

UNITAT 6 Metal·lúrgia

6.4 El procés metal·lúrgic

De tots els materials utilitzats per l'ésser humà, uns dels més importants per al desenvolupament tecnològic han estat els metalls. Des que els primers pobladors de la Terra es van sentir atrets per la lluentor de petites mostres d'or nadiu, passant per la fabricació de petits objectes de bronze fins a la revolució industrial, amb una massiva utilització de l'acer per a la construcció d'eines i màquines de tota mena, els metalls han estat en tot moment imprescindibles. L'obtenció dels metalls no ha estat mai un procés fàcil. Només alguns metalls (or, plata, mercuri, platí i coure) es poden trobar en estat pur a la natura, tot i que en quantitats molt petites. Per poder obtenir els metalls, cal seguir un procés similar al següent:

- **Mineria:** extracció del mineral d'un jaciment adequat i la seva preparació, separant la part rica en metall d'altres que l'acompanyen.
- **Metal·lúrgia:** separació del metall dels altres elements amb els quals es troba combinat químicament.
- **Indústries metal·liques:** elaboració del metall obtingut per a l'obtenció d'articles útils.

El conjunt de processos que porten a l'obtenció dels metalls es coneix amb el nom de *metal·lúrgia*. Entre tots els metalls, el ferro i els seus derivats (l'acer i la fosa) han estat els que més importància històrica han tingut, i per aquest motiu la branca de la metal·lúrgia que es dedica a la seva obtenció es coneix amb el nom de *siderúrgia*, paraula que deriva d'un dels minerals de ferro més utilitzats, la *siderita*.

Actualment, també es poden obtenir metalls a partir del reciclatge de productes usats. Aquest és el cas de l'acer obtingut a partir de les carrosseries dels automòbils; de l'or, a partir dels circuits integrats dels aparells electrònics; del coure obtingut dels cables elèctrics vells; de la plata, a partir de les plaques de radiografies usades, etc.

La utilització d'aquests recursos sovint és més econòmica que la utilització de minerals.

Els minerals

Els metalls es troben als minerals combinats químicament amb altres elements. Els compostos més comuns que formen són:

Compost	Composició	Exemple
Òxids	Metall + oxigen	Hematites → Fe ₂ O ₃
Sulfurs	Metall + sofre	Galena → PbS
Carbonats	Metall + carboni + oxigen	Magnesita → MgCO ₃

Taula 7.1 Compostos més comuns que formen els minerals.

Per separar el metall dels altres elements amb què es combina, cal utilitzar processos químics amb aplicació d'elevades temperatures en forns adequats. En el cas dels òxids, per exemple, cal un element que sigui capaç de combinar-se amb l'oxigen del mineral per tal d'aïllar el metall. Aquesta reacció química es coneix amb el nom de **reducció** i és contrària a l'**oxidació** (combinació amb l'oxigen) que genera un òxid.

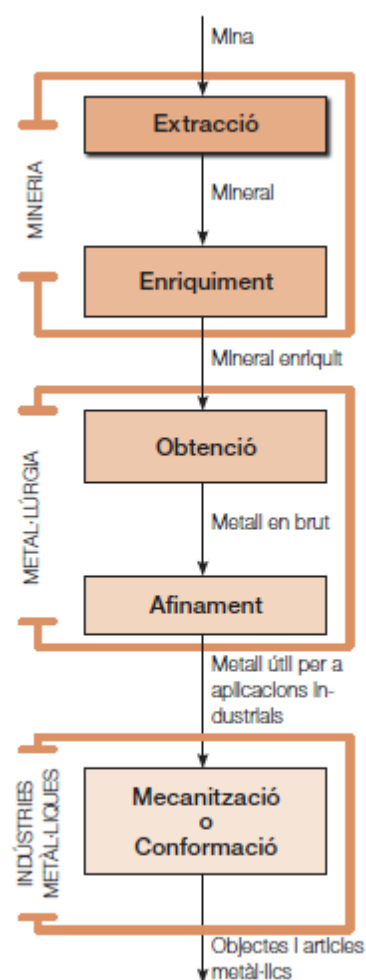
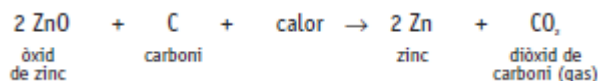


Fig. 7.1. El procés metal·lúrgic.

PROPIETATS I ASSAIGS

Des de l'antiguitat, el carbó (primerament vegetal i posteriorment mineral) ha estat utilitzat per a la reducció dels metalls, ja que presenta una gran capacitat de combinació amb l'oxigen i, a més, la seva combustió aporta l'energia calorífica necessària per elevar la temperatura del forn. Un exemple de reducció és la combinació de l'òxid de zinc amb carbó:



Els minerals contenen el metall que busquem combinat amb altres elements químics, però també estan barrejats amb productes que no el contenen (argiles, silicats...).



Un mineral està format per una part aprofitable i rica en el metall buscat, anomenada **mena**, i per una altra no aprofitable perquè és molt pobre en metall, anomenada **ganga**.

El primer procés que cal aplicar després de l'extracció s'anomena **enriquiment**, i consisteix a separar el màxim possible aquests dos components.

No sempre és econòmicament rendible obtenir un metall a partir d'un mineral amb qualsevol valor de riquesa. A la taula 7.2 podem trobar els valors aproximats de riquesa de certs minerals a partir dels quals és actualment rendible l'explotació.

Val a dir que aquests valors poden variar molt per moltes raons (estratègiques, socials...) no sempre de caire tecnològic.

Ferro	20%
Níquel	6%
Coure	1%
Or	0,0005%

Taula 7.2 Valors de riquesa d'alguns minerals a partir dels quals n'és rendible l'explotació.

La riquesa d'un mineral s'expressa en tant per cent (%) en massa de contingut de metall pur de les seves menes. Per exemple, quan es diu que un jaciment conté menes de níquel amb el 8% de riquesa, s'ha d'entendre que per cada 100 tones de mineral enriquit que s'extreguin, només s'obtidran 8 tones de níquel pur.

Aliatges

Els metalls es caracteritzen, en general, per tenir una elevada conductivitat (tant elèctrica com tèrmica), una gran resistència mecànica, ser opacs, lluent i fondre's a temperatures elevades. Aquestes propietats fan que siguin els materials més utilitzats a la indústria. No obstant això, poques vegades es fan servir en estat pur; normalment es mesclen amb altres metalls o elements no metàl·lics i formen els *aliatges*.



Un **aliatge** és un producte obtingut a partir de la unió de dos o més **elements químics** (com a mínim un dels dos ha de ser un metall) i que, un cop format, presenta les característiques pròpies d'un metall.

La plasticitat dels metalls purs és deguda a la presència de dislocacions en la seva estructura cristal·lina, que afavoreixen el lliscament de capes i, per tant, la deformació plàstica. A la indústria, es necessiten metalls durs i resistents als esforços mecànics. Aquestes propietats es poden aconseguir en un metall pur colpejant-lo repetidament, com ho feien els artesans a les èpoques antigues i com, encara avui dia, ho fan amb les seves eines de tall els camperols d'algunes societats agrícoles poc desenvolupades. També es poden aconseguir metalls durs i resistents formant aliatges.

Els elements de l'aliatge modifiquen l'estructura cristal·lina del metall pur dificultant la mobilitat de les dislocacions. D'aquesta manera, els aliatges presenten una menor plasticitat i un augment de la duresa i la resistència mecànica. D'altra banda, la modificació de l'estructura interna perjudica la mobilitat dels electrons lliures de l'enllaç metàl·lic, la qual cosa implica una menor conductivitat (elèctrica i tèrmica) dels aliatges en comparació amb els metalls purs.

Els diferents aliatges es distingeixen pels components que els formen i s'identifiquen per la seva composició (proporcions, normalment expressades en percentatge (%) en massa dels elements que intervenen). Alguns aliatges també reben noms propis.

PROPIETATS I ASSAIGS

Composició de l'aliatge	Denominació específica
Fe (ferro) + (0,1-1,76%) C (carboni)	Acer
Cu (coure) + Zn (zinc)	Llautó
Cu (coure) + Sn (estany)	Bronze
Cu (coure) + Ni (níquel)	Cuproníquel
Cu (coure) + Ni (níquel) + Zn (zinc)	Alpaca
55% Cu (coure) + 45% Ni (níquel)	Constantà
64% Fe (ferro) + 36% Ni (níquel)	Invar
Al (alumini) + Cu (coure) + Mg (magnesi) + Mn (manganès) + Si (silici)	Duralumini
94,95% Zn (zinc) + 4% Al (alumini) + 1% Cu (coure) + 0,05% Mg (magnesi)	Zamak

Taula 7.3. Exemples d'aliatges.

Quan formem aliatges introduint elements d'aliatge en un metall pur, les seves propietats varien. Els metalls purs acostumen a ser dúctils i amb altes conductivitats tèrmica i elèctrica. Quan els aliem amb altres elements, normalment augmenta la duresa, baixen les conductivitats (tèrmica i elèctrica) i varia la temperatura de fusió. Alguns cops també augmenta la fragilitat.

EXEMPLE 1



El material amb què s'ha elaborat un objecte de bronze té la composició següent: 91,8% Cu (coure), 8% Sn (estany), 0,2% P (fòsfor). Determina:

- La quantitat de coure, m_{Cu} , que conté si l'objecte té una massa $m = 3$ kg.
- La quantitat m_P de fòsfor (P) necessari per obtenir $m_{aliatge} = 1300$ kg d'aliatge.
- La quantitat d'aliatge $m_{aliatge}$ que es pot preparar amb $m_{Sn} = 6$ kg d'estany (Sn).

Resolució

Com que l'aliatge conté un 91,8% de coure (Cu), l'objecte tindrà la mateixa proporció de coure:

$$m_{Cu} = 3 \text{ kg} \cdot \frac{91,8}{100} = 2,754 \text{ kg de Cu}$$

En 1300 kg d'aliatge hi ha un 0,2% de fòsfor (P):

$$m_P = 1300 \cdot \frac{0,2}{100} = 2,6 \text{ kg de P}$$

El 8% de la massa total de l'aliatge, $m_{aliatge}$, correspondrà a la massa d'estany m_{Sn} :

$$m_{aliatge} \cdot \frac{8}{100} = m_{Sn}$$

$$m_{aliatge} = \frac{m_{Sn}}{8/100} = \frac{6}{8/100} = 75 \text{ kg d'aliatge}$$

Activitats

- El material amb què s'ha elaborat la peça d'un avió té la composició següent: 95% alumini, 4% coure, 0,5% magnesi i 0,5% manganès (duralumini). Determina:
 - La quantitat de coure m_{Cu} que conté si l'objecte té una massa $m = 12,4$ kg.
 - La quantitat m_{Mg} de Mg (magnesi) necessari per obtenir $m_{aliatge} = 12\,420$ kg d'aliatge.
 - La quantitat d'aliatge $m_{aliatge}$ que es pot preparar amb $m_{Al} = 10\,000$ kg d'alumini.

Solidificació dels aliatges

Els metalls purs tenen un valor fix de temperatura de fusió: quan es refreda un metall pur i passa de la fase líquida a la fase sòlida, la temperatura es manté constant mentre va solidificant-lo. Un cop ha solidificat tota la massa, la temperatura torna a disminuir progressivament fins arribar a la de l'ambient.

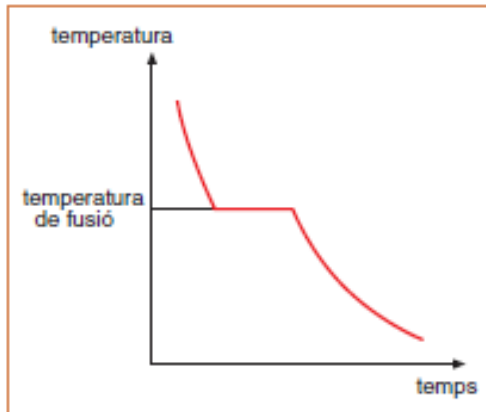


Fig. 7.9. Corba de solidificació d'un metall pur.

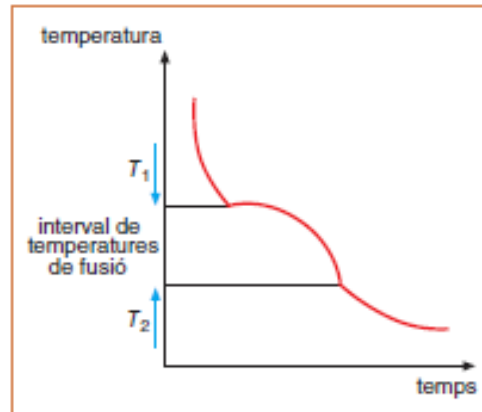


Fig. 7.10. Corba de solidificació d'un aliatge binari.

La temperatura de fusió dels aliatges, en canvi, no és fixa: depèn de les proporcions de cada element d'aliatge i no té un sol valor, sinó que es representa mitjançant un interval.

Per il·lustrar el procés de fusió i solidificació dels aliatges binaris (aquells que estan formats per dos elements), s'utilitza el diagrama d'equilibri.

En aquest diagrama es pot definir qualsevol punt a partir d'un valor de temperatura i d'una determinada proporció dels components de la mescla. Segons on estigui situat el punt, es poden distingir tres àrees: una àrea de fase líquida, una de fase líquida + sòlida i una de fase sòlida.

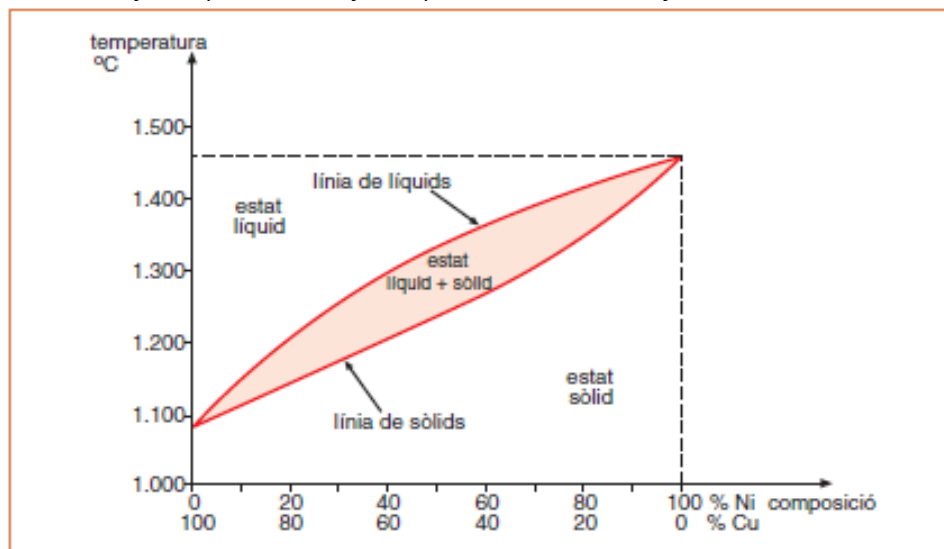


Fig. 7.11. Diagrama d'equilibri de l'aliatge níquel + coure.

- **Àrea de fase líquida:** Per damunt de la línia de líquid, l'aliatge sempre es trobarà en fase líquida.
- **Àrea de fase líquida + sòlida:** Per a qualsevol punt situat en aquesta àrea, l'aliatge sempre contindrà una part de la massa en fase sòlida i l'altra part en fase líquida.
- **Àrea de fase sòlida:** Per sota de la línia de sòlid, l'aliatge sempre es trobarà en fase sòlida.

Per a una temperatura determinada compresa entre els valors màxim i mínim del diagrama, es poden obtenir aliatges totalment en fase sòlida, en fase sòlida + líquida i en fase totalment líquida segons quina sigui la proporció dels seus components. De la mateixa manera, per a una determinada proporció de la mescla, es pot definir una temperatura per sota de la qual tot l'aliatge es trobarà en fase sòlida, un

PROPIETATS I ASSAIGS

interval de temperatures en què l'aliatge es trobarà en dues fases (sòlida + líquida) i una temperatura a partir de la qual tot l'aliatge es trobarà en fase líquida.

Hi ha aliatges que tenen un diagrama d'equilibri diferent de l'anterior. Es tracta d'aliatges en què els components són totalment solubles en estat líquid i insolubles en estat sòlid.

Aquests diagrames presenten un *mínim* a la línia de líquids. Aquest valor mínim sempre coincideix amb la línia de sòlids. La proporció que correspon a aquest punt és molt important i s'anomena **proporció eutèctica**. Paral·lelament el punt s'anomena **punt eutèctic** i la temperatura que li correspon es coneix també per **temperatura eutèctica**.

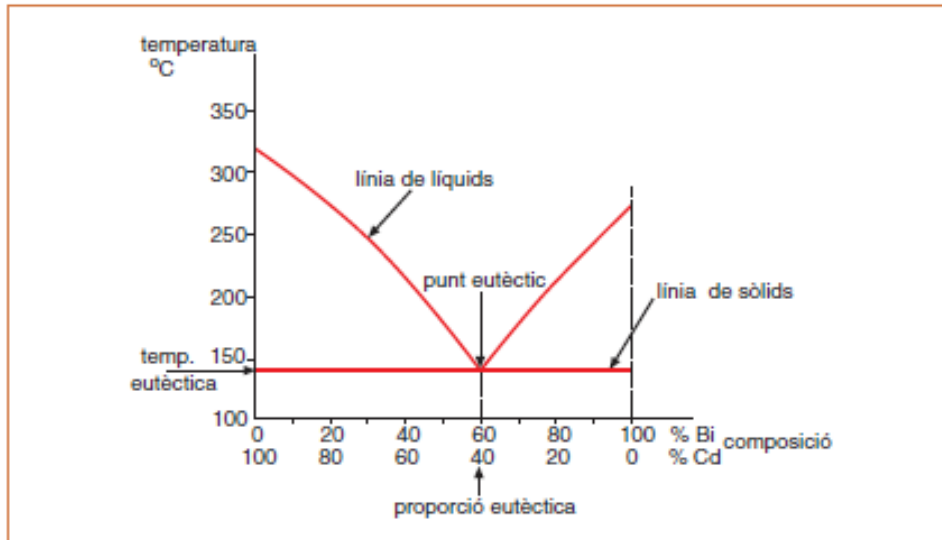


Fig. 7.12. Diagrama d'equilibri d'un aliatge amb proporció eutèctica format per cadmi i bismut.

Els aliatges de proporcions eutèctiques són molt importants perquè:

- Se solidifiquen a una temperatura constant (en lloc de fer-ho en un interval).
- La temperatura de solidificació (o de fusió) és la més baixa de totes les possibles amb els components que formen la mescla. És més baixa que la més baixa dels elements purs que formen l'aliatge. Per exemple, a la gràfica de la figura podem observar que l'aliatge de composició eutèctica de cadmi i bismut es fon a uns 140 °C, mentre que les temperatures de fusió dels dos elements en estat pur són de 271 °C per al bismut i de 321 °C per al cadmi.
- Són mesclades finíssimes i íntimes de cristalls purs dels elements d'aliatge i són ideals per fabricar peces per a emmotllament perquè omplen millor els motlles i donen peces més homogènies.

EXEMPLE 2

Tenim un aliatge de coure i níquel en el qual la proporció dels components és 80% de coure (Cu) i 20% de níquel (Ni) i volem determinar:

- a) A quina temperatura caldrà portar-lo perquè comenci a fondre?
- b) A partir de quina temperatura estarà totalment fos?

Resolució

Utilitzarem el diagrama d'equilibri de l'aliatge níquel + coure:

- a) A l'eix horitzontal situem el punt corresponent a la composició (80% Cu + 20% Ni), i a partir d'aquest punt tirarem una línia vertical fins a interseccionar amb la línia de sòlids. A partir de la intersecció tirarem una línia horitzontal fins a l'eix vertical i llegirem a la seva escala el valor de la temperatura: 1140 °C.
- b) Prolongarem la línia vertical traçada anteriorment fins a trobar la línia de líquids. A partir de la intersecció tirarem una línia horitzontal fins a l'eix vertical i llegirem, a la seva escala, el valor de la temperatura: 1200 °C.

PROPIETATS I ASSAIGS



EXEMPLE 3

Volem determinar la composició d'un aliatge bismut (Bi) i cadmi (Cd) que:

- Es comença a solidificar als 250°C.
- Es comença a fondre als 140°C.
- Està totalment líquid a partir dels 300°C.
- Es fon totalment als 140°C.

Resolució

Utilitzarem el diagrama d'equilibri de l'aliatge bismut + cadmi:

- A l'eix vertical situarem el punt corresponent a la temperatura (250°C) i, a partir d'aquest punt, tirarem una línia horitzontal fins a interseccionar amb la línia de líquids. A partir de la intersecció tirarem una línia vertical fins a l'eix horitzontal i llegirem, a la seva escala, el valor de la composició: 70% Cd + 30% Bi.
- Tots els aliatges Bi + Cd comencen a fondre's a la mateixa temperatura (140°C). Per tant, qualsevol composició és vàlida.
- El punt de la línia de líquids que correspon a 300°C ens indica una composició de 90% Cd + 10% Bi. Tots els aliatges que continguin més d'un 10% de Bi (o menys d'un 90% de Cd) compliran la condició.
- La fusió a una sola temperatura i no pas en un interval només pot correspondre a la proporció eutèctica. Per tant, la composició que es fon totalment a 140°C és 60% Bi + 40% Cd.

Els productes metal·lúrgics

Actualment la indústria disposa d'una gran varietat de productes metal·lúrgics amb propietats molt diverses. De tots aquests materials, que poden ser metalls purs o aliatges, els més utilitzats són els que es mencionen a la taula.

Productes metal·lúrgics	Fèrrics	Ferros		
		Acers	No aliats (al carboni)	
		Foses	Aliats	
	No fèrrics	Purs	Coure (Cu)	
			Alumini (Al)	
			Plom (Pb)	
			Estany (Sn)	
			Zinc (Zn)	
			Níquel (Ni)	
		Aliatges	Crom (Cr)	
			Llautons	
			Bronzes	
			Aliatges lleugers (a base d'alumini)	
			Aliatges ultralleugers (a base de magnesi)	
			Altres aliatges (a base de titani i níquel)	

Taula 7.4. Productes metal·lúrgics més utilitzats.

El ferro i el seus aliatges

En llenguatge col·loquial anomenem ferro una gran varietat de productes molt diferents: ferro pur, acer, fosa o ferro colat, etc. En realitat, el *ferro pur* és un element químic que no té gaires aplicacions industrials, a causa de la baixa resistència mecànica i de la gran tendència a la corrosió.

Les característiques del ferro pur són:

- Punt de fusió: 1 539 °C.
- Color: blanc grisós.
- Densitat: 7,87 g/cm³.
- Propietats mecàniques: dúctil i mal·leable.
- Altres propietats: bon conductor elèctric i fàcilment magnetitzable.



Industrialment, s'anomena **ferro pur** l'aliatge ferro-carboni quan el contingut d'aquest últim és inferior al 0,03%. Aquest material té alguna aplicació industrial que aprofita les seves propietats magnètiques, com ara la fabricació de xapes per a nuclis de transformadors elèctrics

La solidificació del ferro

Segons com es distribueixen els àtoms d'un metall quan es troba en estat sòlid, donen lloc a diferents estructures de la seva xarxa cristal·lina i, per tant, a materials amb diferents propietats. Les diferents estructures cristal·lines en què pot solidificar un metall pur s'anomenen **varietats al·lotròpiques** i, en el cas del ferro, es coneixen amb les quatre primeres lletres de l'alfabet grec:

α (alfa), β (beta), γ (gamma) i δ (delta).

Si fonem una massa de ferro pur fins a aconseguir que es trobi en *fase líquida*, i la deixem refredar molt lentament, podrem observar el procés següent:

- Als 1539°C la temperatura es manté constant mentre tota la massa passa a la fase sòlida. L'estructura del ferro sòlid, a partir d'aquest moment, correspon a la **varietat delta (δ)**.
- La temperatura continua baixant lentament fins que als 1390°C es torna a mantenir constant mentre tota la massa canvia la seva estructura cristal·lina i passa a la **varietat gamma (γ)**.
- Continua després el descens de temperatura fins arribar als 900 °C. Aquesta temperatura es manté constant mentre la massa canvia a la **varietat beta (β)**.
- Finalment, hi ha un descens de temperatura fins als 750 °C, quan l'estructura torna a canviar i s'obté la **varietat alfa (α)**, la qual es conserva fins que s'arriba a la temperatura ambient.

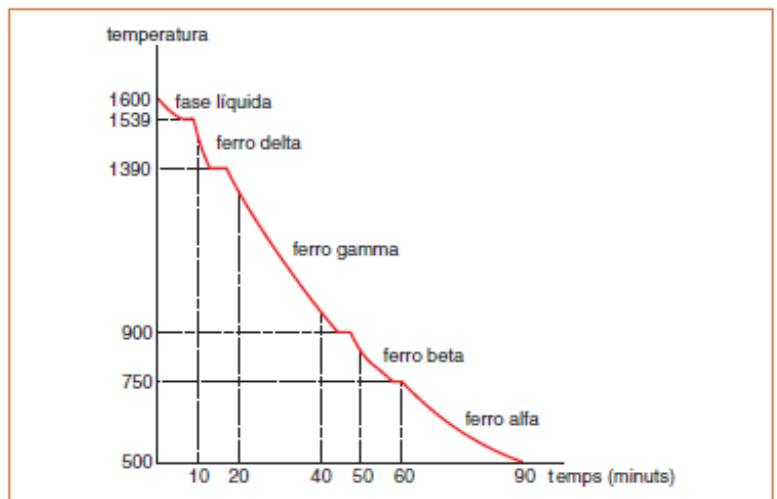


Fig. 7.13. Diaarama de solidificació del ferro pur.

Algunes de les propietats de les diferents varietats al·lotròpiques del ferro són les següents:

Varietat	Magnetisme	Solubilitat del carboni	Interval de temperatures
α (alfa)	Magnètica	Molt baixa	Fins a 750 °C
β (beta)	Poc magnètica	Molt baixa	De 750 a 900 °C
γ (gamma)	No magnètica	Alta	De 900 a 1390 °C
δ (delta)	Poc magnètica	Baixa	De 1390 a 1539 °C

Taula 7.5. Propietats de les varietats al·lotròpiques del ferro.

varietat alfa. Ara bé, si volem obtenir ferro beta a temperatura ambient, haurem de refredar-lo ràpidament quan es trobi a una temperatura compresa entre els 900 i els 750 °C. Per obtenir les altres varietats cal seguir el mateix procés de refredament ràpid a partir de l'interval de temperatures corresponent.

PROPIETATS I ASSAIGS

Els aliatges ferro-carboni

En els aliatges de ferro amb carboni, el ferro pot trobar-se en alguna de les seves quatre formes al·lotròpiques (α , β , γ o δ) i el carboni pot adoptar diverses formes: carboni pur, carbur de ferro (Fe_3C), grafit, etc. Les diferents combinacions d'aquests factors, juntament amb la velocitat de refredament en el procés de solidificació i la proporció total de carboni de l'aliatge donen lloc al que s'anomenen **constituents dels aliatges ferro-carboni**.

Es coneixen fins a onze constituents diferents, dels quals els més importants són:

Constituent	Forma del ferro	Màxim de carboni que admet (%)	Duresa (HBW)	Resistència al trencament σ_r (MPa)	Allargament ϵ (%)	Magnetisme
Ferrita	Ferro alfa	0,02	90	275	37	Magnètica
Cementita	Carbur de ferro (CFe_3)	6,67	700	Fràgil		Magnètica (fins a 220 °C)
Perlita	+ 86,5% ferrita +13,5% cementita		200	785	15	
Austenita	Ferro gamma	1,76	300	980	30	No magnètica
Martensita	Ferro alfa	0,89	de 495 a 745	de 1700 a 2500	de 2,5 a 0,5	Magnètica

Taula 7.6. Propietats dels principals constituents dels aliatges ferro-carboni.

De la mateixa manera que les diferents estructures cristal·lines provoquen diferents propietats en els sòlids, els constituents aporten diferents propietats als aliatges fèrrics. Ara bé, els aliatges fèrrics no són, en general, totalment homogenis. Solen contenir els constituents en diferents proporcions, cosa que provoca una gran variabilitat de les seves propietats. Per exemple, un aliatge ric en ferrita serà tou, poc resistent, dúctil i magnètic; en canvi, si augmenta la proporció de martensita, es mantindrà magnètic però augmentarà considerablement la duresa i la resistència i es tornarà fràgil.

Tots els productes siderúrgics són aliatges de ferro i carboni i, per tant, es pot observar la seva formació i deduir-ne les propietats a partir del diagrama d'equilibri ferro-carboni.

La utilitat d'aquest diagrama consisteix en la predicció del tipus de constituent majoritari que tindrà l'aliatge segons la temperatura i del contingut (%) de carboni: un cop coneixem els constituents de l'aliatge, podrem predir les propietats que tindrà. De la mateixa manera, a partir del diagrama també podem deduir el procés que cal aplicar per obtenir un aliatge amb unes determinades propietats.

Al diagrama es poden apreciar diferents zones:

- **Líquid:** a la zona superior tota la massa es troba en la fase líquida.
- **Líquid + austenita:** part de la massa es troba en fase líquida i part en fase sòlida en forma d'austenita.
- **Líquid + cementita:** part de la massa es troba en fase líquida i part en fase sòlida en forma de cementita.
- La **resta de zones:** tota la massa es troba en fase sòlida en formes diferents segons s'indica al diagrama.

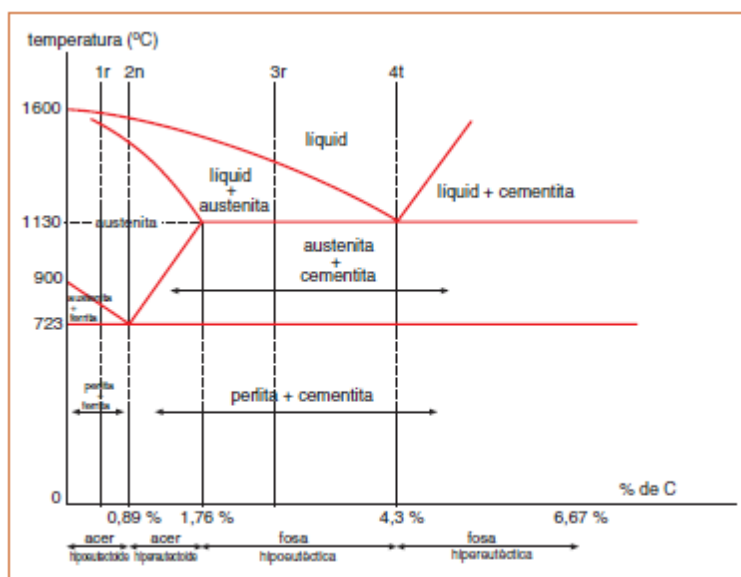


Fig. 7.14. Diagrama d'equilibri ferro-carboni.

PROPIETATS I ASSAIGS

Els productes siderúrgics: acers i foses

La veritable utilitat del ferro comença quan és aliat amb el carboni i origina els *acers* i les *foses*:

Aliatges ferro + carboni	Acers	No aliats (al carboni)	
		Aliats	
	Foses	Blanca	
		Grisa	Laminar
			Esferoïdal (dúctil)
Nodular (mal·leable)			

Taula 7.7. Aliatges de ferro i carboni.



Es consideren **acers** els aliats de ferro amb un contingut de carboni comprès entre 0,1 i 1,76%, i es consideren **foses** quan el contingut de carboni oscil·la entre 1,76 i 6,67% i, a més, contenen silici. A la pràctica, el contingut de carboni de les foses oscil·la entre el 3 i el 4,5%.

Per donar forma als metalls es poden fer servir diversos procediments. Dos dels més importants són la forja i l'emmotllament. La **forja** consisteix a situar una massa sòlida de metall calent entre les dues meitats d'un motlle o matriu i aplicar-hi esforços de compressió fins que adopta la seva forma. L'**emmotllament**, en canvi, consisteix a introduir el metall en fase líquida a l'interior d'un motlle tancat i desemmotllar-lo un cop s'ha solidificat.

En general, es pot dir que l'acer és forjable i fon a temperatures elevades (> 1400°C). En canvi, la fosa no és forjable, fon a temperatures més baixes (> 1130°C) i es pot emmotllar molt bé perquè té molta facilitat per adaptar-se a les formes complicades d'un motlle quan és introduïda en fase líquida.

A més del carboni, els aliats de ferro poden contenir altres elements químics en diferents proporcions. Alguns (crom, vanadi, níquel...) s'afegeixen voluntàriament en el procés d'obtenció per tal de millorar les seves propietats (és el cas dels acers aliats) i es coneixen amb el nom d'**elements d'aliatge**. Uns altres elements químics apareixen en el procés d'obtenció de manera involuntària (antimoni, arsènic, estany, hidrogen, oxigen) i provoquen un empitjorament de les propietats. En aquest cas s'anomenen **impureses**.

Les aplicacions dels acers depenen, en general, del seu contingut en carboni. Es pot fer una classificació molt simple dels acers segons el seu contingut en carboni (taula 7.8).

Contingut de carboni	% de carboni	Duresa	Resistència	Ductilitat	Tenacitat	Aplicacions
Baix	< 0,3	Tous	Baixa	Alta	Alta	Carrosseries d'automòbils, bigues, tubs, làmines per a envasos...
Mitjà	de 0,3 a 0,6	Durs	Mitjana	Mitjana	Mitjana	Rodes i carrils de trens, engranatges, cigonyals...
Alt	de 0,6 a 1,4	Més durs	Alta	Baixa	Baixa	Eines de tall, molles, matrius i motlles...

Taula 7.8. Propietats i aplicacions dels acers segons el seu contingut de carboni.

Els acers amb baix contingut en carboni no són aptes per a tractaments tèrmics com el tremp, però sí que admeten la cementació. Són barats i fàcils de soldar i de mecanitzar amb eines de tall (torn, fresa, trepant...). Els acers amb continguts mitjà i alt de carboni són adequats per als tractaments tèrmics i per a aquelles aplicacions que requereixen molta resistència mecànica.

Les foses contenen el carboni en forma de carbur de ferro, Fe₃C, (**fosa blanca**) o en forma de grafit (**fosa grisa**). Segons quina sigui la forma del grafit quan s'observa al microscopi, la fosa grisa pot ser:

- **Laminar**: en forma de làmines.
- **Nodular**: en forma de ram o de raïm.
- **Esferoïdal**: en forma d'esferes.

PROPIETATS I ASSAIGS

La fosa gris nodular també es coneix com a **fosa mal-leable** i la gris esferoïdal per **fosa dúctil**. Els diversos tipus de foses presenten diferents propietats i aplicacions.

Tipus de fosa	Propietats	Aplicacions
Blanca	Molt fràgil, molt dura i molt resistent al desgast. No es pot mecanitzar i no té ductilitat. Es forma quan es produeix un refredament ràpid.	Cilindres dels trens de laminatge de l'acer.
Grisa laminar	Fràgil, poc resistent a la tracció però molt resistent a la compressió. Molt resistent al desgast. Bon esmorteïment de les vibracions. Molt barata.	Bancades i estructures de màquines.
Grisa mal-leable (nodular)	Resistent, dúctil i mal-leable.	
Grisa dúctil (esferoïdal)	Resistent, més dúctil. Propietats que s'acosten a les de l'acer.	Vàlvules, cossos de bombes, cigonyals, pistons i elements de màquines en general.

Taula 7.9. Propietats i aplicacions dels diferents tipus de foses.

ACTIVITATS

- 1> En una mina del Matto Grosso a Brasil es troba hematites amb una riquesa del 69,94% en ferro (Fe). Quina quantitat de mineral, m_{min} , cal extreure per aconseguir $m_{\text{Fe}} = 1$ t de ferro?
- 2> Un aliatge d'alumini conté un 2,5% de magnesi (Mg) i un 0,25% de crom (Cr). Quina quantitat d'alumini pur (Al) cal per fer 1000 kg d'aliatge?
PAU
 - a) 957,5 kg
 - b) 975 kg
 - c) 972,5 kg
 - d) 977,5 kg
- 3> L'invar és un aliatge que conté 64% de ferro (Fe) i 36% de níquel (Ni). Quina quantitat d'invar es pot obtenir amb 180 kg de níquel?
PAU
 - a) 320 kg
 - b) 500 kg
 - c) 900 kg
 - d) 281,3 kg
- 4> A partir del diagrama d'equilibri de l'aliatge de Ni + Cu, contesta les qüestions següents:
 - a) Quina és la temperatura de fusió del coure pur? I la del níquel pur?
 - b) A quina temperatura comença a fondre's l'aliatge de 60% Cu + 40% Ni? A quina temperatura està totalment en estat líquid?
 - c) En quina fase es troba un aliatge de 70% Ni + 30% Cu a la temperatura de 1400 °C?
 - d) Quina hauria de ser la proporció de l'aliatge per assegurar-nos que no comença a fondre's fins als 1230 °C?
- 5> Si s'escalfa una mostra de ferro pur fins als 1000 °C i després es refreda ràpidament:
 - a) Quin tipus de ferro s'obté?
 - b) I si es refreda molt lentament?
 - c) Si s'ha de fer servir el ferro obtingut per a la fabricació de xapa magnètica, quin dels dos és adequat?
- 6> L'aliatge de plom (Pb) i estany (Sn) s'utilitza molt en soldadura. Un d'aquests aliatges, amb les proporcions 61,9% Sn + 38,1% Pb es fon a una única temperatura (183 °C).
 - a) Investiga els punts de fusió dels components de l'aliatge en estat pur.
 - b) Compara els valors obtinguts al punt anterior i digues de quin tipus d'aliatge es tracta.
- 7> Defineix el concepte d'al·lotropia i estableix les diferències que existeixen en siderúrgia entre al·lotropia i constituent.
- 8> Quins són els constituents principals del ferro amb l'1% de carboni:
 - a) A 1500 °C?
 - b) A 750 °C?
 - c) A 700 °C?

6.5 Siderúrgia

La humanitat ha fet servir el ferro des de fa milers d'anys. Inicialment el seu ús era anecdòtic, perquè treballar el ferro és més complicat i requereix més temperatura que el treball del coure i del bronze, però a mesura que es van anar perfeccionant els forns on es tractava el mineral, el seu ús es va generalitzar. Malgrat tot, els forns i el carbó vegetal que es feien servir fins al segle XIX no aconseguien prou temperatura per fondre el ferro: el que s'obtenia era una massa esponjosa, plena d'impureses que s'havien d'extreure del ferro mitjançant cops repetitius. No va ser fins a la utilització del carbó mineral (concretament el carbó de coc) i la invenció de l'alt forn que es va aconseguir fondre el ferro i obtenir acer a partir d'ell.

PROPIETATS I ASSAIGS

El ferro és, després de l'alumini, el metall més abundant a l'escorça terrestre. Es troba en els minerals formant diferents compostos químics:

Connecta't

<http://aula.elmundo.es/aula/laminas/lamina1078427174.pdf>

Document pdf sobre els alts forns, amb il·lustracions.



Òxids	Hematites (també es troba en l'oligist i la limonita)	Fe_2O_3
	Magnetita	Fe_3O_4
Carbonats	Siderita	$FeCO_3$
Sulfurs	Pirita (també es troba en la marcassita)	FeS_2

Taula 7.10. Minerals de ferro.

Aquests compostos que formen el mineral també es troben barrejats amb altres elements, com ara la sílice, que caldrà eliminar en el procés d'obtenció. Avui, els minerals més utilitzats per a la siderúrgia són els formats per òxids; i més de la meitat (el 65%) d'aquests recursos minerals es troben al conjunt de països formats per l'antiga URSS, Xina, Brasil i Austràlia.

Com que el ferro es troba en el mineral en forma oxidada (combinat amb oxigen), en el procés d'obtenció del ferro haurem de separar l'oxigen del metall. Aquesta operació s'anomena **reducció del metall**. El principal element reductor en siderúrgia és el carboni, que té molta afinitat per l'oxigen, és a dir, té molta tendència a combinar-s'hi. El carboni també fa possible la formació d'aliatges amb el ferro i, en forma de carbó, és un bon combustible que aporta una gran quantitat d'energia calorífica necessària per a la fusió del ferro.

L'obtenció de l'acer i les foses és un procés que consta de dues fases. La primera comença amb l'obtenció del ferro colat a l'alt forn. El ferro colat conté un alt contingut de carboni i impureses, com el sofre o el fòsfor, que cal eliminar. Per això, en una segona fase, si el que es vol és obtenir foses, el ferro colat de l'alt forn es porta a uns altres forns, com ara els de cubilot, on s'afina fins obtenir la fosa desitjada. Després s'abocarà en motlles per obtenir les peces desitjades.

En canvi, si es vol obtenir acer, en la segona fase el ferro colat en estat encara líquid es porta als convertidors, on s'eliminen part del carboni i les impureses fins obtenir l'acer desitjat. Llavors, en un procés, generalment de colada contínua i un tren de laminatge, se n'obtingran diverses formes comercials.

Obtenció del ferro colat: L'alt forn

L'alt forn està format per una estructura d'acer recoberta interiorment per material ceràmic refractari. Té forma de dos troncs de con units per la part més ampla, amb uns 30 m d'alçària i uns 6 m de diàmetre màxim. Per la part superior s'introdueixen les matèries primeres i s'extreuen els gasos. Per la part inferior s'introdueix aire calent a pressió, que fa possible la combustió del carbó, i es recullen el ferro colat i les escòries.

Les matèries primeres que intervenen en l'alt forn són el mineral de ferro concentrat, el carbó de coc i la pedra calcària.

- **Mineral de ferro:** aporta el ferro oxidat que, un cop reduït, obtindrem en forma de ferro colat. L'oxigen del mineral es combinarà amb el carboni i sortirà per la part superior del forn en forma de diòxid de carboni (CO_2) gasós. El mineral també aporta impureses formades per sílice, que obtindrem separades del ferro en forma d'escòria.
- **Carbó de coc:** el carbó vegetal no té prou poder calorífic per aconseguir les altes temperatures necessàries per obtenir ferro líquid. Per aquest motiu s'utilitza el carbó de coc obtingut a partir de la destil·lació de l'hulla (un tipus de carbó mineral). El carbó de coc actua com a combustible per obtenir elevades temperatures i aporta el carboni necessari per a la reducció del ferro.
- **Pedra calcària** ($CaCO_3$): es combina amb el silici del mineral i forma el compost $CaSiO_3$, que és el principal component de l'escòria. Aquest compost sura damunt del ferro fos perquè té una

PROPIETATS I ASSAIGS

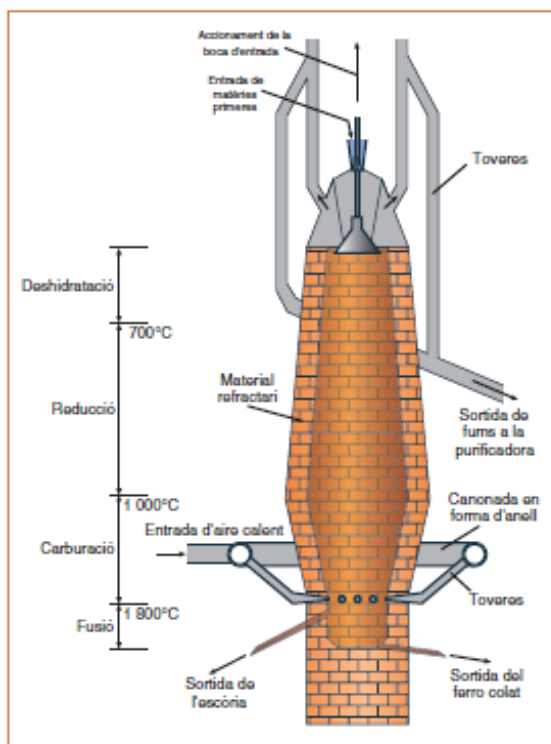


Fig. 7.20. Esquema d'alt forn.

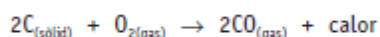
densitat inferior. L'escòria extreta de l'alt forn té un aprofitament posterior en la fabricació de ciment, de formigó i d'aïllants tèrmics en la indústria de l'edificació.

El procés d'obtenció consisteix en la introducció de les matèries primeres en capes successives per la boca superior del forn. La combustió del carbó de coc per la generació d'altres temperatures s'aconsegueix gràcies a la injecció d'aire calent a la base del forn. Periòdicament es va extreure el ferro colat per un orifici en la part inferior del forn, i l'escòria per un altre orifici una mica més elevat que l'anterior.

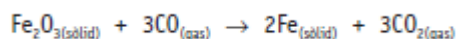
Dins del forn es distingeixen quatre zones per on van passant successivament les matèries primeres des de la boca superior fins al fons del forn o *solera*:

Zona de deshidratació (aprox. 400 °C): el contingut d'humitat que puguin tenir les matèries primeres s'elimina en forma de vapor d'aigua.

Zona de reducció (aprox. 700 °C): el monòxid de carboni (CO) en forma de gas produït per la combustió del carbó de coc, segons la reacció:



puja pel forn i es combina amb l'oxigen del mineral per formar diòxid de carboni i ferro reduït:



El diòxid de carboni, en forma de gas, surt amb els fums per la part superior del forn.

- **Zona de carburació** (aprox. 1200 °C): el carboni es combina amb el ferro formant l'aliatge fèrric.
- **Zona de fusió** (aprox. 1800°C): es produeix la fusió del ferro (aliat amb el carboni) que s'escola en forma líquida (ferro colat) en el fons del forn. La combinació de la calcària amb la sílice del mineral forma l'escòria que queda surant damunt del ferro colat.

Els gasos que surten del forn, amb un alt contingut de pols, no poden deixar-se escapar lliurement a l'atmosfera perquè són molt contaminants. Són sotmesos a un procés de depuració que n'extreu la pols i a un posterior aprofitament energètic en unes instal·lacions anomenades intercanviadors de calor: l'elevada temperatura dels gasos és utilitzada per escalfar l'aire que posteriorment s'injectarà a l'alt forn.



El ferro colat obtingut a l'alt forn és un aliatge de ferro i carboni amb un contingut aproximat del 4% de carboni, el 2% de silici i quantitats menors de fòsfor, sofre i oxigen.

Aquest producte s'ha de sotmetre a una segona transformació abans de ser utilitzat industrialment. La segona transformació pot ser destinada a l'obtenció d'acer o de fosa. Tot seguit descrivim la transformació en acer.

Obtenció de l'acer

Breu cronologia industrial de l'acer

El 1783, l'industrial britànic Henry Cort desenvolupà la tècnica de la *pudelació*, que permet obtenir acer mitjançant un forn de reverber, però no va ser fins el 1855 quan l'enginyer britànic Henry Bessemer inventà el convertidor Bessemer. Més tard, l'empresari alemany Wilhelm Siemens dissenyà un nou *forn d'afinament*, que fou construït pels francesos Pierre i Emile Martin. El dispositiu va rebre el nom de *forn*

PROPIETATS I ASSAIGS

de *Siemens-Martin*. El forn elèctric d'arc no va aparèixer fins al s. XX, patentat pel metal·lúrgic francès Paul Louis Héroult. Fins després de la Segona Guerra Mundial, el 1948, no aparegué el *convertidor LD*, a les acereries austríaques de Linz i Donowitz. El forn elèctric d'inducció es va posar en marxa per primera vegada el 1978, a les acereries alemanyes de l'empresa Krupp.

Tal i com ja hem comentat, per obtenir acer cal descarburar el ferro colat que prové de l'alt forn. La descarburació consisteix a reduir el contingut de carboni. Aquest ferro colat també té un contingut massa elevat d'impureses que cal reduir, ja que li donen fragilitat (fòsfor) o redueixen la seva mal·leabilitat (sofre).

Per obtenir acer a partir de ferro colat hi ha dues instal·lacions diferents:

Instal·lació	Tipus
Convertidor	Bessemer
	Thomas
	D'oxigen
Forns	Martin-Siemens
	Elèctric

Taula 7.11

Als convertidors no hi ha combustió ni escalfament extern i, per tant, cal introduir el ferro colat en fase líquida. En canvi, en els forns hi ha una aportació externa de calor, ja sigui per la combustió d'un gas (Martin-Siemens), que aconsegueix una temperatura entre 1600 i 1700°C, o bé per la producció d'un arc voltaic (forn elèctric), cas en el qual la temperatura arriba als 3700°C.

Actualment els procediments més emprats en l'obtenció d'acer són el *convertidor d'oxigen* i el *forn elèctric*.

El convertidor d'oxigen

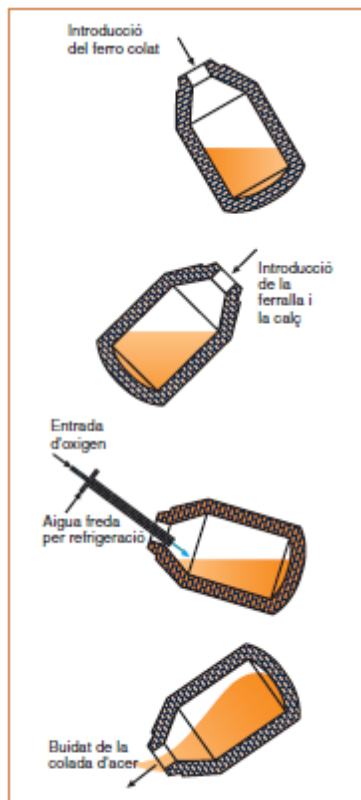


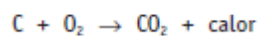
Fig. 7.23. Cicle de treball del convertidor d'oxigen.

És un recipient d'acer de forma cilíndrica i de tronc cònic a la part superior, amb un revestiment interior de ceràmica refractària i obert amb una boca de càrrega per la part superior.

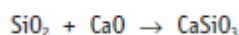
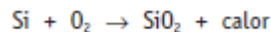
El procés comença amb la càrrega del convertidor amb ferro colat en fase líquida, ferralla i calç (CaO). Tot seguit s'introdueix una llança (refrigerada per un circuit d'aigua) que injecta oxigen pur a pressió damunt el líquid.

Els canvis que es produeixen en el convertidor fan disminuir el contingut de carboni i la proporció d'impureses del ferro colat.

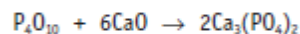
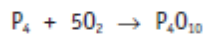
El carboni del ferro colat es combina amb l'oxigen en una reacció que desprèn calor:



El silici es combina amb l'oxigen (la reacció també desprèn calor) i, posteriorment, l'òxid de silici (SiO₂) es combina amb la calç i forma part de l'escòria:



El fòsfor es combina amb l'oxigen i posteriorment amb la calç per formar part de l'escòria:



Amb la calor produïda en les dues primeres reaccions, s'aconsegueix mantenir tota la massa en fase líquida sense necessitat d'una font de calor externa. El procés es pot anar regulant (afegint-hi calç, introduint-hi més oxigen o ferralla...) segons l'aspecte de les mostres que es van obtenint. Un cop l'acer té les proporcions de carboni, silici i fòsfor desitjades, es cola en uns motlles o recipients adequats. L'escòria que roman al convertidor serà extreta posteriorment i aprofitada com a fertilitzant dels camps de conreu, especialment per la seva riquesa en fòsfor.

El forn elèctric

Consisteix en un recipient d'acer refrigerat externament per un circuit d'aigua i recobert internament per ceràmica refractària. Aquest recipient es tanca amb una coberta que disposa de tres elèctrodes de grafit als quals els és aplicat un fort corrent elèctric trifàsic.

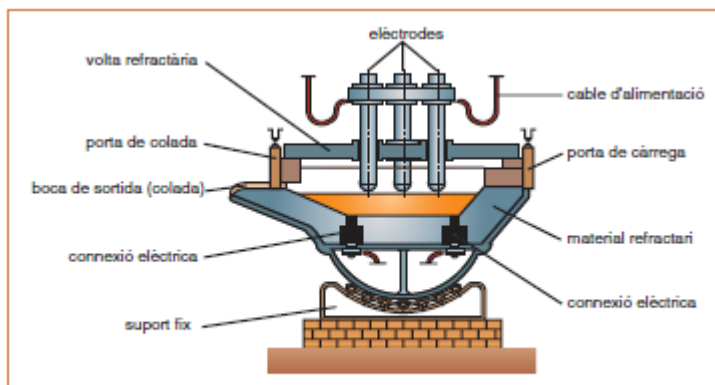


Fig. 7.26. Central geotèrmica amb fluid de baixa energia.

Dins del forn s'introdueix el ferro colat (en fase líquida per estalviar energia), la ferralla oxidada (que aporta l'oxigen) i la calç (per formar l'escòria). Com que el ferro colat i la ferralla són conductors, reben descàrregues elèctriques en forma d'arcs voltaics des dels elèctrodes, amb la qual cosa n'augmenta la temperatura. Es poden afegir, durant el procés, les quantitats necessàries d'elements d'aliatge per obtenir els acers aliats.

Un cop tenim la composició de l'acer dins dels marges desitjats, es cola, bé en motlles o recipients adequats, o bé directament en una instal·lació especial anomenada colada contínua, per a la seva transformació posterior en productes semielaborats.

El forn elèctric permet un control molt precís de la temperatura i de la composició de l'acer. És molt indicat per obtenir acers especials, ja que pot fondre elements d'aliatge com ara el molibdè i el tungstè, que tenen unes temperatures de fusió molt elevades.

ACTIVITATS

- 9> Antigament, per obtenir el ferro i l'acer, eren utilitzats uns altres ginyes diferents a l'alt forn. Un d'aquests va ser conegut com la *farga catalana*. Investiga en què consistia aquest procediment i redacta'n un petit informe.
- 10> Busca informació sobre els forns de cubilot i fes una descripció de les seves característiques i del seu funcionament.
- 11> Si les parets d'un alt forn són d'acer, per què no es fonen amb les temperatures tan elevades a què estan sotmeses?
- 12> Quina funció realitza la pedra calcària en el procés d'obtenció del ferro colat a l'alt forn?
- 13> Defineix els conceptes següents referits als processos d'obtenció de productes siderúrgics: reducció, deshidratació, fusió, carburació i descarburació.
- 14> Quina funció comuna realitzen els convertidors i els forns elèctrics?
- 15> Quina és la diferència fonamental entre un convertidor i un forn elèctric?

6.5 Formes comercials dels acers

Les formes comercials que es donen als acers a les siderúrgies poden ser de dos tipus:

- **Productes semielaborats:** lingot o desbast. No tenen utilització directa i sempre necessiten un canvi de forma abans de ser utilitzats.
- **Productes acabats:** són utilitzats per la indústria més o menys directament. Els carrils s'utilitzen directament, sense cap transformació prèvia. En canvi, a la indústria de l'automòbil, la xapa és tallada i deformada en premses per obtenir-ne les carrosseries.

El **desbast** s'obté per laminatge en calent i té forma allargada amb secció quadrada, rectangular o rodona. Els productes acabats s'obtenen per laminatge en fred o en calent, a partir del desbast.

Per tal de fer més rendibles els processos siderúrgics, cada cop es tendeix més a la concentració de tots els processos d'obtenció dels metalls fèrrics en unes mateixes instal·lacions. Aquestes instal·lacions es coneixen amb el nom de **siderúrgia integral**. Disposen d'alts forns d'on s'obté el ferro colat, que es transforma en acer i passa directament i sense solidificar als convertidors o forns elèctrics, d'on surt l'acer en colada contínua cap a la secció de laminatge, per rebre la forma comercial definitiva.

Les característiques dels productes siderúrgics estan normalitzades; això significa que hi ha organismes internacionals que fixen les característiques de cadascun d'aquests productes i els donen una denominació per distingir-los; n'és un exemple la fabricació de perfils estructurals \mathbb{I} d'ales inclinades amb la designació *IPN*:

Perfils \mathbb{I} d'ales inclinades (perfil europeu)

Inclinació de les ales: 14%

Dimensions: DIN 1025-1: 1963, NF A 45-209 (1983)

Toleràncies: EN 10024: 1995

Estat de la superfície segons norma EN 10163-3: 1991, classe C, subclasse 1

Denominació	Dimensions							Dimensions de construcció					Superfície	
	<i>G</i> kg/m	<i>h</i> mm	<i>b</i> mm	<i>t_w</i> mm	<i>t_f</i> mm	<i>r₁</i> mm	<i>r₂</i> mm	<i>A</i> mm ²	<i>d</i> mm	∅	<i>P_{min}</i> mm	<i>P_{max}</i> mm	<i>A_L</i> m ² /m	<i>A_G</i> m ² /t
								x 10 ²						
IPN 80	5,9	80	42	3,9	5,9	3,9	2,3	7,58	59	—	—	—	0,304	51,09
IPN 100	8,3	100	50	4,5	6,8	4,5	2,7	10,6	75,7	—	—	—	0,370	44,47
IPN 120	11,1	120	58	5,1	7,7	5,1	3,1	14,2	92,4	—	—	—	0,439	39,38
IPN 140	14,3	140	66	5,7	8,6	5,7	3,4	18,3	109,1	—	—	—	0,502	14,94
IPN 160	17,9	160	74	6,3	9,5	6,3	3,8	22,8	125,8	—	—	—	0,575	32,13
IPN 180	21,9	180	82	6,9	10,4	6,9	4,1	27,9	142,4	—	—	—	0,640	19,22
IPN 200	26,2	200	90	7,5	11,3	7,5	4,5	33,4	159,1	—	—	—	0,709	27,04
IPN 220	31,1	220	98	8,1	12,2	8,1	4,9	39,5	175,8	M10	50	56	0,775	24,99
IPN 240	36,2	240	106	8,7	13,1	8,7	5,2	46,1	192,5	M10	54	60	0,844	23,32
IPN 260	41,9	260	113	9,4	14,1	9,4	5,6	53,3	208,9	M12	62	62	0,906	21,65
IPN 280	47,9	280	119	10,1	15,2	10,1	6,1	61,0	225,1	M12	68	68	0,966	20,17
IPN 300	54,2	300	125	10,8	16,2	10,8	6,5	69,0	241,6	M12	70	74	1,03	19,02
IPN 320	61,0	320	131	11,5	17,3	11,5	6,9	77,7	257,9	M12	70	80	1,09	17,87
IPN 340	68,0	340	137	12,2	18,3	12,2	7,3	86,7	274,3	M12	78	86	1,15	16,90
IPN 360	76,1	360	143	13	19,5	13	7,8	97,0	290,2	M12	78	92	1,21	15,89
IPN 380	84,0	380	149	13,7	20,5	13,7	8,2	107	306,7	M16	84	86	1,27	15,12

Taula 7.12. Informació facilitada pel fabricant de perfils \mathbb{I} d'ales inclinades.

PROPIETATS I ASSAIGS

Les indicacions següents serveixen per interpretar la informació subministrada pel fabricant:

- G (kg/m) és la **densitat lineal**; és a dir, la massa que té el perfil per unitat de llargària. En el cas de l'IPN 100, la densitat lineal és de 8,3 kg per cada metre de perfil.
- A (mm²) és la **secció del perfil**; és a dir, la superfície d'un tall transversal. En el cas de l'IPN 100, la secció és de 10,6·102 mm²
- A_L (m²/m) és la **superfície lineal**, la superfície total exterior per cada unitat de llargària. En el cas de l'IPN 100, la superfície total és de 0,370 m² per cada metre de perfil.
- A_G (m²/t) és la **superfície màssica**, la superfície total exterior per cada tona (t) de massa. En el cas de l'IPN 100, la superfície total és de 44,47 m² per cada tona de perfil.



EXEMPLE 4

Quin serà el pes G_b d'una biga amb una llargària $L = 3,05$ m feta amb un acer de perfil normalitzat IPN 240?

Resolució

Obtenim el valor de la densitat lineal de la taula de dades dels perfils IPN normalitzats: $G = 36,2$ kg/m

La massa total de la biga serà: $m = G \cdot L = 36,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot 3,05 \text{ m} = 110,41 \text{ kg}$

Finalment, el pes serà: $G_b = m \cdot g = 110,41 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 1083,12 \text{ N}$



EXEMPLE 5

En la construcció d'una nau industrial, tenim $n_b = 34$ bigues d'acer IPN 320, totes amb una llargària de $L = 5$ m. Si utilitzem una pintura protectora que, segons el seu fabricant, té un rendiment de $r = 11$ m²/L i se serveix en envasos de 10 L:

- Quina quantitat de pintura necessitarem per protegir totes les bigues?
- Quants envasos caldrà comprar?

Resolució

- Per calcular la pintura ens cal conèixer la superfície total exterior de les bigues que s'han de cobrir. Segons les taules de perfils IPN, per l'IPN 320, $A_L = 1,09$ m²/m.

La llargària total de les bigues és $L_{\text{total}} = L \cdot n_b = 5 \cdot 34 = 170$ m

La superfície total exterior és $A_{\text{total}} = A_L \cdot L_{\text{total}} = 1,09 \cdot 170 = 185,3$ m²

La quantitat de pintura necessària és $V_{\text{pintura}} = \frac{A_{\text{total}}}{r} = \frac{185,3}{11} = 16,85$ L

- Com que la pintura se subministra en envasos de 10 L, haurem de comprar $16,85 / 10 = 1,685$ envasos \rightarrow 2 envasos de 10 L.

6.6 Tractaments tèrmics

Un dels fets que justifiquen la importància de l'acer en la indústria és la possibilitat d'obtenir una gran varietat de propietats amb el mateix tipus de material. Per exemple, podem disposar d'acers mal·leables per fer xapes, d'acers inoxidables per treballar en ambients humits, d'acers magnètics per a aplicacions electrotècniques, d'acers durs i resistents al desgast i a les temperatures altes per a eines de tall, etc. Gran part de la variabilitat de les propietats és deguda als tractaments tèrmics.



Els **tractaments tèrmics** consisteixen a sotmetre l'acer a uns canvis controlats de temperatura (escalfaments i refredaments successius) per tal de variar les proporcions dels seus constituents.

PROPIETATS I ASSAIGS

Els tractaments tèrmics més utilitzats són el *trempe*, el *revingut*, la *recuita* i el *normalitzat*. Per aplicar aquests tractaments hi ha dos valors de temperatura molt importants: la **temperatura AC₁**, o aquella a la qual comença a aparèixer el constituent *austenita*, i la **temperatura AC₃**, o aquella a la qual tota la massa d'acer s'ha transformat en austenita. El valor d'AC₁ és de 723 °C en tots els casos, però el valor d'AC₃ varia segons la proporció de carboni que contingui l'acer (observa el diagrama ferro-carboni).

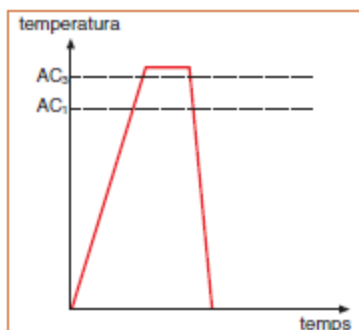


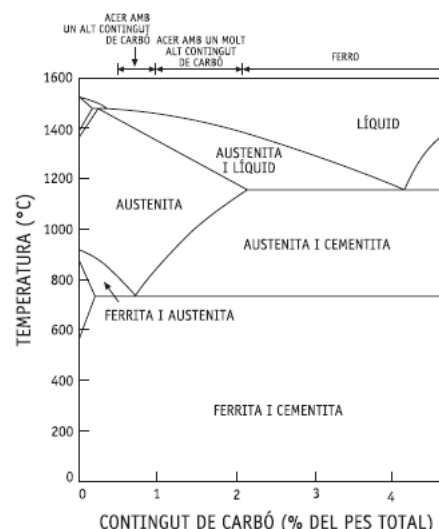
Fig. 7.30. Gràfica d'escalfament per obtenir austenita i de refredament ràpid per obtenir martensita.

Tipus d'acer	Velocitat mínima de refredament (°C/s)
No aliat (al carboni)	entre 200 i 600
Aliat	50

Taula 7.13. Velocitat de transformació de l'acer en martensita.

Diagrama de fases ferro-carbur de ferro

El ferro, en escalfar-se, experimenta canvis en l'estructura cristal·lina abans de fondre's. En aquest diagrama es poden observar totes les fases del ferro, en funció de la temperatura i del percentatge de carboni en pes.



El trempe



S'aplica el **trempe** quan es vol aconseguir un acer amb una elevada duresa i resistència mecànica. Consisteix a obtenir un acer format per una gran proporció de martensita.

Com que la martensita s'obté per refredament ràpid de l'austenita, el tractament consisteix en:

- Escalfament de l'acer fins que tota la massa es transformi en austenita. Segons el tant per cent de carboni, la temperatura a què cal arribar serà més alta o més baixa. (Vegeu el diagrama ferro-carboni).
- Refredament ràpid per assegurar que tota l'austenita es transforma en martensita.

Però a quina velocitat cal fer el refredament? Per a cada tipus d'acer existeix una velocitat de refredament mínima que assegura la transformació completa en martensita. Per aconseguir el trempe de la peça cal refredar-la a una velocitat lleugerament superior a la mínima. En alguns casos, però, es poden produir deformacions o esquerdes per l'aplicació de velocitats de refredament excessives. Per aconseguir les diferents velocitats de refredament s'utilitzen diferents mitjans de refredament on se submergeixen les peces que cal tractar:

- Aigua
- Mercuri
- Olis minerals (derivats del petroli)
- Sals foses
- Plom fos
- Aire a temperatura ambient

La martensita formada en el trempe dels acers aporta fragilitat, a més de duresa, i això pot ser un inconvenient greu en molts casos. De vegades només interessa endurir una capa externa de la peça, mantenint la part interna sense trempe per tal de no perdre'n la tenacitat. En aquests casos es pot aplicar un trempe superficial (entre 1 i 6 mm de profunditat) escalfant la superfície de la peça amb un bufador oxiacetilènic o per inducció electromagnètica i aplicant un refredament posterior amb aire o aigua.

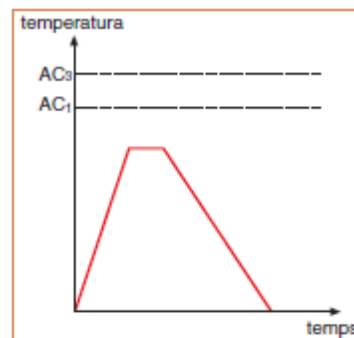


Fig. 7.31. Gràfica del tractament de revingut aplicat a un acer trempat (martensita).

PROPIETATS I ASSAIGS

El revingut

Un altre procediment per augmentar la tenacitat dels acers que han estat sotmesos a tremp és el revingut.



El **revingut** consisteix en un escalfament a temperatura inferior als 723 °C (per tal d'evitar la formació d'austenita) i un refredament posterior a l'aire.

D'aquesta manera s'aconsegueix incrementar la tenacitat i reduir les tensions internes de l'acer trempat. Això sí, a costa d'una disminució de la duresa, de la resistència mecànica i del límit elàstic.

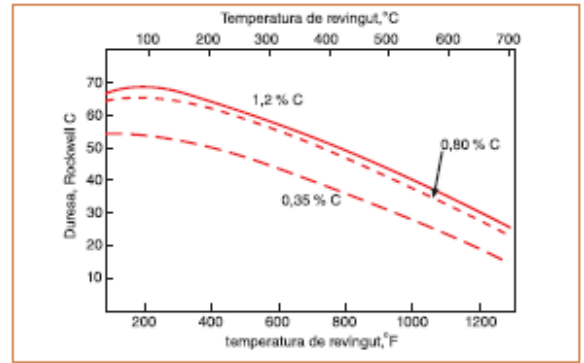


Fig. 7.32. Disminució de la duresa segons la temperatura de revingut per a tres acers.

La recuita



La **recuita** s'utilitza quan es vol disminuir la duresa i incrementar la plasticitat d'un acer per poder-lo deformar i treballar fàcilment. En general consisteix en un escalfament a temperatura elevada i un refredament lent.

Segons la temperatura màxima del tractament i la velocitat del refredament es distingeixen diferents tipus de recuita:

- Recuita de **regeneració**: per a acers amb un contingut de carboni > 0,6%.
- Recuita **globular supercrítica**: per a acers aliats i per a eines. La temperatura màxima és superior a la de formació d'austenita.
- Recuita d'**estovament**: és un tractament idèntic al revingut però que s'aplica a peces que no han estat prèviament trempades. S'utilitza per a acers aliats de gran resistència, ja que si se'ls aplica una recuita de regeneració no es podria evitar el tremp de la peça en el refredament.
- Recuita **contra acritud**: per eliminar l'acritud produïda en els processos de conformació en fred.

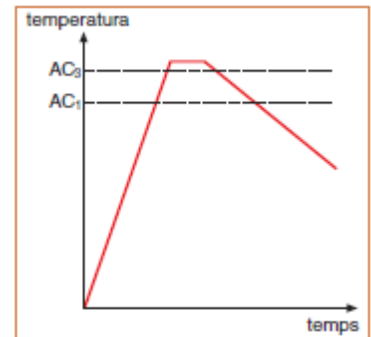


Fig. 7.33. Gràfic del tractament de recuita.



L'**acritud** consisteix en l'enduriment i l'augment de la fragilitat d'un metall quan es deforma en fred (per formar làmines o fils). Aquesta recuita consisteix en un escalfament a 660-700°C i un refredament posterior a l'aire.

La normalització



El **normalitzat** consisteix en un escalfament fins a la temperatura d'austenització i un refredament a l'aire (a velocitat més lenta que el tremp però més ràpida que la recuita).

Aquest tractament s'aplica només als acers amb un baix contingut de carboni (entre 0,15 i 0,5%) després que han estat deformats en fred o en calent. L'objectiu és eliminar les possibles tensions internes produïdes per la deformació i retornar-los les propietats originals d'abans de la deformació.

Un altre objectiu que es busca amb el normalitzat és l'afinament de l'estructura granular, és a dir, la reducció de la grandària dels grans de l'acer, amb la millora consegüent de les seves propietats mecàniques.

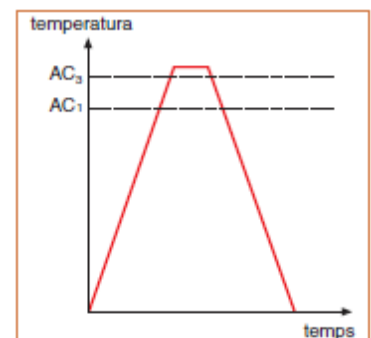


Fig. 7.34. Gràfic del tractament de normalitzat.

- 16> Una estructura en armadura metàl·lica consta de 215 elements de $L = 1,3$ m cadascun. Si els elements són perfils d'acer normalitzats IPN 360, respon:
- Quin serà el pes G_0 de l'estructura?
 - Quin volum de pintura V_p (en L) caldrà utilitzar per protegir-la de la corrosió si el seu rendiment és $r = 8$ m²/L?
 - Quants envasos de 10 L caldrà adquirir?
- 17> Quina és la diferència fonamental entre la xapa, la banda i el fleix d'acer? I entre la pletina i el passamà?
- 18> Identifica els perfils laminats en calent de les imatges següents:



Fig. 7.35

- 19> Existeix una gran varietat de perfils d'acer laminats en fred: tota mena de tubs, perfils per a finestres, portes, guies, etc. Busca informació sobre alguns i les seves aplicacions i redacta'n un petit informe.
- 20> Quin és el principal constituent dels acers trempats?
- 21> Una peça d'acer es troba a una temperatura de 1560 °C i se submergeix en un recipient que conté olis minerals. Un cop transcorreguts 13 s, la seva temperatura és de 650 °C. Quina ha estat la velocitat de refredament? S'haurà produït el tremp de la peça?
- Suposa que es tracta d'un acer al carboni.
 - Suposa que es tracta d'un acer aliat.
- 22> Identifica el tipus de tractament tèrmic que representa cadascuna de les gràfiques següents

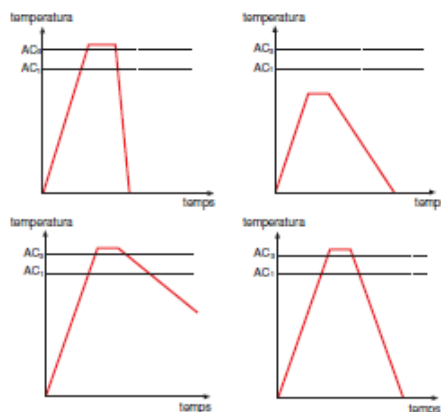


Fig. 7.36



Activitats complementàries

- 1> Una mina de la conca asturiana presenta una riquesa del mineral del 12% en Cu (coure), 3% en Co (cobalt) i 3% en Ni (níquel).
- Quina quantitat de mineral m_{\min} cal extreure per obtenir $m_{Cu} = 1$ t de coure?
 - Quina quantitat de níquel m_{Ni} obtindrem amb $m_{\min} = 6$ t de mineral?
- R: a) 8,33 t; b) 180 kg
- 2> Un acer eutèctic conté un 0,89% de C (carboni). Quina quantitat de carboni m_c hi ha continguda en un perfil IPN 160 de $L = 3$ m?
- R: 478 g
- 3> En quina fase trobarem l'aliatge de ferro amb 1% C si el sotmetem a una temperatura de 1130 °C? Quins seran els seus constituents principals?
- 4> El tub d'acer ($\rho = 7,85$ g/cm³) de la figura 2 té unes dimensions $b = 300$ mm; $h = 200$ mm; $r = 22$ mm; $r' = 16$ mm i $e = 3$ mm, i se subministra en paquets de 12 tubs de $L = 2,4$ m. Quin és el pes de 5 paquets d'aquest producte siderúrgic?
- 5> En una mina jamaicana es troba bauxita amb una riquesa del 31,6% en Al (alumini). Quina quantitat de bauxita $m_{bauxita}$ es necessita per obtenir 5 t d'alumini?
- R: $m_{bauxita} = 15,82$ t de bauxita
- 6> En quina fase trobarem l'aliatge 30% Ni + 70% Cu si el sotmetem a una temperatura de 1200 °C?
- 7> Quin serà el pes de 29 tubs d'alumini amb un $\varnothing_{\text{exterior}} = 180$ mm i un gruix $e = 2,5$ mm si tots fan una llargària $L = 1,25$ m?
- R: 1343,5 kN

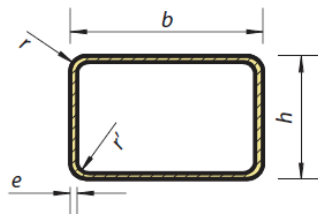


Fig. 2. Tub rectangular.