalla de $L_2 = 1,5 \text{ mm}$. El pèndol assoleix una alçada màxima $h' = 90 \text{ mm}$ després de trencar la proveta. Calcula quin és el valor de resiliència K del material assajat si l'alçada inicial del pèndol era $h = 250 \text{ mm}$.

Assaigs de fatiga

Mitjançant l'assaig de tracció i de duresa es pot observar el comportament dels materials quan són sotmesos a esforços constants, estàtics. A l'assaig de resiliència, en canvi, el material és sotmès a un esforç instantani i dinàmic. Els materials, a les seves aplicacions reals, normalment estan sotmesos a esforços estàtics i dinàmics combinats. De vegades, una peça es trenca a conseqüència d'un esforç menor del seu límit elàstic, però que ha estat aplicat repetidament i de manera fluctuant o alternativa.



Els esforços que alternen el seu sentit d'aplicació (tracció-compensió, torsió, flexió) de manera repetitiva o cíclica en el temps, s'anomenen **esforços de fatiga**.

L'eix del motor d'un ascensor està sotmès a torsió alternativa a les pujades i baixades i als canvis d'arrencada i frenada. L'eix del cilindre d'un actuator hidràulic en una excavadora està sotmès alternativament a esforços de tracció i compressió. La major part dels trencaments de peces metàl·liques és deguda a la fatiga.

L'**assaig de fatiga** intenta reproduir les condicions de treball reals dels materials. Un dels més usuals consisteix a sotmetre la proveta a esforços de flexió rotativa (combinació de torsió i flexió) seguint un cicle que es va repetint en el temps.

Els resultats de l'assaig es representen en un gràfic que es coneix per **corba S-N** o **diagrama de Wöhler**:

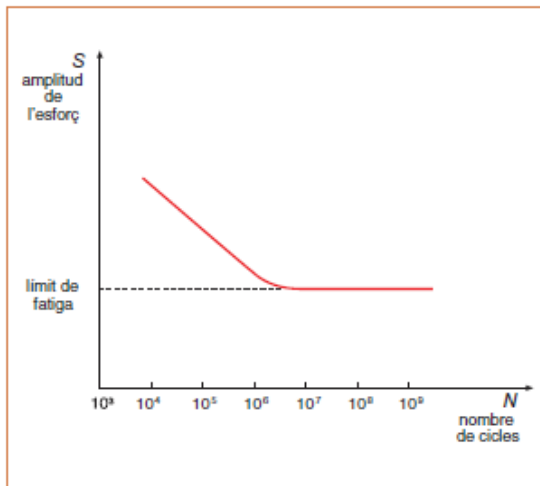


Fig. 6.17. Diagrama de Wöhler.

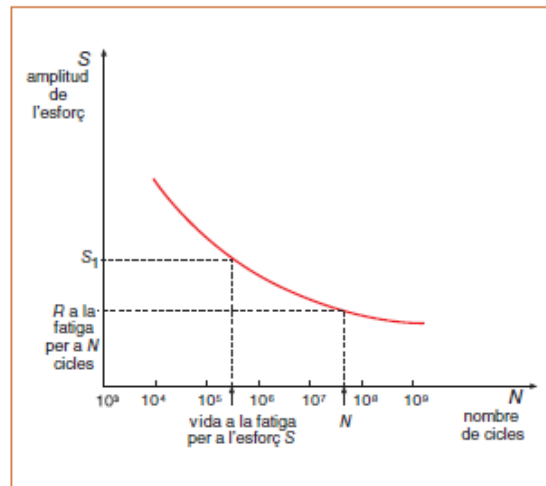


Fig. 6.18. Resistència i vida a la fatiga en un diagrama de Wöhler.

A l'eix de les ordenades es representa l'*amplitud* de l'esforç aplicat S (el valor mitjà entre el màxim i el mínim) i a l'eix de les abscisses es representa (en escala logarítmica) el nombre de cicles N a què ha estat sotmesa la proveta fins al seu trencament.

A la vista de la corba S-N es poden definir dos valors importants:

La **resistència a la fatiga** és el valor de l'amplitud de l'esforç que provoca el trencament del material després d'un nombre determinat de cicles. Si d'un material determinat ens donen el valor de 225 N/mm^2 com a resistència a la fatiga per a 10^7 cicles, hem d'entendre que si sotmetem el material a esforços alternatius l'amplitud dels quals no supera els 225 N/mm^2 , resistirà sense trencar-se un mínim de 10^7 cicles de treball.

La **vida a la fatiga** és el nombre de cicles de treball que pot suportar un material per a una determinada amplitud de l'esforç aplicat i es representa per N_f .

Es distingeixen dos comportaments diferents dels materials davant la fatiga: aquells que, més tard o més d'hora, sempre acaben trencant-se i aquells que, si no superem un determinat valor de l'amplitud de l'esforç aplicat, no es trenquen per molts cicles de treball que els apliquem. Aquests últims materials posseeixen un valor anomenat límit de fatiga que es defineix com el màxim valor de l'amplitud de l'esforç a aplicar perquè no es trenqui en un nombre infinit de cicles. Exemples de materials amb límit de fatiga són els aliatges de titani i alguns aliatges fèrrics. Els límits de fatiga d'alguns acers acostumen a tenir valors entre el 35 i el 60% del valor de la resistència a la tracció. La major part dels aliatges de coure i alumini no tenen límit de fatiga i, per tant, sempre es trenquen quan s'augmenta el nombre de cicles de treball.

El trencament per fatiga s'inicia sempre a la superfície dels materials.

Assaigs no destructius o de defectes

Quan es realitza el disseny d'una peça de l'estructura d'un avió, es calculen teòricament els esforços a què estarà sotmesa i es dimensiona utilitzant un coeficient de seguretat prou ampli. Per fer els càlculs s'utilitzen uns valors de resistència mecànica obtinguts a partir d'assaigs destructius sobre mostres (provetes) del material utilitzat.

També a la indústria on s'ha d'elaborar la peça es fan assaigs a la recepció dels materials per determinar-ne la qualitat. Però, tot i així, pot passar que un cop fabricada i muntada a l'avió, la peça es trenqui sense avis previ i provoqui un accident greu. El motiu és la presència d'un defecte intern. De vegades, aquest defecte pot ser produït involuntàriament en el procés de fabricació. D'altres vegades, pot ser provocat per la fatiga a la qual està sotmesa la peça en la seva posició normal de treball.

Els assaigs no destructius no deixen marques i s'apliquen a peces elaborades per determinar la presència (o absència) de defectes interns no observables a simple vista. És per això que aquests assaigs també s'anomenen *de defectes*. La presència d'aquests defectes fa que els materials tinguin resistències mecàniques molt inferiors a les teòriques i, per tant, poden ser la causa de greus accidents.

Els defectes interns poden ser, entre d'altres: fissures, esquerdes, porus, inclusions (escòries), etc. En definitiva, qualsevol alteració greu de l'estructura interna d'un material que fa que aquesta deixi de ser homogènia.

Els assaigs no destructius més importants són els *magnètics*, els de *raigs X* i *raigs gamma* i els assaigs per *ultrasons*.

Assaigs magnètics

Consisteixen en l'aplicació d'un camp magnètic a la peça que es vol assajar; si aquesta no té defectes, l'estructura interna serà homogènia i, per tant, la permeabilitat magnètica serà constant en tota la seva extensió. La **permeabilitat magnètica** és una característica pròpia de cada material i que indica la seva capacitat de concentrar o dispersar les línies de força d'un camp magnètic. Aleshores, quan en una peça hi ha algun defecte, l'estructura interna deixa de ser homogènia i es provoca una variació localitzada de la permeabilitat magnètica que desvia les línies de força del camp magnètic.

Aquests assaigs tenen una limitació important: només es poden realitzar en materials ferromagnètics, que són els que tenen una permeabilitat elevada i que concentren les línies del camp magnètic. És a dir, el seu ús està limitat bàsicament als metalls fèrrics (acers i fosa).

Assaigs per raigs X i raigs gamma

Quan el material de la peça que volem examinar no és ferromagnètic o el defecte pot estar allunyat de la superfície (peça gruixuda), cal utilitzar un altre tipus d'assaig no magnètic. Una possible solució consisteix en la utilització de raigs X o raigs γ .

Aquests assaigs consisteixen a fer que la radiació travessi la peça que es vol examinar i arribi a impressionar una placa fotogràfica situada al darrere. Quan una radiació d'aquest tipus travessa un material, va perdent intensitat perquè el material absorbeix part de la radiació. Però no totes les substàncies absorbeixen aquestes radiacions en la mateixa mesura: no es produeix la mateixa absorció a l'acer que a l'aire o que a la fosa. Cada material posseeix, per tant, un grau d'absorció diferent. Aquest és el factor que s'utilitza per detectar els defectes. Si no hi ha defectes, l'absorció de la radiació ha de ser uniforme en tota la peça i la placa fotogràfica quedarà impressionada també de forma uniforme. En canvi, quan hi ha algun defecte, a la placa apareix una zona localitzada amb una intensitat més clara o més fosca que la resta (una taca) que ens indicarà la seva presència.

PROPIETATS I ASSAIGS

Assaigs per ultrasons

La tècnica dels assaigs per ultrasons és molt similar a l'ecografia utilitzada per a la diagnosi en medicina. També el sonars amb què van equipats els vaixells de pesca utilitzen una tècnica similar. Els ultrasons són ones de pressió o sonores (diferents de les electromagnètiques) de freqüència superior a la màxima audible per l'oïda humana (> 20000 Hz).

Les ones ultrasonores es reflecteixen, es refracten i es dispersen davant de canvis en el medi per on es propaguen. Aquestes propietats (en especial la reflexió) són aprofitades per detectar defectes interns a les peces metàl·liques.

Una de les modalitats d'aquest assaig consisteix a situar l'emissor i el receptor sobre la mateixa cara de la peça que s'assaja. L'emissor envia els ultrasons en forma d'impulsos de curta durada. Quan arriben a la cara oposada de la peça, són reflectits (eco) i captats pel detector. Si no hi ha cap defecte, a la pantalla apareixen dos polsos corresponents al so de sortida i a l'eco de tornada; com més gruixuda sigui la peça, més separats estaran els polsos. Si existeix un defecte, part de l'ona es reflecteix en aquest i arriba abans al detector. A la pantalla apareixen tres polsos: so de sortida, eco del defecte, eco normal del final de la peça.

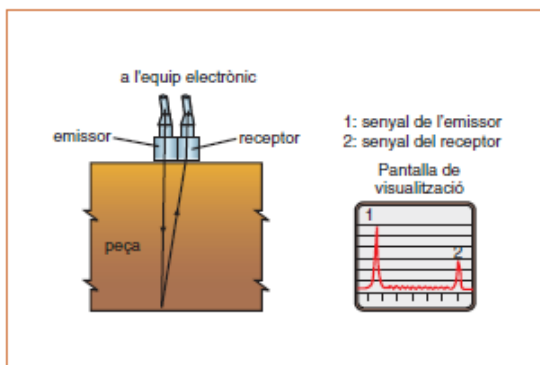


Fig. 6.21. Esquemes de l'assaig per ultrasons d'una peça sense defectes.

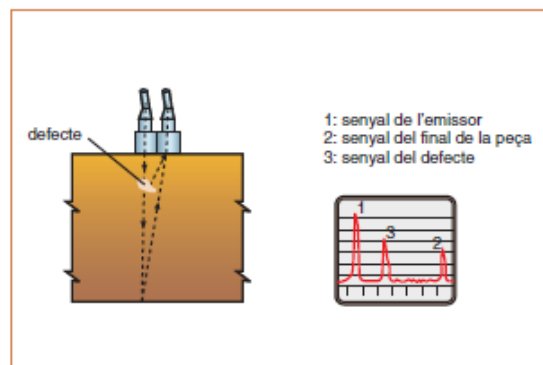


Fig. 6.22. Esquemes de l'assaig per ultrasons d'una peça amb defectes.

ACTIVITATS

- 12> La figura següent representa la proveta d'un material per sotmetre a un assaig Charpy. Determina la resiliència K del material si el pèndol ha pujat fins a una alçada màxima $h' = 120$ mm partint d'una alçada inicial $h = 250$ mm.

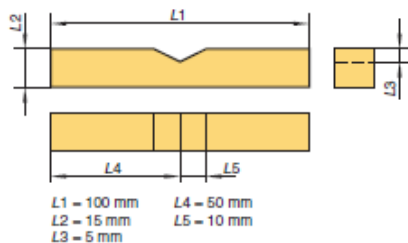


Fig. 6.23

- 13> Explica el significat tecnològic de les afirmacions següents:

- El material per fabricar l'eix de transmissió ha de tenir una resistència a la fatiga de 600 MPa per a $5 \cdot 10^6$ cicles.
- La palanca ha de suportar esforços màxims de 150 MPa, ens cal fer-la d'un material que tingui una vida a la fatiga de 10^8 cicles per a aquests esforços.
- La peça no s'hauria trencat mai si no s'hagués sotmès a esforços superiors a 300 MPa.

- 14> Quin és l'assaig no destructiu més adequat per detectar defectes en una peça d'alumini molt gruixuda? Justifica la teva resposta.

15> En el gràfic es representen dues corbes S-N per a dos materials diferents: A i B. Observa'l bé i contesta:

- Quin és el límit de fatiga de cadascun dels materials?
- Quina és la resistència a la fatiga del material A per a 10 000 cicles?
- Quina és la resistència a la fatiga del material B per a 100 milions de cicles?
- Quina és la vida a la fatiga del material B per a un esforç de 600 N/mm²?
- Què li passarà al material A si li apliquem esforços de 400 N/mm² durant mil milions de cicles?

16> Fes un resum dels avantatges i inconvenients d'utilitzar cadascun dels assaigs de defectes.

17> Enumera els factors que cal tenir presents a l'hora de triar l'assaig de defecte més adequat a cada cas.

Fig. 6.24

6.3 Propietats tèrmiques

Les propietats tèrmiques indiquen el comportament dels materials davant d'una de les formes que pot adoptar l'energia: la calor. Hi ha dues d'aquestes propietats que tenen importants implicacions tecnològiques: la conductivitat tèrmica i la dilatació tèrmica.

Cal recordar que la temperatura d'un cos és proporcional a la velocitat mitjana de les molècules que el formen, i que l'energia tèrmica és proporcional a la temperatura i a la massa del cos. Quan l'energia tèrmica es transfereix d'un cos a un altre s'anomena calor, i sempre es transfereix del cos que té més temperatura al que en té menys. La calor entre els cossos es pot transferir de tres maneres: per conducció, per convecció i per radiació.

- **Conducció.** És la propagació de la calor pròpia dels cossos sòlids. Es dona per contacte directe entre cossos a temperatures diferents. Si posem en contacte dos cossos amb diferent temperatura, passa calor del que té més temperatura al que en té menys. Si el contacte es manté, hi ha transferència de calor fins que s'igualen les temperatures.
- **Convecció.** És la propagació de la calor pròpia dels fluids. La part calenta del fluid té menys densitat i passa a la zona més alta; el fluid més fred queda a la part baixa. Aquesta circulació de fluids rep el nom de **corrent de convecció**.
- **Radiació.** És la propagació de la calor que es produeix en els cossos en forma d'ones electromagnètiques, que travessen els medis que els són transparents, com ara l'aire, sense gairebé escalfar-los, però quan incideixen sobre cossos que els són opacs, per exemple el nostre cos o les parets d'una habitació, els transfereixen l'energia que transporten i n'augmenten la temperatura. L'emissió és més important com més alta és la temperatura del cos.

Conductivitat tèrmica

L'energia tèrmica tendeix a fluir, de manera natural, des dels cossos més calents als més freds. També es pot transferir l'energia tèrmica entre dues zones d'un mateix cos si estan a diferent temperatura. Ara bé, no tots els materials ofereixen la mateixa facilitat perquè es produeixi aquest flux d'energia:



La **conductivitat tèrmica** és la facilitat que ofereix un material per permetre el flux d'energia tèrmica a través seu.

A l'hivern, la temperatura a l'exterior dels habitatges és inferior a la interior. Sabem que part de l'energia tèrmica «s'escapa» a l'exterior a través del vidre de les finestres. En quines condicions el flux d'energia serà més intens? Per respondre a aquest interrogant ens podem fixar en la superfície de la finestra (amb una superfície major, més flux tèrmic), en el gruix del vidre (amb un gruix major, menys

PROPIETATS I ASSAIGS

flux tèrmic), en el temps (com més temps d'exposició, més energia s'haurà transferit), o en la diferència de temperatures entre l'interior i l'exterior (com més diferència de temperatures, més transferència d'energia). Finalment, també ens hem de fixar en el tipus de material; per exemple, si utilitzem poliestirè en lloc d'utilitzar vidre, les pèrdues d'energia a través de la finestra canviaran perquè la conductivitat tèrmica del poliestirè és diferent de la del vidre.

Totes aquestes condicions es poden representar amb l'expressió matemàtica següent:

$$Q = \lambda \cdot \frac{A \cdot t \cdot \Delta T}{L}$$

- on
- Q: quantitat de calor transmesa (J)
 - λ : conductivitat tèrmica del material (W/m· °C) o (W/m· K)
 - A: superfície de contacte entre les dues masses tèrmiques o entre les dues zones que es troben a diferent temperatura (m²)
 - t: temps transcorregut (s)
 - ΔT : diferència de temperatures (°C) o (K)
 - L: gruix del material o distància entre les dues zones a diferent temperatura si es tracta d'un mateix cos (m)

El quocient Q/t s'anomena **potència tèrmica** (P_t). Així doncs, podem determinar la potència tèrmica transmesa com:

$$P_t = \lambda \cdot \frac{A \cdot \Delta T}{L}$$

Com que la conductivitat tèrmica d'un material depèn de la temperatura inicial a la qual es troba, a les taules on apareixen les propietats dels materials aquest valor s'indica per a una determinada temperatura (normalment 0 °C o 20 °C).

Material (a 20 °C)	Conductivitat tèrmica (λ) W/m °C
Aire	0,02
Poliuretà	0,031
Poliestirè	0,13
Polietilè	0,48
Vidre (de sosa i calç)	1,7
Acer	52
Llautó	62
Níquel	80
Bronze	122
Alumini	231
Coure	398

Taula 6.4. Conductivitat tèrmica a 20 °C de diferents materials.

EXEMPLE 9

El menjador d'un habitatge disposa d'una paret de dimensions 4 × 2 m amb un gruix $e = 14$ cm que dona totalment a l'exterior (paret de façana). El material de construcció utilitzat és el *gero* (maó foradat), que té una conductivitat tèrmica $\lambda_{\text{maó foradat}} = 0,76$ W/m °C. A l'hivern, la temperatura exterior és $T_e = 5$ °C i la interior $T_i = 22$ °C. Determina:

- a) La quantitat de calor Q que es perd per conducció a través de la paret en $t = 1$ h.
- b) La potència tèrmica P_t que hauria de tenir el sistema de calefacció per mantenir constant la temperatura a l'interior del menjador.

Resolució

- a) Les pèrdues d'energia en forma de calor per conducció a través de la paret es poden calcular amb la fórmula:

$$1 \text{ h} = 3600 \text{ s}; \quad 14 \text{ cm} = 0,14 \text{ m}$$

$$Q = \lambda \cdot \frac{A \cdot t \cdot \Delta T}{L} = 0,76 \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot 3600 (22-5)}{0,14} = 3,987 \cdot 10^6 \text{ J} = 3,987 \text{ MJ}$$

- b) Per mantenir constant la temperatura interior cal proporcionar la mateixa quantitat d'energia que es perd. La potència tèrmica és la relació entre la calor transmesa i el temps transcorregut:

$$P_t = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{3,987 \cdot 10^6 \text{ J}}{3600 \text{ s}} = 1,11 \cdot 10^3 \text{ W} = 1,11 \cdot \text{kW}$$

o, també:

$$P_t = \lambda \cdot \frac{A \cdot \Delta T}{L} = 0,76 \cdot \frac{4 \cdot 3 (22-5)}{0,14} = 1,11 \cdot 10^3 \text{ W} = 1,11 \cdot \text{kW}$$



EXEMPLE 10

A la mateixa paret de l'exemple anterior, s'instal·la una finestra amb unes dimensions totals $L_1 = 1,5$ m, $L_2 = 1$ m i que consta d'un marc de fusta de pi amb una amplària $x = 15$ cm i un gruix $e_m = 7$ cm, i d'un vidre amb gruix $e_v = 3$ mm. Quines són les pèrdues P_t de calor per conducció a través de la finestra (marc i vidre)?

Resolució

Per al marc de fusta:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{marc}} &= 0,14 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C} \\ A &= (1,5 \cdot 1) - [(1,5 - 2 \cdot 0,15) \cdot (1 - 2 \cdot 0,15)] = 0,66 \text{ m}^2 \\ \Delta T &= 22 - 5 = 17^\circ\text{C} \\ L &= e_m = 7 \text{ cm} = 0,07 \text{ m} \\ P_{t1} &= \lambda \frac{A \cdot \Delta T}{L} = 0,14 \frac{0,66 \cdot 17}{0,07} = 22,44 \text{ W} \end{aligned}$$

Per al vidre:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{vidre}} &= 0,95 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C} \\ A &= (1,5 - 2 \cdot 0,15) \cdot (1 - 2 \cdot 0,15) = 0,84 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

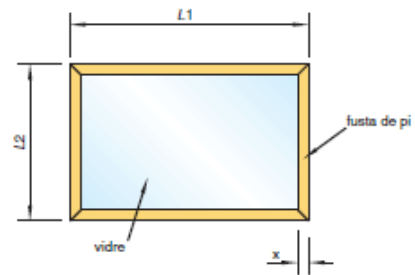


Fig. 6.25

$$\begin{aligned} \Delta T &= 22 - 5 = 17^\circ\text{C} \\ L &= e_v = 3 \text{ mm} = 0,003 \text{ m} \\ P_{t2} &= \lambda \frac{A \cdot \Delta T}{L} = 0,95 \frac{0,84 \cdot 17}{0,003} = 4522 \text{ W} \end{aligned}$$

Les pèrdues totals seran, doncs:

$$P_t = P_{t1} + P_{t2} = 22,44 + 4522 = 4544,44 \text{ W} = 4,54 \text{ kW}$$

Dilatació tèrmica



La **dilatació tèrmica** és el fenomen que provoca l'augment de les dimensions d'un material, especialment els metalls, quan augmenta la temperatura.

La dilatació tèrmica depèn:

- Del material (cada material té un grau diferent de dilatació).
- De l'increment de la temperatura (com més gran sigui l'increment, més gran serà la dilatació).

Segons quines siguin les dimensions de l'objecte sobre les quals es determina l'increment, es defineixen diferents tipus de dilatacions:

- Dilatació lineal –quan es considera una sola dimensió del cos (longitud).
- Dilatació superficial –quan es consideren dues dimensions (superfície).
- Dilatació cúbica –quan es consideren tres dimensions (volum).

La dilatació lineal es calcula mitjançant l'expressió:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \cdot \Delta T$$

On $\Delta L = L_f - L_0$: diferència entre la llargària final i la inicial.

L_0 : llargària inicial.

α : coeficient de dilatació lineal propi del material (en $^\circ\text{C}^{-1}$).

$\Delta T = T_f - T_0$: diferència entre la temperatura final i la inicial (en $^\circ\text{C}$).

Cada material té un valor de dilatació diferent i propi que està indicat a les taules de propietats dels materials mitjançant el coeficient de dilatació. Aquest valor indica l'increment de dimensions que experimenta el material per cada grau centígrad d'increment de la temperatura. A les taules sol aparèixer el coeficient de dilatació lineal vàlid per a temperatures compreses entre els 20°C i els 100°C .

Activitats

8. El menjador d'un habitatge disposa d'una paret de dimensions 5×3 m amb un gruix $e = 50$ cm que dona totalment a l'exterior (paret de façana). El material de construcció utilitzat es el *gero* – maó foradat – que té una conductivitat tèrmica $\lambda_{\text{mao}} = 0,76$ W/m °C. A l'hivern, la temperatura exterior es $T_e = 0$ °C i la interior $T_i = 20$ °C. Determina:
- La quantitat de calor Q que es perd per conducció a través de la paret en $t = 1$ h. Dona el resultat en J i en kWh.
 - La potència tèrmica P_t que hauria de tenir el sistema de calefacció per mantenir constant la temperatura a l'interior del menjador.
 - Torna a fer els càlculs suposant que la paret té un gruix de 20 cm en comptes de 50 cm. Des del punt de vista d'estalvi energètic, quina de les dues parets serà millor?
9. Una barra d'alumini te una llargària $L_0 = 5$ m quan esta a la temperatura $T_1 = 15$ °C. Quina serà la seva dilatació L quan la temperatura hagi pujat a $T_2 = 190$ °C? Quina serà la seva llargària L_f a aquesta nova temperatura?
10. Un cable de coure te una llargària $L_0 = 100$ m quan esta a la temperatura $T_1 = 5$ °C. Quina serà la seva dilatació L quan la temperatura hagi pujat a $T_2 = 42$ °C? Quina serà la seva llargària L_f a aquesta nova temperatura?

Material	Coefficient de dilatació lineal (°C ⁻¹)
Alumini	$23,6 \cdot 10^{-6}$
Coure	$16,5 \cdot 10^{-6}$
Niquel	$13,3 \cdot 10^{-6}$

Taula 6.5. Coeficient de dilatació lineal a 20 °C⁻¹ de diferents metalls.

La dilatació tèrmica dels materials s'aprofita, entre d'altres, per a la mesura de temperatures: es poden calcular els increments de temperatura a partir de la mesura dels increments de llargària d'un element, anomenat *sensor*, del qual es coneix el coeficient de dilatació.

Alguns elements de control automàtic de temperatura (termòstats, termòmetres bimetàl·lics, etc.) basen el seu funcionament en la dilatació tèrmica. També s'ha de tenir present la dilatació a l'hora de realitzar construccions amb elements metàl·lics com ara ponts, vies de ferrocarril, edificis, etc., ja que els canvis de temperatura els poden sotmetre a grans tensions i poden provocar una deformació perillosa o, fins i tot, el trencament de l'estructura.

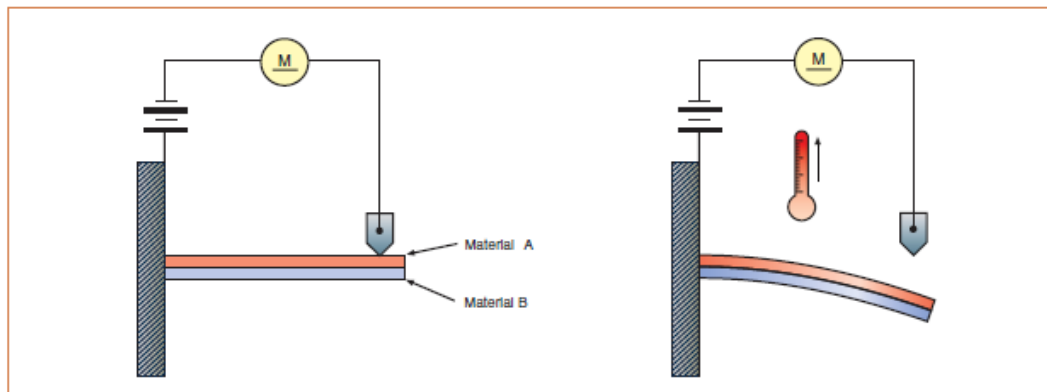


Fig. 6.27. Esquema d'una protecció tèrmica amb un parell bimetàl·lic. El material A té un coeficient de dilatació superior al del material B, i es corba per l'augment de temperatura, i interromp el circuit.

ACTIVITATS

- 18>** Un material sòlid està a 285 K i experimenta un increment de temperatura de 30 K. Contesta:
- Quin és l'increment de temperatura expressat en °C?
 - Quina és la temperatura final del material expressada en °C?
- 19>** Com justificaries el fet que el poliestirè (PS) tingui un valor de conductivitat tèrmica de $0,13 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$ i, en canvi, el poliestirè expandit (EPS) el tingui de $0,037 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$?
- 20>** L'acer de les vies del ferrocarril té un coeficient de dilatació tèrmica de $18,7 \cdot 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$. Si a la temperatura de 20 °C un carril té una llargària de 140 m, calcula la diferència de llargàries que es produeix entre un dia d'hivern (4 °C) i un altre d'estiu (28 °C).
- 21>** Quina potència tèrmica de refrigeració caldrà per mantenir la temperatura interior $T_i = 20 \text{ °C}$ de la sala d'estar d'un habitatge que disposa d'una paret de façana de $3 \times 2,5 \text{ m}$ i un gruix $e_p = 14 \text{ cm}$ feta de maó massís ($\lambda_{\text{maó massís}} = 0,87 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$) en la qual hi ha una porta de vidre amb un gruix $e_v = 5 \text{ mm}$, una amplària $L_1 = 70 \text{ cm}$ i una alçària $L_2 = 2 \text{ m}$, si la temperatura exterior és de $T_e = 28 \text{ °C}$.
- Quines accions es podrien dur a terme a l'habitatge per tal de reduir la potència tèrmica necessària?



Activitats complementàries

- 1>** Un tub rodó de coure (Cu) té una llargària $L_0 = 1,75 \text{ m}$, un diàmetre exterior $\varnothing_e = 22 \text{ mm}$ i un gruix $e = 1,5 \text{ mm}$. Determina:
- El pes G_{tub} del tub, la tensió normal σ quan li és aplicada una força $F = 2600 \text{ N}$.
 - El seu comportament en la situació de l'apartat anterior.
 - L'allargament ΔL que experimenta quan té la força F aplicada.
- 2>** Una barra de coure (Cu) de diàmetre $\varnothing = 60 \text{ mm}$ te una llargària $L_0 = 3 \text{ m}$ a temperatura ambient $T_a = 20 \text{ °C}$. Transcorregut un cert temps en les condicions de treball, sabem que tota la barra es troba a $T_1 = 300 \text{ °C}$. Quina serà la seva llargària L_f en aquestes noves condicions?
- 3>** Quin és el valor de la duresa d'un material si en un assaig HBW 5/250/20 la marca deixada sobre la peça té un diàmetre $\varnothing = 1,747 \text{ mm}$? De quin material podria tractar-se?
- 4>** La peça 5 és d'un aliatge lleuger, té unes dimensions $L_4 = L_5 = 200 \text{ mm}$; $e_3 = 30 \text{ mm}$ i una llargària $L = 1,3 \text{ m}$.
- Quin serà el seu pes G ?
 - Quina serà la tensió normal σ a què està sotmesa si li apliquem una força de tracció $F = 27500 \text{ N}$?
 - Quin comportament tindrà la peça en aquesta situació?
 - Quin serà el seu allargament L mentre li és aplicada la força F ?

- 5>** Les peces 4, 5 i 6 tenen una llargària $L = 2 \text{ m}$ i una secció com s'indica a la figura. Les dimensions de les seccions són: $L_4 = L_5 = 250 \text{ mm}$; $L_6 = 265 \text{ mm}$; $L_7 = 249 \text{ mm}$; $e_3 = 23 \text{ mm}$; $e_4 = e_5 = 12 \text{ mm}$; $D_1 = 158,6 \text{ mm}$; $D_2 = 160 \text{ mm}$. Indica:
- Si totes elles són del mateix material, quina és més adequada per a suportar esforços de tracció?
 - El pes G_i de cadascuna de les peces suposant que la 4 és de llautó, la 5 de níquel (Ni) i la 6 de titani (Ti).

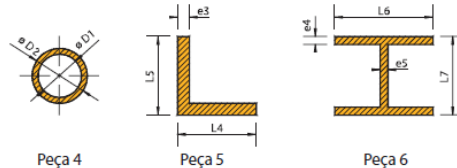


Fig. 3

- 6>** Els quadres (les estructures) de les bicicletes necessiten ser molt rígids. Si disposes de dos materials com l'alumini i el titani per fer quadres de bicicletes i el criteri prioritari és la rigidesa, quin dels dos triaries? Justifica la teva resposta.
- 7>** Tant el coure com l'alumini són uns bons conductors de l'electricitat. Per a la construcció d'una línia elèctrica es considera que l'elasticitat del material és molt important, per tal de garantir que suportarà grans tensions mecàniques sense patir deformacions permanents. Quin dels dos materials triaries? Justifica la teva resposta.