

PART SEGONA: ASPECTES TECNOLÒGICS

3. SIDERÚRGIA ANTIGA

Essent el ferro un dels cinc elements més abundants presents a l'escorça terrestre, la tardana generalització de la seva metal·lúrgia en comparació a la d'altres metalls, com el coure i els seus aliatges, l'argent o l'or, es degué, aparentment, a les dificultats implícites en la seva obtenció i a les millors propietats mecàniques que presentaven els estris elaborats amb bronze, el competidor directe del ferro en aplicacions funcionals.

El ferro terrestre és present majoritàriament en forma de mineral, i suposa un procés de preparació i posterior reducció més laboriós, comparativament, que amb la resta d'altres metalls: hi ha necessitat de treballar en calent, les infraestructures i l'instrumental per l'elaboració no són totalment coincidents, cal un treball mecànic considerable per a netejar la matriu metàl·lica i, el que el diferencia fonamentalment dels altres metalls fins llavors emprats es concreta en que la temperatura de fusió del ferro és molt superior ¹⁸⁵.

Altrament, a partir d'aproximadament 900° C ¹⁸⁶, el ferro, convertit en una massa plàstica, pot ja treballar-se amb relativa facilitat, possibilitant-ne el seu ús; aquest fet, afegit a l'abundància dels minerals de ferro i a la seva coneixença com a font en la reducció del coure, predisposen a suposar que la siderúrgia era coneguda des d'antic, paral·lelament al desenvolupament de la metal·lúrgia del coure i els seus aliatges. En aquest sentit, una línia d'interpretació de les etapes de producció del ferro protohistòric assenyalarien la primera utilització del ferro a partir de l'aprofitament de petits nòduls de ferro lliure en l'escòria obtinguda a partir de la reducció del coure, on s'agregà hematites com a font ¹⁸⁷.

¹⁸⁵ Mentre que els punts de fusió del coure (Cu -1083° C), l'estany (Sn - 232° C), el plom (Pb - 327.4° C), l'or (Au - 1063° C) i l'argent (Ag - 1063° C) semblaven estar a l'abast d'una infraestructura simple formada per una llar i un gresol, el punt de fusió del ferro (Fe - 1538° C) precisava d'una estructura més complexa per assolir aquesta temperatura. Aquest fet permetia fondre els altres metalls esmentats i emmotllar-los, simplificant extraordinàriament tot el procediment manufacturer.

¹⁸⁶ Segons el diagrama Fe-C, 912° C - 1674° F el ferro pur i, depenent del contingut de carboni, fins a 740° C - 1364° F en el percentatge més òptim per a la més baixa temperatura.

¹⁸⁷ Segons el discutit marc teòric d' A. Madroñero, posteriors etapes de la producció del ferro, ja durant Ferro I, foren també vinculades al reprocessament de l'escòria de Cu.

MADROÑERO, A. (1984) "Estudio metalúrgico de algunas piezas del Museo Arqueológico Provincial de Murcia", *Empúries*, 45-46, pp. 277-278

Contraposadament, i a través de les nombroses troballes vinculades, és simptomàtic que els primers objectes de ferro coneguts fossin elaborats tan de ferro meteòric ¹⁸⁸ (amb alt contingut de níquel) com de ferro d'origen mineral, i estiguessin, majoritàriament, treballats en fred; els primers estris de ferro presenten unes propietats mecàniques inferiors als estris de bronze, circumstància per la qual aquesta modalitat de metal·lúrgia es limità bàsicament a un nombre reduït d'ítems de prestigi ¹⁸⁹.

El motiu que possiblement originà el canvi de metall base en el desenvolupament tecnològic fou, en principi, paradoxal al representar un pas enrera en les propietats mecàniques del producte final ¹⁹⁰; es considera que el bronze havia estat satisfactori per a les necessitats per les quals, posteriorment, s'utilitzarà el ferro. Aquest darrer, com a ferro pur, posseeix una resistència de 2.812 kg/cm² i, si bé presenta més resistència que el coure pur (2.250 kg/cm²), és clarament inferior respecte els aliatges arsenicals i d'estany, emprats des d'inicis III mil·leni a.C. L'altre avantatge substancial de la utilització del bronze envers el ferro radicava en la seriació que possibilitava el treball del primer metall; la possibilitat de fondre el bronze, permetia un procés ràpid i de caire pseudoindustrial de la producció a través de motlles, simples, dobles, múltiples o de nuclis, que generaven peces d'idèntica forma, essent, alhora, perfectament aptes pels treballs a petita escala i de qualitat acurada; enfront d'aquestes particularitats, el ferro necessitava d'un treball individualitzat, i, fins a assolir un desenvolupament tècnic important, presentava grans limitacions en la confecció d'estrís o ornaments de grandària reduïda.

Historiogràficament es considera que la metal·lúrgia antiga es basà en la impossibilitat de convertir el ferro en una massa líquida apte pel seu emmotllament a causa del seu elevat punt de fusió, elaborant els estris de ferro

¹⁸⁸ El ferro meteòric, d'origen extraterrestre, es caracteritza per un alt contingut de níquel (fins el 25% Ni) i és relativament present a l'escorça terrestre, essent coneguda l'extracció de metall de grans meteorits des de temps prehistòrics. Tanmateix, no tots els meteorits tenen ferro o aquest és fàcilment utilitzable: els aerolits són exclusivament petris, els siderolits (sissiderites i esporasiderites) tenen fragments de ferro incrustats en la matriu de pedra, només les siderites (holosiderites) són gairebé totalment metàl·liques.

¹⁸⁹ Consultar cap. 1

¹⁹⁰ MADDIN, R. *et alii* (1977) "Cómo empezó la ...", op.cit. 18, pp. 92-93
SNODGRASS, A.M. (1962) "Iron Age Greece...", op.cit. 10, pp. 91-94

obtinguts a partir del mètode directe ¹⁹¹; en aquest procediment s'obté la massa reduïda a una temperatura inferior a la de la fusió, produint un ferro brut i de consistència pastosa, que obligava a continuar amb un seguit de treballs mecànics per eliminar les escòries amb les quals era barrejat. Amb forns alimentats amb mineral de ferro, emprant carbó vegetal com a combustible i com agent químic, assolint suficient temperatura, i amb l'accés forçat o natural de l'aire, es provocava la reacció química coneguda com a reducció. Amb aquestes condicions, la productivitat de la infraestructura havia de ser molt limitada, obtenint petites quantitats de metall a partir de volums importants de mineral i, principalment, grans quantitats de combustible.

Tanmateix, i amb la identificació de troballes de cronologia diversa i dels esments dels autors clàssics, és possible que, tan accidentalment com de forma intencional però minoritària, determinats artesans o tallers especialitzats en diferents moments de l'evolució tecnològica de la siderúrgia assolissin temperatures suficients per a fondre el metall, però que aquest procés no es pogués aprofitar per donar finalitat pragmàtica al producte obtingut; el metall resultant seria tractat de forma similar a la fosa d'altres metalls o aliatges, com l'or o el bronze, no mereixent major interès per part dels ferrers ¹⁹². Només a Xina i la Índia, a mitjans del I mil·lenni a.C. es perfeccionà la tecnologia i les infraestructures necessàries per arribar a temperatures de fusió de forma intencionada i, alhora, donar finalitat pràctica en forma d'estri al metall fos. L'expansió del seu coneixement no arribà a Europa fins els contactes baix medievals amb el Lluçnyà Orient i l'eclosió armamentística del s. XV als límits dels imperis bizantí i otomà, no establint-se de forma generalitzada a l'Occident fins el s. XVIII ¹⁹³.

¹⁹¹ Aquest procés d'obtenció genera una massa de ferro que, per la seva consistència, pot treballar-se directament amb el martell fins a convertir-la en un o més objectes. Altrament, el mètode indirecte obté el metall en estat líquid amb un elevat contingut de carboni, el que impossibilita poder-lo martellar al solidificar si no es sotmès a un posterior tractament, l'afinatge, que possibilita la seva forja.

¹⁹² Diverses figures votives egípcies i elements de petita grandària són producte de fosa en cronologia hel·lenística, al igual que nombrosos atuells romans de petita grandària. Altrament, tot i la reinterpretació rebuda pels investigadors moderns, Aristòtil (*Metereologica*, IV, 6, 383) parla de ferro fos i líquid que ràpidament s'agrumolla. Hipòcrates (*Peri Dietis, Regiman I, XIII*) o Plutarc (*Moralia, De Primo Frigido*, 19) esmenten el treball dels ferrers amb la fosa, Pausànies comenta la descoberta de fondre el ferro per part de Teodor de Samos i Plini el Vell descriu l'obtenció de ferro líquid.

DAREMBERG, C; SAGLIO, S. (1896) *Dictionnaire des Antiquetes...*, op.cit. 2, p. 1081-1082

PHOTOS, E. (1987) "Furnace illustrations on ...", op.cit. 35, pp. 292-294

PLEINER, R. (1969) *Iron working in ...*, op.cit. 10, p. 25-29.

¹⁹³ TYLECOTE, R.F. (1976) *A history of metallurgy*, p. 41

Per a reduir les menes originals d'òxids de ferro no foren precises altes temperatures. A temperatura suficient i en dependència del grau reductor de l'agent químic dins el forn, s'aconsegueix una massa de esponjosa esmentada per a diferents autors com *bloom iron*¹⁹⁴. Aquest tipus de ferro pot contenir un petit percentatge de carboni distribuït de manera heterogènia i, alhora, hi poden ésser presents altres elements (Mn, Cu, S, P) en limitada proporció; altrament, es caracteritza per incloure, dins la matriu metàl·lica, restes d'escòria procedent de la ganga original en forma d'inclusions; el *bloom iron* era molt mal·leable i de fàcil treball de forja. Aquesta fou la base metal·lúrgica sobre la qual els pobles preromans de la península ibèrica elaboraren el seu utilatge de ferro.

Les esponges de *bloom iron* eren prou heterogènies per incloure zones de ferro pur i d'altres amb diferent grau de carburació. En aquest sentit, era tecnològicament possible d'obtenir acer amb contingut variable de carboni a partir de temperatures de reducció properes als 900°, el que havia de produir masses amb aceració diferent, en dependència de les característiques de la infraestructura del forn, de l'evolució del procés d'obtenció i de la capacitat dels artesans¹⁹⁵. Diversos autors¹⁹⁶ han considerat que únicament amb el treball del ferro acerat es consolidà el canvi de la metal·lúrgia del bronze a la del ferro; el descobriment, segons els mateixos investigadors, havia d'ésser casual, quan la porció de ferro reduït restà en contacte directe a determinada temperatura amb el carbó vegetal, essent possible d'obtenir una cementació superficial del ferro; la difusió del carboni a l'estat sòlid resultant, fora regulada en funció de la temperatura i el temps d'exposició, convertint-se en acer. En el mateix sentit, és evident que l'experimentació empírica dels artesans els hi permetria diferenciar les diverses qualitats de metall producte de la reducció, diferenciant en la massa de l'esponja resultant quines eren les parts especialment més endurides, que corresponien a la zona acerada del masser.

El ferro carburat o acer resultant si que suposava un avanç tecnològic evident, amb una millora pràctica de les propietats mecàniques del nou aliatge respecte al

¹⁹⁴ RICKARD, T.A. (1939) "The primitive smelting ...", op.cit. 2, p. 87.

TYLECOTE, R.F. (1987) *The early history of metallurgy in Europe*, pp. 132-136.

¹⁹⁵ FORBES, R.J. (1950) *Metallurgy in Antiquity*, op.cit. 28, p. 38-42.

¹⁹⁶ MADDIN, R. *et alii* (1977) "Cómo empezó la ...", op.cit. 18, pp. 94-97

FORBES, R.J. (1950) *Metallurgy in ...*, op.cit. 28. p.42.

bronze: amb un 0.2-0.3 % C la resistència era igual a la del bronze no treballat, 4.218 kg/cm²; amb 1.2 % C la resistència arribava a 9842 kg./cm², superant la resistència del bronze treballat en fred; l'acer al 1.2 % C amb un acurat treball mecànic a temperatura assolí els 17.225 kg./cm², més del doble de resistència de la que es podia obtenir del bronze. Els treballs de postreducció i forja i els tractaments tèrmics i termoquímics que es desenvoluparen permeteren optimitzar les avantatges tecnològiques de l'acer fins a època moderna.

Des de l'àmbit logístic, la necessitat d'aprovisionament que implicava la tècnica siderúrgica ¹⁹⁷ determinava l'establiment humà i la seva posterior evolució social. En aquest sentit, era indispensable disposar dels recursos minerals i de combustible suficients per a permetre la producció. La baixa productivitat de les infraestructures obligava a fruir de grans quantitats de mineral i, alhora, de carbó de llenya. Aquest fet provocà tan la ubicació de les infraestructures a un indret de fàcil abastament, com la desforestació i inicial erosió dels entorns de les zones productores ¹⁹⁸. Altrament, la redistribució de les produccions, lingots, *currency bar* i objectes acabats, precisava de l'articulació territorial i de les vies de comunicació, alhora que es vinculava a les relacions polítiques i econòmiques entre centres productius i comunitats receptores.

¹⁹⁷ En totes aquelles fases descrites per la cadena siderúrgica. Consultar cap. 4.

¹⁹⁸ La depredació de qualsevol tipus d'espècie vegetal és evidenciada en els anàlisis de carbons de les estructures de combustió, amb restes de tota mena d'arbres i arboços, i en els autors clàssics com Plini el Vell (*Historia Naturalis*, XVI, 8) que, tot i esmentar el carbonet d'alzina com el millor combustible, descriu l'ús genèric de tota fusta per a ésser convertida en carbó.

COLLIS, J. (1989) *La Edad del ...*, op.cit. 3, pp. 38-39

RICKARD, T.A.(1939) "The primitive smelting...", op.cit. 2, pp. 84-85

3.1. INFRASTRUCTURES

Amb les dades de les que actualment es disposa, sembla que la siderúrgia antiga va néixer a partir dels coneixements previs de processos metal·lúrgics de metalls i aliatges ja treballats, com el bronze, el coure, l'argent o l'or. Tot i així, les particularitats del treball del ferro obligaren tan a adaptar les infraestructures existents com a crear-ne de noves com a resposta a les necessitats canviants.

La infraestructura bàsica per a procedir a la reducció del mineral continuava essent el forn, però en les successives etapes de l'elaboració del ferro eren precisades noves estructures per a efectuar la postreducció i la forja, així com utilitatge específic i elements auxiliars de suport que conformaven l'espai de l'artesà, futura ferreria.

Amb la coneixença de les llars per obtenir el coure i l'estany, la inicial estructura de combustió s'anà modificant a mesura que el coneixement empíric de l'artesà creava innovacions al respecte. Aquestes millores tecnològiques no foren sincròniques ni homogènies i, paral·lelament als llargs processos d'expansió del coneixement del ferro, la seva generalització i el seu treball no s'implantaren amb iguals característiques, fet que possibilità la coexistència de diverses modalitats d'infraestructura i les seves particularitats locals. El fenomen perdurà fins l'homogeneïtzació sociocultural, econòmica i tecnològica introduïda pels conqueridors i colonitzadors romans als territoris ocupats, restant bona part de les singularitats tecnològiques locals en els pobles "bàrbars", que els mantingueren *ad limes* fins a època alt medieval.

En els seus inicis, els baix forns ¹⁹⁹ es situaven estratègicament on haguessin suficients reserves de mineral i fusta o combustible i, posteriorment d'aigua; amb aquest entorn logísticament favorable per a la producció, es va anar dotant al centre siderúrgic d'unes instal·lacions cada cop més desenvolupades

¹⁹⁹ S'utilitzarà la denominació de baix forn per a definir la infraestructura vinculada a l'obtenció del metall per mètode directe. La ciència metal·lúrgica també identifica arquitectònicament al baix o alt forn per la relació d'amplada de la base i l'alçada, essent baix forn quan el diàmetre de la base és major que la vertical i alt forn en el cas invers; a efectes històrics s'ha considerat que la diferència d'alçada per definir baix i alt forn perd sentit respecte a la temperatura assolida i, per tant, de la capacitat de fondre o no el metall.

tecnològicament. En una estació siderúrgica era necessària l'existència d'un forn on es reduís el mineral pel mètode directe, una o vàries estructures auxiliars de combustió que permetessin executar les tasques de postreducció i forja²⁰⁰, i un seguit d'atuell, eines i instrumental adaptats a la tasca a portar a terme.

Per a procedir a la reducció del mineral no són necessàries instal·lacions sofisticades: cal ubicar òxids de ferro en un ambient reductor a temperatures suficientment altes durant un temps determinat; de les particularitats d'execució amb que aquesta acció es porti a terme dependrà que els resultats siguin eficients o mediocres. La infraestructura precisada per efectuar-ho ha de disposar d'unes parts imprescindibles²⁰¹ (fig. 4):

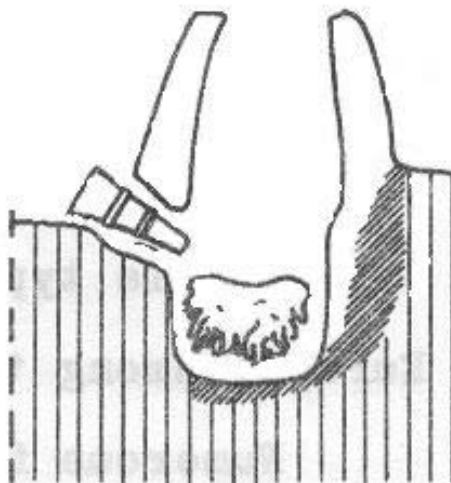


Fig. 4. Model esquemàtic de forn de reducció pel mètode directe (de Pleiner, 1989, p. 95).

- un cor o nucli que actui com a cub i dipòsit del metall al llarg de l'operació, i on s'assoleixin temperatures prou altes i homogènies, garantint condicions

²⁰⁰ Aquestes estructures de combustió, anomenades fornals posteriorment, llars de postreducció-forja o *bas foyer* podien no existir de forma individualitzada, essent els mateixos fornals de reducció previs que, un cop trencada la cúpula, si n'hi havia, per extreure'n la massa de *bloom iron* (ferro amb escòries) eren reutilitzats com a llars obertes.

²⁰¹ DUNIKOWSKI, C.; CABBOI, S. (1994) "Les ateliers des Clérimois (Yonne). Typologie des bas fourneaux et evolution", *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen*, pp. 101-104

SEERNELS, V. (1993) *Archéométrie des scories du fer. Recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale*, p. 15.

estables; amb aquest objectiu ha de disposar d'un correcte aïllament tèrmic, amb parets refractàries que cobreixin la gairebé totalitat del seu perímetre intern i un fons aïllat o soterrat en forma de clot;

- ha de disposar d'un mur de tancament perimetral o, com a mínim, restar enclotat suficientment per l'existència del cor esmentat; en el mateix sentit, si no imprescindible, és possible que el suposat muret perimetral es culmini amb una coberta de pedra o tovot, normalment hemisfèrica o simple continuació en alçada de les parets, amb una obertura zenital en forma de boca, per on serà introduïda la càrrega de mineral i el carbó de llenya, i que actuarà com a xemeneia ²⁰²;
- el foc ha d'ésser alimentat per un flux d'aire apropiat, fet que suposa que la infraestructura precisava disposar d'una obertura per a permetre l'entrada de l'aire; en el cas de que el tiratge sigui natural, caldrà que l'orientació i la morfologia de la infraestructura sigui adient a les condicions locals i permeti optimitzar-les; si el tiratge és forçat o induït, la/es obertura/es hauran de permetre l'encaix de toveres ben focalitzades al cor del forn, amb folrament refractari i manxes que possibilitin aquest flux continuat d'aire.

El procés de treball en els forns depenia de la morfologia de la infraestructura, si bé era necessari procedir primer a la càrrega amb carbó de llenya per l'escalfament, preparant el llit incandescent sobre el qual es disposaria el mineral, fragmentat, en mixtura amb gran quantitat de carbó, amb la intenció d'envoltar totalment el mineral de ferro amb el combustible. La reducció, i evacuació d'escòries en el seu

²⁰² L'existència de cúpula en el baix forn és un dels interrogants més significatius en l'arquitectura de les inicials infraestructures. Arqueològicament, el testimoni físic de l'existència de supraestructures en els indrets de combustió ha restat pràcticament no identificat en bona part de les investigacions modernes; quan en una instal·lació siderúrgica s'ha pogut determinar l'existència d'elements constructius perimetrals, aquests presenten un alçat a nivell d'identificació estratigràfica, gairebé sense alçat, i, en tot cas, les restes de tovot o pedra associades a l'enderroc no determinen alçades de les parets o existència de coberta; tanmateix, el paral·lel antropològic introduït per autors anglosaxons i francesos a partir dels models africans i la duplicació del tòpic visual, provoquen que, sense massa discussió, s'accepti en nombrosos investigadors l'existència de baix forns amb cúpula com una evidència contrastada, principalment en els models evolucionats amb evacuació d'escòries. Altrament, des del punt de vista metal·lúrgic, sembla evident que les evolucions tecnològiques del baix forn es concretaren, a l'occident mediterrani i a bona part d'Europa, en la farga catalana, la qual es caracteritza per les virtuts de l'absència de cúpula i la facilitat per accedir a la càrrega del forn i l'extracció del masser. En tot cas, i en manca d'un rigorós registre arqueològic, sembla evident que l'existència de cúpula no ha d'ésser considerada una circumstància generalitzada associada a qualsevol model de forn pronomà en l'àmbit objecte d'estudi.

cas, s'allargaria durant hores, amb el combustible cremant amb flama curta ²⁰³, repetint la càrrega de carbó i mineral per amortitzar l'estructura fins que les toveres estiguessin obturades. Amb posterioritat, es refredaria el forn i es remouria la cúpula, si aquesta existís, per extreure l'esponja de metall; finalment, es referien les parts malmeses abans d'un nou procés.

En aquest procediment l'objectiu bàsic consistia en aïllar convenientment el cor del forn per assolir la més alta temperatura possible de forma homogènia. Al voltant de l'ull de sortida de la tovera, a causa de la reacció de l'oxigen de l'aire amb el carboni del carbó és on s'aconseguien les temperatures més elevades i on es fonia més eficientment l'escòria; altrament, la zona de la massa del metall que estava en una àrea calenta del forn, envoltada de carbons i protegida d'aquesta corrent directe d'aire, podria restar carburada; la intenció d'adaptar el producte i de disposar d'un cor de forn apte per optimitzar la separació de l'escòria, i la de crear intencionalment una esponja amb zones de ferro i acer, només seria a l'abast de comunitats siderúrgicament desenvolupades, on l'experiència i la tradició empírica possibilitaven interpretar correctament aspectes físics com el color o la capacitat de penetració de l'estri tallant en la massa calenta.

A partir dels requisits esmentats, l'evolució tipològica dels forns anirà diferenciant-se arquitectònicament (tipus de construcció, dimensió, materials, etc.) com a expressió de la diversitat cultural i, progressivament, incorporarà millores tècniques que facilitin la separació de l'escòria, com l'obertura de canals d'evacuació, i el posterior treball del metall.

L'estudi dels baix forns ha portat a diverses classificacions basades principalment en la morfologia de les instal·lacions, les característiques tècniques i la seva eficàcia metal·lúrgica. En aquest sentit, i a partir dels diversos investigadors, semblen existir tres modalitats de forn conceptualment diferenciades per les solucions vers l'eliminació de l'escòria i, per tant, per la qualitat del producte resultant, els quals poden presentar múltiples variacions arquitectòniques, cronològiques i espacials: el baix forn de fossar simple i

²⁰³ CAVALHO, J. (1991) "O ferro na ...", op.cit. 2, p. 127

sense separació d'escòria, el baix forn amb pou d'escòria i el baix forn amb evacuació externa d'escòria²⁰⁴ (fig. 5).

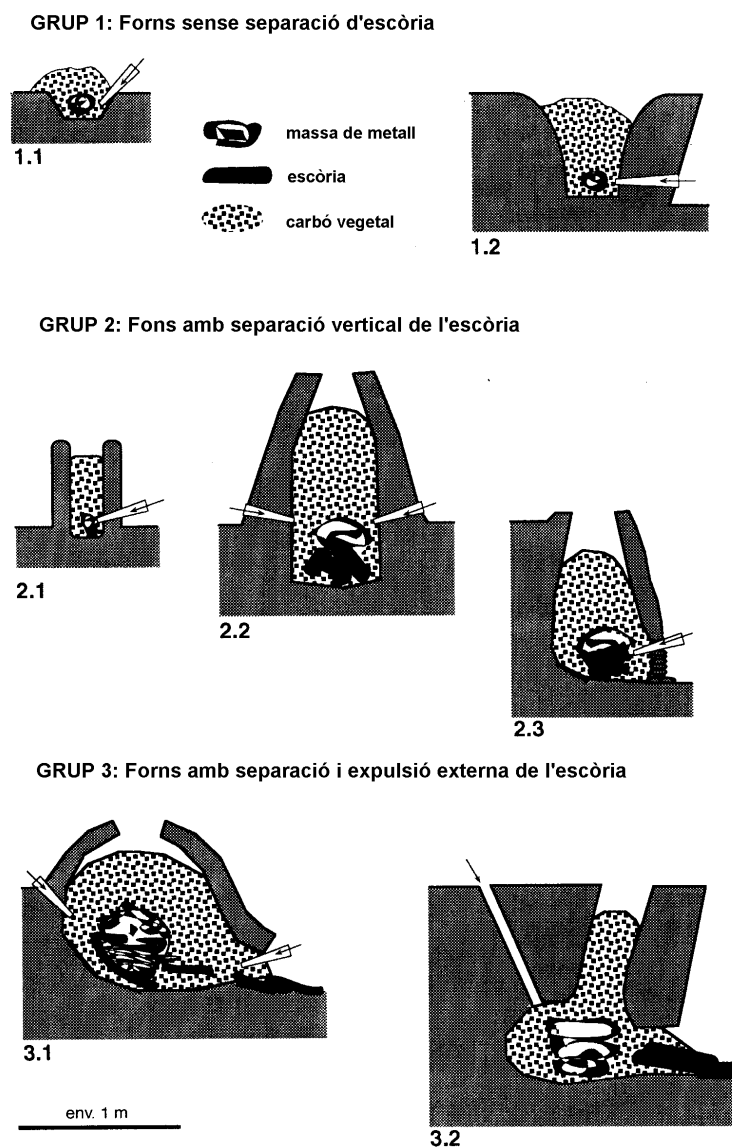


Fig. 5. Models de baix forn existents des d'època protohistòrica (a partir de Seernels, 1998, p.16, fig.10).

El baix forn de fossar simple i sense separació d'escòria²⁰⁵, també conegut com a *bowl furnace*, es caracteritza per ésser una simple cubeta excavada

²⁰⁴ CAVALHO, J. (1991) "O ferro na ...", op.cit. 2, p. 129-132

PLEINER, R. (1993) "Early bloomeries in ...", op.cit. 55, pp. 181-183

SEERNELS, V. (1998) "La chaîne opératoire de la sidérurgie ancienne", *Recherches sur l'économie du fer en Méditerranée nord-occidentale*, pp. 15-17

sense cap mena de coberta o, en el cas de que en porti, amb una superestructura d'argila refractària, de forma generalment hemisfèrica i oberta, i una única entrada superior. Unes parets perimetrals, les corresponents a la cúpula si aquesta existís, conformarien el cos, funcionant com aïllament bàsic per a permetre el manteniment d'una temperatura suficient per a la reducció. Altrament, en aquest cas, la superestructura havia de destruir-se cada cop que volia recuperar la producció i refer-se per a cada nova reducció.

Per les característiques de la infraestructura, es considera que no superava els 1000°-1100° C, i s'obtenia una esponja de ferro i/o acer bruta amb les inclusions no metàl·liques de l'escòria produïda al reaccionar part dels òxids del mineral (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO) amb la ganga d'aquest. L'obtenció d'un masser sense cap mena de decantació obligava a un posterior i exhaustiu martelleig per extreure l'escòria de la matriu metàl·lica i, purificant el metall, aconseguir la barra - *loupe* o, com a segona opció, separar els nòduls metàl·lics de l'escòria i tornar a escalfar-los conjuntament per, a la fi, forjar la barra.

El diàmetre del cor o interior del forn de la major part de les estructures identificades podia mesurar entre 0,40 i 0,60 m., mides que possibilitaven la finalitat d'assolir temperatures més altes i homogènies, essent, per aquest motiu, estructures amb baixa capacitat d'acumulació de combustible i mineral. Altrament, l'extrapolació de càlculs actuals sobre les característiques tècniques d'aquests models primaris assenyalen que permetien una productivitat del 15-18% de metall a partir del mineral inicial de càrrega²⁰⁶.

²⁰⁵ Correspondria al model de "forat simple" de Daremberg-Saglio, el "clot al sòl" i "forn amb cúpula" de Coghlan, el "A 1" de Cleere, el "forn de vas - *bowl furnace*" de Tylecote, el model "forn de cúpula - *domed furnace*" de Pleiner i Mohen (si porta coberta) i el model "*groupe 1*" de Seernels.

DAREMBERG, C; SAGLIO, S. (1896) *Dictionnaire des Antiquités...*, op.cit. 2, p. 1088-1090

CLEERE, H. (1972) "The classification of early iron smelting furnaces", *T.A.J.*, LII, pp. 21-23

COGLAN, H.H. (1956) *Prehistoric and Early Iron in the Old World*, p. 86

MOHEN, J.P. (1992) *Metalúrgia ...*, op.cit. 2, p. 181

PLEINER, R. (1993) "Early bloomeries in ...", op.cit. 55, fig. 2

PLEINER, R. (1988) "Les débuts de la métallurgie du fer chez les Celtes", *Les Princes celtes et le Méditerranée*, p. 188

TYLECOTE, R.F. (1987) *The early history...*, op.cit. 194, p. 151

SEERNELS, V. (1998) "La chaîne opératoire...", op.cit. 204, p. 16

²⁰⁶ PLEINER, R. (1988) "Les débuts de ...", op.cit. 205, p. 182-184

TYLECOTE, R.F. (1987) *The early history ...*, op.cit. 194, p. 41

El baix forn amb pou d'escòria ²⁰⁷, o *slag pit furnace*, es caracteritza per evacuar l'escòria cap una zona del forn inferior del cor del forn, generalment a una fossa. Aquest fet és possible ja que les condicions del forn permeten separar la major part de l'escòria de la massa de metall:

- s'assoleixen més altes temperatures a l'interior del forn aixecant parets més altes i reduint el diàmetre de la base;
- s'optimitza el flux d'aire, millorant el cabal d'entrada, sigui forçat o natural, i adequant la inclinació de les toveres o accessos;
- es situa l'entrada d'aire a una cota superior al fons del forn, provocant que l'escòria es separi al líquar i es dipositi en el punt més baix de l'estructura; aquesta millora tècnica variaria el concepte d'ús del fons del forn, passant d'ésser el punt de formació del masser a recipient de les seves impureses no metàl·liques.

El model característic descrit correspondria a una superestructura cilíndrica i oberta, d'alçada baixa (60-100 cm), amb una fossa de 0,35 – 0,30 m. de diàmetre i 0,45 – 0,50 m. de fondària, toveres a la base de la paret, per sobre del nivell del sol, on es formaria l'esponja. Tanmateix, aquest model de forn amb pou d'escòries necessitava buidar-se quan estava ple, fet pel qual era precís enderrocar com a mínim una part de l'estructura.

Aquest senzill procés de decantació de l'escòria líquida permetria d'obtenir major rendiment del forn, essent possible aprofitar vetes de mineral més pobre, amb una productivitat aproximada del 30% de metall a partir del mineral inicial de càrrega ²⁰⁸. Produïa masses de ferro i/o acer heterogènies de petita grandària, suficientment netes per, amb un martelleig limitat, transformar-les en *loupes* o barres preparades per ésser forjades.

²⁰⁷ Correspondria al model "vertical" de Coghlan, el "A 2" de Cleere, el "forn vertical o *slag pit furnace*" de Tylecote, el model "forn de xemeneia" de Pleiner i el model "*groupe 2*" de Seernels i al "*bas-fourneau à scorie piégées*" de Mangin-Keesmann-Birke-Ploquin.

CLEERE, H. (1972) "The classification of ...", op.cit. 205, pp. 21-23

COGHLAN, H.H. (1956) *Prehistoric and Early...*, op.cit. 205, p. 86

MANGIN, M. et alii (1992) *Mines et Métallurgie chez les Éduens. Le district sidérurgique antique et médiéval du Morvan-Auxois*, p. 322

MOHEN, J.P. (1992) *Metalúrgia ...*, op.cit. 2, p. 181

PLEINER, R. (1996) "La primitiva producción ...", op.cit. 2, pp. 3-5

TYLECOTE, R.F. (1987) *The early history...*, op.cit. 194, p. 151

SEERNELS, V. (1998) "La chaîne opératoire...", op.cit. 204, p.16

²⁰⁸ PLEINER, R. (1988) "Les débuts de ...", op.cit. 205, p. 182-184

MOHEN, J.P. (1992) *Metalúrgia ...*, op.cit. 2, p. 181

El baix forn amb evacuació externa d'escòria ²⁰⁹, conegut també com a *tap slag furnace*, es caracteritza per separar l'escòria de la massa de metall i drenar-la a l'exterior a través d'una sortida al nivell inferior de l'estructura. La diferència tècnica amb el baix forn de separació interna es troba en la substitució de la fossa per, aprofitant igualment la decantació de l'escòria al líquid, un canal d'evacuació fora la infraestructura; altrament, l'evacuació externa d'escòria també fa necessària l'entrada d'aire a nivell superior del fons del forn, no existint diferències notables d'eficàcia entre ambdós. Funcionalment, però, significava una millora que, en comparació al forn amb pou intern, no calgués enderrocar l'estructura per a netejar-la d'escòria.

Com a evolució dels models precedents, s'alça notablement la xemeneia i s'estilitza l'estructura cilíndrica, permetent major tiratge, alhora que augmenta el volum del cor, amb diàmetres aproximats de 1 m., per a disposar de major capacitat

A causa de les característiques de drenatge, es succeeixen les variants del model bàsic, que perduraran al llarg del posterior mil·lenni. S'aprofiten desnivells naturals per gaudir de la verticalitat dels marges, facilitant la càrrega de combustible i mineral, la descàrrega de l'esponja i l'entrada d'aire natural; d'altres models substituïren el sot i el cor del forn per estructures recolzades a murs.

Historiogràficament s'han considerat els tres models de baix forn precedents com linealment evolutius. Tanmateix, les evidències arqueològiques indiquen el diferent grau d'evolució tecnològica i siderúrgica i, per tant, la possible sincronia de tots els tipus de baix forn coneguts en dependència de la cultura local, que determinaria identificar un baix forn de fossar simple geogràficament proper a un d'evacuació d'escòries de diferent filiació cultural.

²⁰⁹ Correspondria al model "forn en cuba" de Daremberg-Saglio, el "B" de Cleere, el "*tap slag furnace*" de Tylecote, el model "forn de xemeneia" de Pleiner i el model "*groupe 3*" de Seernels i al "*bas-fourneau à scorie coulée*" de Mangin-Keesmann-Birke-Ploquin.

DAREMBERG, C; SAGLIO, S. (1896) *Dictionnaire des Antiquités...*, op.cit. 2, p. 1090-1092

CLEERE, H. (1972) "The classification of ...", op.cit. 205, pp. 21-23

MANGIN, M. *et alii* (1992) *Mines et Métallurgie*, op.cit. 207, p. 322

MOHEN, J.P. (1992) *Metalúrgia ...*, op.cit. 2, p. 181

PLEINER, R. (1996) "La primitiva producción ...", op.cit. 2, pp. 3-5

TYLECOTE, R.F. (1987) *The early history...*, op.cit. 194, p. 151-153

SEERNELS, V. (1998) "La chaîne opératoire...", op.cit. 204, p.16

El model prototípic de baix forn de fossar simple correspon als clots de Hüttenberg (Caríntia) ²¹⁰, amb cronologia del s. VI-V a.C., que també es troba a diferents indrets d'Europa i Proper Orient en cronologies similars o més tardanes ²¹¹; la seva simplicitat tècnica possibilitaria una llarga perdurada en emplaçaments estacionals o no especialitzats.

Model suposadament més modern que l'anterior i de llarga perduració fins a l'alta edat mitjana en els pobles "bàrbars" de l'altre costat del *limes*, el baix forn amb pou d'escòria és prou estès per Europa durant la segona Edat del Ferro ²¹². Amb tot, aquest model és també present al Proper Orient, amb filiació assíria, en cronologies dels s. VII – VI a.C. ²¹³

Els baix forns amb evacuació externa d'escòria, si bé tecnològicament més evolucionats que la resta, són presents a Toscanos (Màlaga) en cronologies de s. VII a.C. ²¹⁴, i, a ben segur, a la resta d'establiments colonials fenicis de similar datació.

En paral·lel als baix forns, s'interpreta l'existència de llars obertes dedicades a la postreducció i forja del producte de la reducció (**fig. 6**), en analogia antropològica a les fornals medievals i modernes ²¹⁵.

²¹⁰ Excavat al llarg del s. XIX, consta d'un conjunt de simples forats, agrupats en parelles, excavats al sòl. Del grup millor conservat, es delimitaren dos forns: el primer 1.5 m. de diàmetre i 0.6 m. de fons per torrat del mineral (fragments de quars i mineral, sense escòria); al segon, de 1.3 m. de diàmetre i 1 m. de fons, és on es feia la reducció, ja que hi havia massa de ferro a mig reduir, i escòries amb 50-60% de fe, al fons d'argila cremada. Tenia toveres ceràmiques de 11 cm. de llarg, 2.5 de diàmetre i 1 cm. de gruix.

DAREMBERG, C.; SAGLIO, S. (1896) *Dictionnaire des Antiquités...*, op.cit. 2, p. 1088-1089

²¹¹ Entre d'altres indrets a la península, i a part dels exemples catalans (consultar cap. 2), és destacable pel seu nivell d'estudi el baix forn de fossar simple de La Oruña (Moncayo) (s. IV-II a.C.).

HERNÁNDEZ, J.A.; MURILLO, J.J. (1985) "Aproximación al estudio de la siderurgia celtibérica del Moncayo", *Caesaraugusta*, 61-62, pp. 181-184

²¹² R. Pleiner considera que és el forn més comú en el darrer mig mil·lenni a.C. essent present de forma genèrica en contextos indoeuropeus (eslaus, celtes, ilírics, escandinaus).

PLEINER, R. (1997) "Les primeres produccions de ferro a l'Europa Central i Oriental", *Cota Zero*, 13, pp. 73-77

²¹³ ROTHENBURG, B.; TYLECOTE, R.F. (1991) "A unique assyrian iron smithy in the Northern Negev (Israel)", *IAMS*, 17, pp. 11-14

²¹⁴ KEESMANN, I.; NIEMEYER, H.G. (1985-1989) "Un centro primitivo ...", op.cit. 82, pp. 100-101

²¹⁵ SIMON, J. (1992) *La farga catalana*, op.cit. 175, pp. 38-45

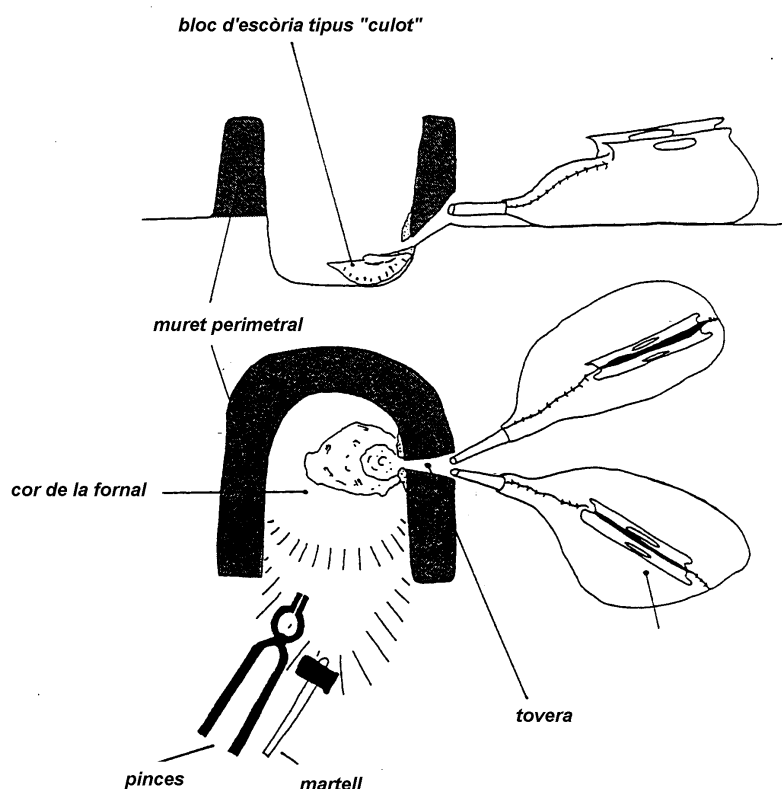


Fig. 6. Llar oberta per treballs de postreducció o forja (a partir de Seernels, 1993, fig.6).

Les llars de forja, o *bas foyer*²¹⁶, són estructures de combustió per la purificació i/o forja de l'esponja; pot ser una estructura alçada o una simple fossa, circular ovalada o quadrangular, no major de 1 m. de llargària i d'una fondària d'entre 0,20 – 0,40 m.; en els models arran de sòl, pot tenir petits murs perimetrals, mai tancant en forma de cúpula ja que impediria el continuat moviment i treball mecànic, i una entrada forçada d'aire. Poden ésser classificades per grups tipològics, sense distinció cronològica, en funció a l'existència i disposició dels murs perimetrals, la localització de la ventilació forçada o la fondària de la cubeta²¹⁷.

Aquestes estructures pogueren existir com a elements individualitzats o ésser una simple reutilització del baix forn, un cop amortitzat de la reducció i amb la cúpula oberta per extreure la massa treballada. Tanmateix s'accepta que si bé els forns de reducció poden ser distanciats dels poblaments i propers als punts

²¹⁶ SEERNELS, V. (1993) *Archéométrie des scories ...*, op.cit. 201, p. 56

²¹⁷ SEERNELS, V. (1998) "La chaîne opératoire...", op.cit. 204, pp. 28-29

d'extracció del mineral, les llars de forja o fornals poden trobar-se al mateix hàbitat, properes al consumidor final.

La distribució de llars de postreducció / forges sembla relativament comuna en cronologies protohistòriques. La simplicitat tècnica possibilitava l'existència a molts nuclis de poblament d'infraestructures d'aquest tipus, que podien utilitzar-se com a centres de reparació o per treballar amb *currency bar* provinents de centres siderúrgics que disposaven de mineral i forns de reducció adjacents ²¹⁸. Tanmateix, s'interpreten també associades a estructures de reducció ²¹⁹.

Amb l'existència de forns i llars de forja era necessari un ampli conjunt d'atuellis i complements, innats de l'activitat artesana del treball del ferro. Les tipologies d'eines són perfectament conegudes tan per la iconografia clàssica com pel registre arqueològic ²²⁰, i es troba formada per encluses, martells, maces i pinces.

Altres infraestructures identificades vinculades al procés siderúrgic són bassals o banyeres, piques per rentar, esteses per a torrar, manxes de pell, toveres d'argila i dipòsits de combustible. La ceràmica present, en forma de meitats d'àmfora encastades en el paviment o vasos de diferent capacitat, es vincula a la utilització de diversos productes líquids, amb diversa temperatura i característiques, durant els tractaments realitzats en la forja.

²¹⁸ La seva presència es troba prou estesa al nord-est peninsular i a l'àrea cèltica (consultar cap. 1.2.)

²¹⁹ El fet de que els baix forns de fosa simple de Hüttenberg (Caríntia) estiguin col·locats en parelles, fa suposar a R. Tylecote que un era de reducció i l'altre de forja.

TYLECOTE, R.F. (1987) *The early history...*, op.cit. 194, p. 46

²²⁰ De llarg esment en la historiografia a partir de les cites d'Homer i els diversos vasos de figures negres i figures roges grecs, Plini el Vell diu que l'utilatge de ferrer (enclusa, martells i pinça) fou inventat per Kinyras de Xipre, el qual realitzava tractaments específics als estris per adequar-los a la seva tasca. Apart de l'utilatge identificat al nord-est peninsular i l'àrea cèltica (consultar cap. 2), són nombroses les troballes d'utils en context grec i semita.

AULADELL, J. (1992) *Origen i estudi ...*, op.cit. 168, pp. 28-36

DAREMBERG, C; SAGLIO, S. (1896) *Dictionnaire des Antiquetes...*, op.cit. 2, p. 1088

MOHEN, J-P. (1980) *L'age du Fer...*, op.cit. 1, p. 45

MOHEN, J-P. (1992) *Metalúrgia Prehistòrica*, op.cit. 2, p. 181

NEUBURGER, A. (1939) *The technical arts...*, op.cit. 2, p. 48.

PLEINER, R. (1969) *Iron working in ...*, op.cit. 10, pp. 35-36.

TYLECOTE, R.F. (1987) *The early history...*, op.cit. 194, p. 45.

4. LA CADENA SIDERÚRGICA

Amb la denominació de cadena operatòria de la siderúrgia s'identifica el conjunt d'etapes successives del procés que es porta a terme per a convertir el mineral de ferro, com a matèria primera, en l'objecte de metall, producte final. La tipificació d'aquest seguit d'operacions tècniques fou la base sobre la qual s'estructurà l'organització dels treballs vinculats en la metal·lúrgia del ferro, i què, des de l'inicial descoberta de les possibilitats tecnològiques de l'aprofitament del mineral, regiren el desenvolupament econòmic i cultural de les societats protohistòriques vinculades a la producció i comerç d'estris de ferro i acer ²²¹. Tanmateix, la primera implantació del procés de la cadena siderúrgica en grups socials autosuficients generaria en produccions a molt petita escala, amb inicials especialitzacions en l'extracció, la reducció o la forja, i adaptació de les mateixes infraestructures en cadascuna de les tasques; la generalització en l'ús del metall, i la seva aplicació en bona part de les activitats quotidianes, obligaria a noves reorganitzacions d'assumpció de tasques referents a l'activitat siderúrgica; en aquest sentit, caldria una col·laboració exògena al clan familiar, amb estructures tribals o suprafamiliars que permetessin l'articulació de la nova necessitat ²²².

La descripció de la cadena siderúrgica en les societats protohistòriques ²²³ es caracteritza per la consecució de l'esmentat procés teòric de naturalesa fisicoquímica, intrínsec per la transformació del mineral en l'objecte final, portat a terme amb una multiplicitat de procediments interactius propis de les molt diverses societats atomitzades que, amb diferent bagatge sociocultural, les executa en etapes d'evolució tecnològica individualitzada. Altrament, les dificultats implícites de la investigació arqueològica presenten una parcialitat no suficientment representativa de la pluralitat dels procediments que defineixen el procés; en el mateix sentit, la simplificació en la interpretació històrica equipara

²²¹ Consultar cap. 1.

²²² Consultar cap. 1.3.2.

²²³ FLUZIN, P.(1983) "Notions élémentaires de sidérurgie", *Metallurgies africaines* , pp. 13-44.

FLUZIN, P. *et alii* (2001) "Etudes métallurgiques et thermodynamiques", *La ferrería y los molinos de Agorregui*, pp. 124-126.

SEERNELS, V. (1993) *Archéométrie des scories ...*, op.cit. 201, pp. 9-17.

SEERNELS, V. (1998) "La chaîne opératoire...", op.cit. 204, pp. 7-40.

l'evolució tecnològica siderúrgica a una hipotètica successió cronològica, homogeneïtzant processos culturals prou divergents que, a la pràctica, pogueren ser o no sincrònics.

La cadena siderúrgica (**fig. 7**) es divideix bàsicament en cinc grans etapes, que abasten des del procés d'extracció del mineral fins a convertir-lo en objecte de metall: l'extracció del mineral, la seva concentració, la reducció, la postreducció (amb el refinament o purificació de l'esponja d'obtenció) i la forja. Cadascuna d'aquestes fases del procés inclou multiplicitat de procediments per a complir els objectius de l'etapa, diversificant la seva gestió en funció al grau d'especialització tècnic i social esmentat.

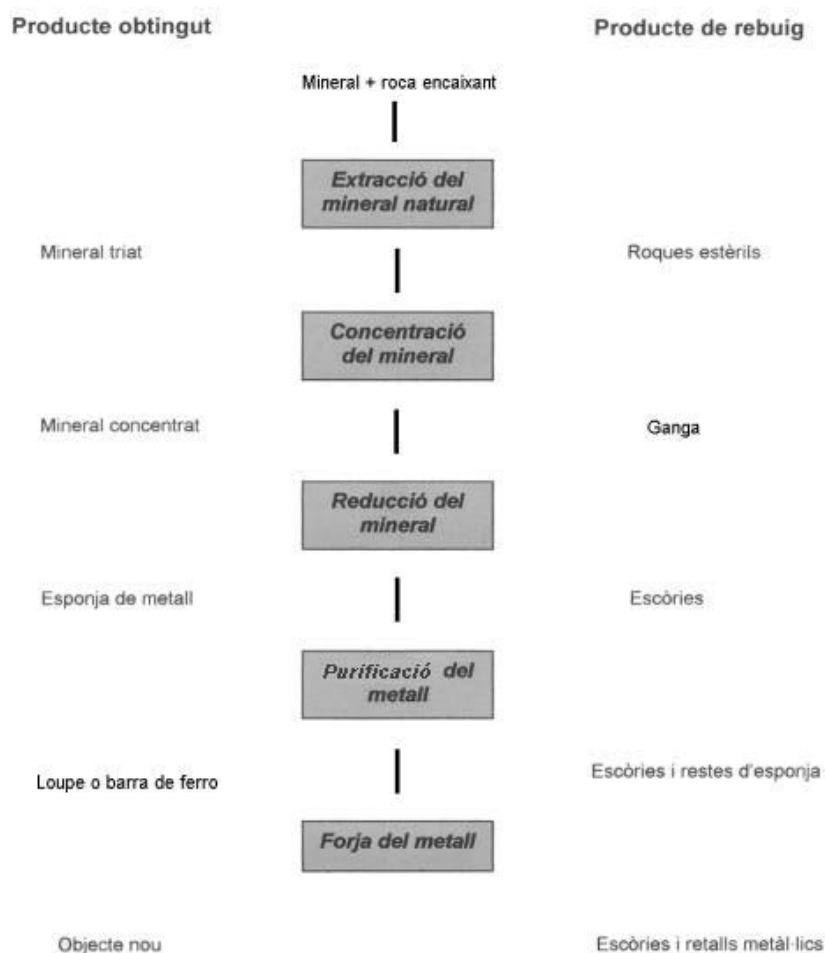


Figura 7. Restitució teòrica de la cadena operatòria de la siderúrgia en època antiga (adaptació a partir de Seernels, 1998, p.12)

El ferro és un element químic molt abundant en l'escorça terrestre (més del 5%), amb tot, a excepció del ferro meteòric, en estat nadiu no apareix gairebé mai en la natura; tanmateix, els àtoms de ferro són presents a gran nombre de minerals, fet pel qual, des d'antic, s'ha lloat l'avantatge comparatiu respecte altres metal·lúrgies ²²⁴.

No tots els minerals de ferro són siderúrgicament aprofitables, ja que la seva reducció pot ser prou difícil per ésser considerat no rendible; és el cas dels diferents silicats de ferro; d'altres, encara que rics en ferro, porten afegits elements que són perniciosos pel metall obtingut, com per exemple els sulfurs de ferro. Només els òxids, els hidròxids i els carbonats són els únics minerals emprats tradicionalment en l'obtenció del ferro. Els minerals continents de ferro són principalment els òxids anhidres, com la magnetita ²²⁵ o òxid ferrós fèrric (Fe_3O_4 , amb 72,4% teòric d'aprofitament) i l'hematites ²²⁶ o òxid fèrric (Fe_2O_3 , amb 70% d'aprofitament i ganga silícia), hidròxids o òxids fèrrics hidratats ²²⁷, com la goethita (FeOOH , amb 62% d'aprofitament) o la limonita (FeOOHH_2O , amb 50% d'aprofitament), o carbonats, com la siderita ²²⁸ (FeCO_3 , amb 48,2% de teòric aprofitament); la seva presència en la roca, en quantitat de mineral i qualitat d'aprofitament de metall, determinarà l'interès de l'explotació, considerant-se a època antiga rentable a partir del 20% d'aprofitament, essent habitual un rendiment proper al 45%. Aquesta explotació es portarà a terme, en època protohistòrica, principalment en jaciments a cel obert i a petita escala ²²⁹.

²²⁴ Consultar cap. 3.

²²⁵ La magnetita és el mineral més ric en ferro que hi ha a la natura. Es caracteritza per ésser molt dur i compacte, provocant una difícil reducció. Per aquest fet, a priori, no s'emprava habitualment en els forns més antics i, quan es feia, es procedia prèviament a una torrefacció oxidant per a convertir l'òxid ferrós fèrric Fe_3O_4 en òxid fèrric Fe_2O_3 .

²²⁶ L'hematites és el mineral de ferro més abundant i, pel seu aprofitament i comportament en el forn, el més emprat. El mineral pot presentar-se en formes diferents, fet pel qual en època antiga no totes eren identificades. La més comuna i coneguda és l'hematites roja.

²²⁷ Els òxids fèrrics hidratats, goethita i limonita, són els més freqüents a la natura dins la gamma d'òxids fèrrics amb molècules d'aigua combinades. De tots dos, la major abundància i ús correspon a la limonita, també coneguda com hematites *parda* o ferro dels pantans, la qual es presenta en diferents varietats.

²²⁸ La siderita o carbonat de ferro és un mineral poc abundós que es presenta en un ventall reduït de varietats. Té l'avantatge que a determinada temperatura es descompon en òxid ferrós i diòxid de carboni, el que afavoreix la consecució de la reducció del mineral. També el mineral pot ésser calcinat prèviament; la calcinació és un procediment similar a la torrefacció o torrat, amb la diferència d'assolir temperatures més altes (al voltant de 500° C la torrefacció i de 800° C la calcinació) i sense excés d'oxigen.

²²⁹ Les necessitats, condicions i paràmetres d'aprofitament variaven segons la demografia dels assentaments humans, explotant afloraments, vetes superficials, mangreres o galeries subterrànies i mines locals de reduïda producció però suficients per abastar comunitats amb un

A partir de l'extracció del mineral s'inicien un seguit de procediments mecànics amb la finalitat d'enriquir-lo al separar la roca o el sediment del que és pròpiament el mineral. Amb aquesta intenció es podia rentar curosament el producte extret i decantar-lo per gravetat, ja que les partícules de la ganga, molt menys denses, suraven per sobre les del mineral; en igual sentit, i en el cas de minerals durs, es trencaven els blocs extrets i es fragmentava, triant aquelles parts que, per experiència, pogueren identificar com a mineral de ferro.

Efectuada una inicial selecció de mineral, determinats procediments incloïen la tasca consistent en un tractament previ d'escalfament, on s'elimina l'aigua que pogués tenir atrapat, el sofre, si en tenia, i dissocia els carbonats, a més de crear una xarxa d'esclètxes en els fragments del mineral, la qual facilitarà l'operació de reducció. Aquest procediment necessitava d'una estructura de combustió simple i oberta on, alimentada pel combustible vegetal i al llarg de diverses hores, es produïen unes reaccions en el mineral de ferro per afavorir la seva posterior reducció.

Mitjançant un procediment consistent en la cocció del mineral concentrat en un forn en condicions reductores, es portava a terme pròpiament el procés de la reducció ²³⁰. L'obtenció del metall possibilitaria les posteriors etapes de postreducció i forja ²³¹, amb els quals de l'esponja bruta de metall s'assoliria el definitiu objecte de ferro / acer.

La historiografia moderna ²³² assenyala com habitual el reciclatge dels objectes de ferro un cop amortitzats en el seu ús, de forma paral·lela a la vella tradició de la metal·lúrgia del coure i del bronze. Aquesta reutilització implicaria un nou pas per convertir-los en una massa informe de ferro net, una *loupe* o barra de metall, similar a l'originària del primer objecte. A partir d'aquesta eliminació de tota característica prèvia, a alta temperatura, s'iniciarien novament tots els

relativament reduït nombre d'habitants. El caire antieconòmic d'aquestes menes de mineral, segons els paràmetres moderns, impossibilita establir registres d'explotacions mineres antigues.

²³⁰ Consultar cap. 4.1.

²³¹ Consultar cap. 4.2. i 4.3.

²³² SEERNELS, V. (1998) "La chaîne opératoire...", op.cit. 204, p. 12

tractaments tèrmics, termoquímics i mecànics per conformar el nou estri amb les seves propietats mecàniques.

L'heterogeneïtat sincrònica de tradicions siderúrgiques converteix en factible i probable aquest procediment, en determinades àrees, i innecessari o desconegut en d'altres. A diferència de la metal·lúrgia del coure o del bronze, l'abundància natural de la matèria prima no predisposa al reciclatge; altrament, la simplicitat i baixes temperatures per fondre el coure i l'estany no existeixen en el treball del ferro. En aquest, i fins a èpoques modernes, s'ha identificat el reciclatge dels objectes de ferro amb la seva reparació, per a la qual l'objecte havia de passar per la forja i, sense tornar a l'estat de massa informe, sotmetre's als tractaments i a les temperatures necessàries per redreçar-lo, soldar-lo o modificar les seves propietats mecàniques.

4.1. EL PROCÉS DE REDUCCIÓ. EL DIAGRAMA Fe-C

Si bé les etapes primeres de la cadena siderúrgica han significat una modificació prèvia del mineral en estat natural, la reducció permetrà transformar-lo en metall. El fet que en estat mineral el ferro es troba acompanyat per altres elements, obliga a procedir al tractament termoquímic necessari per aïllar el metall. En aquest sentit, s'extreu de l'estructura cristal·lina els àtoms d'oxigen i d'altres elements per alliberar els àtoms de ferro, els quals podran agrupar-se formant la xarxa metàl·lica; el procediment serà possible amb unes condicions on es generi suficient temperatura i hi sigui present un agent reductor.

El mineral es troba acompanyat de ganga, la quantitat de la qual depèn de la eficiència del procés anterior de concentració. La ganga es troba composta d'òxids d'altres metalls, que formaran part de l'escòria ²³³, però principalment de sílice; la combinació de part del mineral semireduït, l'òxid ferrós, i l'òxid de silici comportarà la característica escòria de reducció formada per silicat:



La tecnologia del forn determinava el volum d'escòria que es barrejava amb el metall en el producte de la reducció, el masser. Era necessari assolir una temperatura prou elevada per fondre l'escòria, al voltant d'uns 1200° C, si no es volia obtenir una esponja de metall impur d'estructura porosa, mixtura de ferro, escòria i carbó ²³⁴. Altrament, la infraestructura havia de preveure l'evacuació, fos en un pou intern o cap a l'exterior, de l'escòria líquida, per evitar que aquesta es barregés amb el metall o es convertís en un casquet adherit a l'esponja de ferro i calgués un treball mecànic extra per a la seva separació, fet

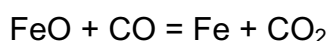
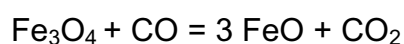
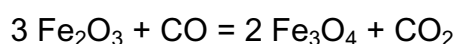
²³³ Les escòries de reducció estan formades per, de forma majoritària, faialita (Fe₂SiO₄) i òxid ferrós – wustita (FeO) La presència minoritària d'altres elements en la ganga (Mn, Ca, Mg, Al, P, S), majorment en forma d'òxids, determinarà les característiques de l'escòria i afectarà al metall. Intencionadament, pot emprar-se òxid de calç per preservar l'òxid ferrós, obtenir, per tant, major productivitat en metall, i ésser el seu substitutiu en la formació del corresponent silicat de l'escòria. La presència de potassi o de sofre en les escòries revelaria l'origen vegetal o mineral del combustible. Altrament, la reducció del possible òxid de fòsfor present en determinats minerals afectaria a la qualitat del metall, on aquest s'incorporaria a la matriu metàl·lica.

²³⁴ SEERNELS, V. (1993) *Archéométrie des scories...*, op.cit. 201, p.4

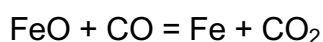
que s'aconseguia fragmentant la massa obtinguda i separant els nòduls de metall per tornar-los a reunir en el procés de forja. Tot i l'aplicació de les esmentades millores tècniques, parcialment sempre quedava atrapada l'escòria en l'esponja de ferro en forma d'inclusions no metàl·liques que, d'igual natura que l'escòria expulsada, obligava a purificar la massa a través del treball mecànic durant la postreducció. Amb tot, el producte final era una massa de ferro pur o de ferro i acer de contingut heterogeni de carboni, sempre en dependència de les característiques del forn i l'eficiència del procés en el manteniment de temperatures prou elevades.

A temperatures molt inferiors a les de fusió de l'escòria s'inicia la reacció química que finalitza amb la formació del metall, amb la participació de l'oxigen de la corrent d'aire aportada i del carboni del combustible com agent energètic (tèrmic) i reductor (químic) (**fig. 8**). La presència de carboni en excés, en un sistema tancat, permetia que a aquestes temperatures es poguessin reduir tots els òxids a ferro metàl·lic, si bé l'augment de la temperatura de forma constant facilitava el procés de reducció.

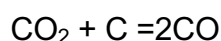
En la reducció dels òxids de ferro pel monòxid de carboni, que es produeix de forma successiva a partir de les determinades condicions de pressió parcial del gas en equilibri i temperatura, es porten a terme les següents reaccions:



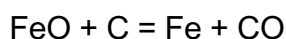
Aquestes reaccions es faciliten a mesura que s'assoleix major temperatura i aquesta es manté, que el monòxid de carboni és abundant i que el temps de contacte entre l'ambient reductor, provocat pel gas, i el mineral és més perllongat. La reducció de l'òxid ferrós a Fe metàl·lic comença a temperatura de quasi 1000° C i, teòricament, té lloc segons la següent reacció:



Com que el CO₂ format és inestable a aquestes temperatures, una gran part reacciona amb el carboni del carbó:



La suma d'aquestes dues reaccions dóna el següent:



Reacció que permet afirmar que l'òxid ferrós és reduït pel carboni.

Paral·lelament, la reducció del mineral es fa possible perquè la combustió del carbó i l'aire induït provoca la reacció entre carboni i oxigen per produir monòxid o diòxid de carboni, en dependència de l'excés de carbó i la temperatura, on el CO actua com agent reductor:

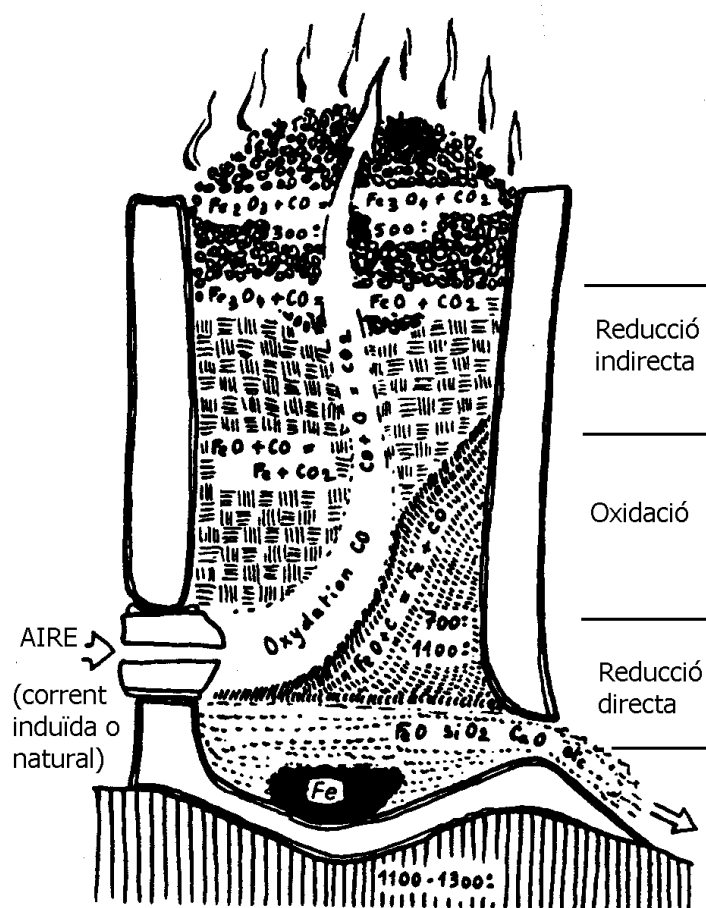
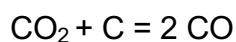
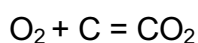


Figura 8. Esquema bàsic de la reducció del mineral de ferro, representat a partir del procés teòric en un model de forn tipus amb sistema d'evacuació d'escòries i amb les condicions de temperatura necessàries per la fosa de les esmentades escòries (adaptació de Mohen, 1980, p. 42, fig. 15).

Durant la protohistòria i fins a època moderna, les transformacions que sofria el mineral durant la seva reducció, la producció del metall i les seves propietats només podien ésser conegudes de forma empírica, per la transmissió de la tradició tecnològica en les comunitats siderúrgiques, l'aprenentatge pràctic i l'experiència a través del binomi encert – error. En el mateix sentit, només aspectes sensorials com el color de l'esponja, el so vers el seu treball mecànic o la seva capacitat de deformació permetien controlar els estats alotròpics del ferro, els quals actualment poden definir-se teòricament a través del diagrama de fase ferro – carboni, que determina l'equilibri termodinàmic del ferro i el seu aliatge amb carboni (fig. 9).

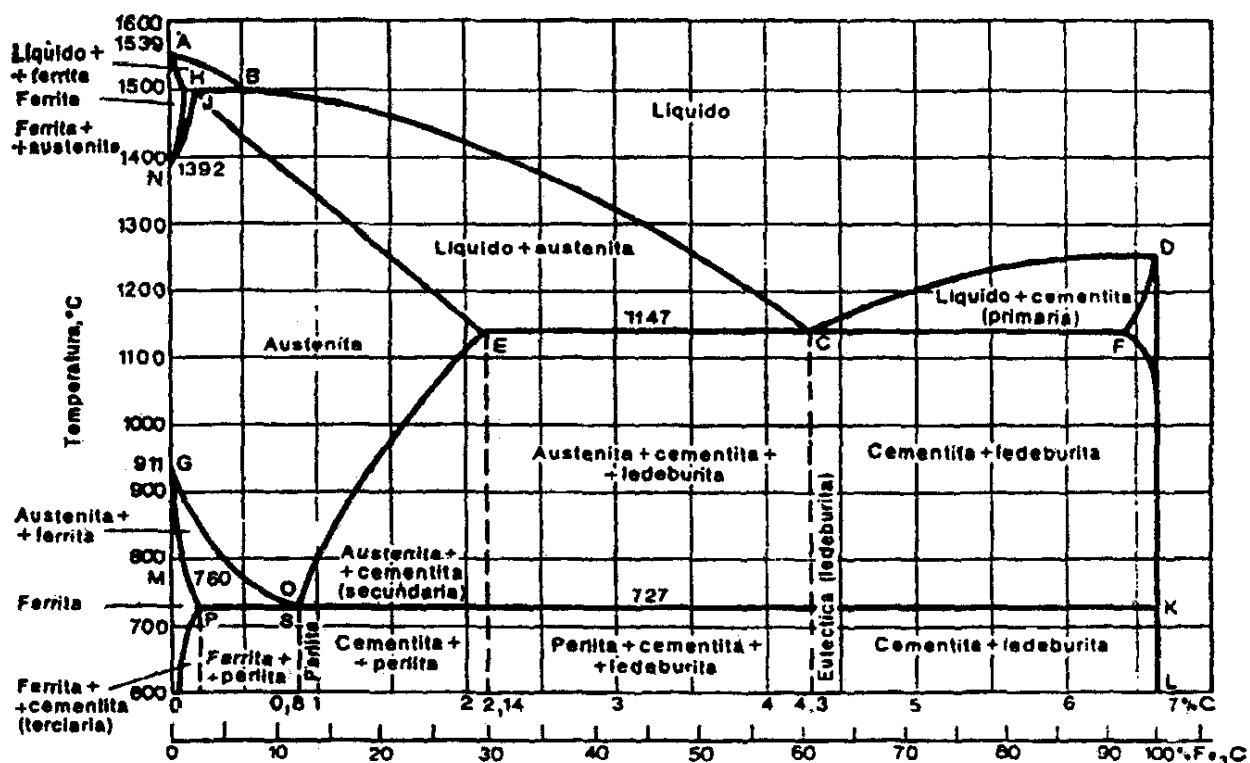


Figura 9. Diagrama d'equilibri del sistema binari ferro – carboni (de Guliaiev, 1974, t.1, p. 165).

Amb el diagrama de fase o d'equilibri és possible definir les característiques del metall que podien obtenir, les condicions per l'aliatge amb el carboni i les peculiaritats que es desenvolupaven en el procés de reducció. El diagrama comprèn des del ferro pur fins el 6,67% C, que és el contingut de saturació de l'aliatge entre el ferro i el compost carbur de ferro (Fe_3C); entre els dos marges

es troba primer l'acer i, amb major carburació, la fosa ²³⁵. En aquest sentit, la línia marcada pels punts ABCD correspon al límit de temperatura inferior per l'estat líquid (*liquidus*) del sistema; la línia AHJED al límit superior de l'estat sòlid (*solidus*).

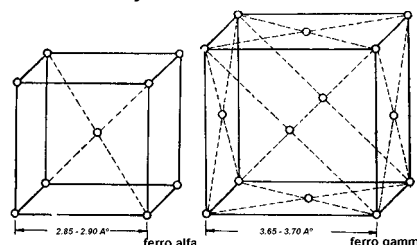
Acceptant-se el mètode directe com l'únic tecnològicament controlable en època antiga, el ferro pur era teòricament impossible d'obtenir en forma líquida, ja que els forns no eren capaços d'assolir la seva temperatura de fusió (1538° C), segons interpretació generalitzada. En estat sòlid, el ferro es troba en dues modificacions de xarxa cristal·lina diferenciada o estats alotròpics, el ferro α i el ferro γ ²³⁶.

El ferro α existeix fins a temperatura de 912° C. A partir d'aquesta temperatura i fins els 1392° C, el ferro sòlid es transforma en la xarxa cristal·lina del ferro γ . A temperatures superiors, difícilment assolibles per la siderúrgia preromana, l'estat alotròpic del ferro tornava a ésser molt similar al Fe_{α} , si bé, i per diferenciar-lo de l'assolít per sota els 911° C, se l'anomena Fe_{δ} ²³⁷.

Altrament, es podia aliar el ferro sòlid amb el carboni del combustible ²³⁸, obtenint un producte de major duresa que el metall pur, produït per la formació del carbur de ferro Fe_3C (cementita). La solubilitat del carboni en el ferro α és pràcticament inexistent (menor que a 0,02%), essent fins a cent cops major en el ferro γ (fins al 2%), el que vol dir que a partir dels 911°-912° C de temperatura el carboni de l'agent químic es dissolt i s'alia amb el metall,

²³⁵ Tal i com s'ha esmentat (consultar cap. 3) en època protohistòrica no era emprat, com a mínim de forma generalitzada, la fosa. Aquest producte requereix processos possiblement no ben coneguts en aquelles cronologies, ja que tot i tenir un punt de fusió relativament assolible (1147° C al 4,3% C) i ésser dur, és alhora fràgil i no és factible forjar-lo o soldar-lo.

²³⁶ El ferro en estat sòlid (Fe_{α}), a temperatura inferior a 911° C, adopta la disposició de cubs centrats, amb vuit àtoms als vèrtexs i un al centre. A temperatures superiors, el ferro (Fe_{γ}) presenta la disposició d'àtoms situats en els vèrtexs i el centre de cada cara.



APRAIZ, J. (1958) *Tratamientos térmicos de los aceros*, pp. 35-37

²³⁷ GULIAIEV, A.P. (1974). *Metalografía*, t. 1., p. 160.

MOLERA, P. (1991). *Tratamientos térmicos de los metales*, p. 14-15

²³⁸ A partir d'aquest percentatge i fins el 6,67% el producte de l'aliatge és la fosa, i es precisen temperatures molt més altes no assolibles tecnològicament fins l'aplicació del mètode indirecte i de l'alt forn. Altrament, i fins a època moderna a l'occident, es practicà de forma genèrica l'aliatge del ferro amb el carboni i amb altres elements, com el nitrogen.

formant una solució sòlida anomenada austenita i que, al refredar-se i en relació al percentatge de carboni retingut, es transformarà en ferrita i perlita ²³⁹.

De la totalitat del diagrama Fe-C, que inclou des de la manca absoluta del carboni com aliatge fins a la seva saturació (6,67%), l'únic interval que possibilita la interpretació del producte obtingut pel mètode directe correspon al dels acers (entre 0% i 1,7-2% C) (fig. 10).

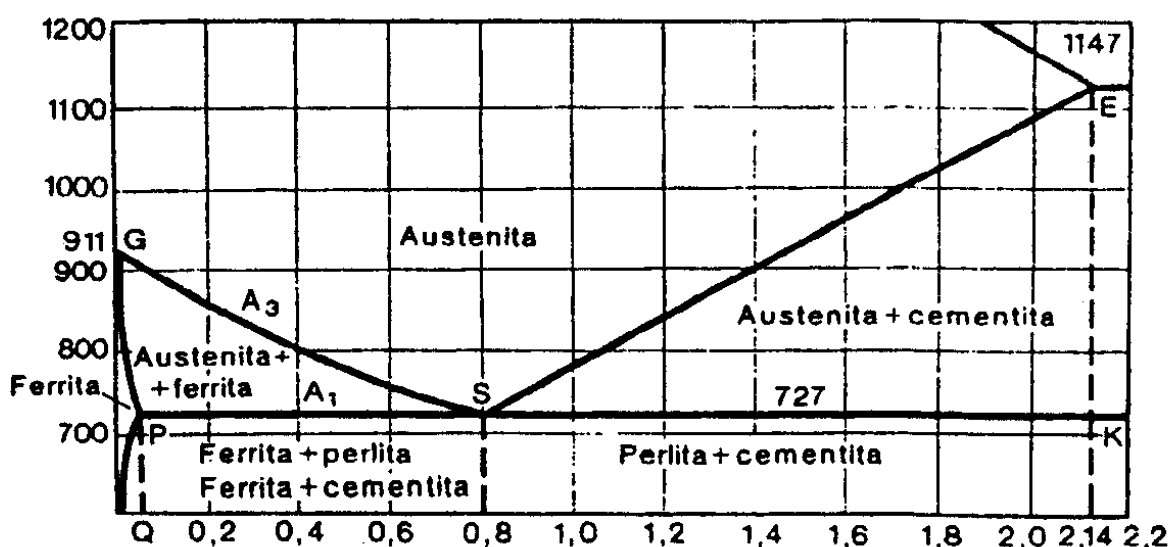


Figura 10. Zona referent a l'acer en el diagrama d'equilibri del sistema binari ferro – carboni (de Guliaiev, 1974, t.1, p. 229).

En aquesta part del diagrama, s'adverteix que l'austenita ocupa l'àrea limitada en la banda inferior per la línia GSE i que aquesta es transforma a temperatures inferiors en una microestructura heterogènia, a excepció de la zona de la ferrita (Fe_{α}) que, com a componen únic, només compren l'àrea entre els punts GPQ. Les transformacions estructurals, que ja correspondrien a l'aliatge Fe-C, són bàsicament les següents:

- la pròpia austenita (Fe_{γ}) que, en dependència del contingut de carboni, en el refredament es transforma en solució sòlida de ferrita o de ferrita i carbur de ferro;
- la ferrita (Fe_{α});

²³⁹ La ferrita serà la microestructura corresponent al ferro més pur (el ferro α) i la perlita serà la microestructura formada per làmines alternades de ferrita i cementita o carbur de ferro (Fe_3C).

- la cementita o carbur de ferro (Fe_3C);
- la perlita, barreja eutectoide de ferrita i carbur de ferro que es formen simultàniament ($\text{Fe}_\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$).

Quan partint de ferro pur, en la dissolució del carboni en el ferro s'augmenta la concentració de C, va disminuint la temperatura fins a un punt que s'anomena d'inflexió. La reacció que té lloc s'anomena eutectoide, que en el diagrama Fe – C correspon al 0,8% de carboni. Les solucions amb percentatge menor de carboni són esmentades com hipoeutectoides; les de major percentatge, i fins arribar al 1,7%, s'anomenen hipereutectoides. Les seves propietats mecàniques (duresa, resistència a la tracció i elongació) varien depenent del percentatge de C (**fig. 11**).

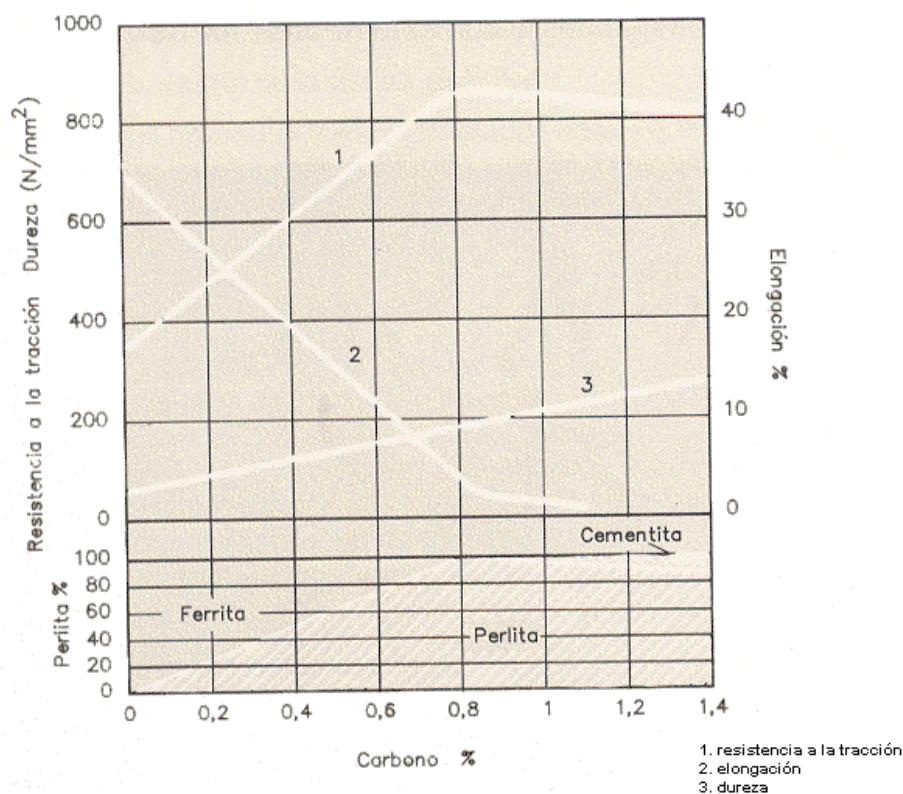


Figura 11. Propietats del ferro i l'acer segons percentatge de carboni (de Molera, 1991, p.17, f.4).

En els aliatges considerats eutectoides (0,8% C), al refredar-se l'austenita fins el punt S, dit d'inflexió, aquesta es descomposa, de cop, en ferrita i cementita, obtenint-se la perlita:



Els aliatges hipoeutectoides presenten ferrita en proporció progressivament minvant fins l'eutectoide, essent proporcional al finalitzar la transformació estructural al contingut percentual de carboni. Inversament, els hipereutectoides presenten cementita a l'iniciar-se la transformació de l'austenita amb segregació del carbur per, a partir de la temperatura eutectoide (l'horitzontal PSK), convertir-se en perlita proporcionalment al contingut de carboni. Les variacions tèrmiques i termoquímiques sofertes pel metall durant la reducció i la posterior forja caracteritzaran les microstructures identificades en l'estudi de l'objecte final.

En la mateixa part del diagrama Fe-C, la zona corresponent a l'acer, el posterior escalfament al que es pot portar el metall ve definit a partir d'uns punts esmentats com a crítics. El punt crític inferior, Ac_1 , correspon a la transformació perlita – austenita i es troba a 727°C ; el punt crític superior, Ac_3 , es troba a la línia GSE, amb temperatura en dependència del contingut de carboni, fet que suposa que amb ferro pur la temperatura sigui de 912°C i que, amb l'eutectoide, aquesta sigui de 727°C . Inversament, el refredament del metall es comporta amb els mateixos paràmetres, amb una lleu variació de les temperatures ²⁴⁰. Al punt crític superior Ac_3 també s'anomena A_{cm} o temperatura de transformació (T_{aust}). La importància de la temperatura en que es produeix el canvi absolut d'estat alotròpic es reflecteix en la morfologia de la microestructura resultant; la superació d'aquesta durant suficient temps provocarà que, un cop refredat, la grandària del gra hagi augmentat proporcionalment, o, en sentit contrari, el gra sigui petit.

²⁴⁰ La diferència entre temperatures crítiques en el refredament i l'escalfament, si bé totalment inapreciable per als antics siderúrgics, és indicadora de la resistència que oposen els sistemes cristal·lins a transformar-se. Si en el cas de l'escalfament s'anomenen A_c (del francès *chaufement*), en el cas dels punts crítics a partir del refredament, l'acrònim és A_r (del francès *refroidissement*).

APRAIZ, J. (1958) *Tratamientos térmicos de...*, op.cit. 236, p. 34

REDUCCIONS DE FERRO EXPERIMENTALS

Com pràctica experimental de caire antropològic, han estat diverses les experiències i provatures realitzades amb els mitjans i la tecnologia identificada en les troballes de forns protohistòrics. Des de l'excavació al s. XIX dels forns carintis de Hüttenberg ²⁴¹, s'intentà reproduir el procés amb el model de forn de fossa simple, el suposadament de major antiguitat, amb resultats pràcticament nuls, representatius de la dificultat d'aconseguir la reducció del mineral a partir d'infraestructures tan bàsiques com les inicialment emprades.

A partir d'inicis del s. XX, la reducció experimental del ferro es centrà en els suposats paral·lelismes existents entre el procés protohistòric i l'encara llavors vigent a les comunitats tribals de l'Àfrica subsahariana, considerant el símil etnogràfic com a suggeridor de les diferències que provocaven el fracàs de la reproducció del procés en condicions experimentals, el que induí a considerar a determinats autors que la informació aportada pels textos clàssics era incompleta, possiblement motivada pel secretisme dels artesans o per falta de coneixements tècnics de les fonts, i mancada d'una correcta interpretació ²⁴².

La reducció experimental de ferro, reproduint forns de diferent tipologia, ha estat estesa a partir del decenni dels vuitanta del s. XX, popularitzada com a metodologia pedagògica en investigacions diverses, principalment referents a complexos productius i infraestructures d'època medieval i moderna ²⁴³.

Entre les experiències més destacades figuren els treballs clàssics de R. Tylecote, a *The Institute for Archaeo-Metallurgical Studies (IAMS)* de l'Institut d'Arqueologia de Londres, i els de R. Pleiner sobre forns medievals centreuropeus, les investigacions de C. Domergue a la Muntanya Negra i a la Universitat de Tolouse le Mirail, els treballs d'E. Matian reproduint l'obtenció del ferro a Nimes, l'experimentació de Ph. Andrieux en forns de tassa i cub

²⁴¹ De datació entre els s. VI i V a.C.

DAREMBERG, C; SAGLIO, S. (1896) *Dictionnaire des Antiquités...*, op.cit. 2, p. 1081-1092

²⁴² RICKARD, T.A. (1939) "The primitive smelting...", op.cit. 2, pp. 88-101

²⁴³ CLEERE, H. (1989) "Twenty years of bloomery studies in Britain", *Archaeometallurgy of iron (1967-1987) (Liblice 1987)*, pp. 191-211

ESPELUND, A. (1989) "The operations of bloomery furnace from AD 0-500 in Mid Norway", *Archaeometallurgy of iron (1967-1987) (Liblice 1987)*, pp. 159-168

PLEINER, R. (1969) "Experimental smelting of steel in early medieval furnaces", *Památky archeologické, LX*, pp. 458-487

SARABIA, F.J. (1994) "Aproximación teórica y metalográfica a la reducción de hierro en la Prehistoria partiendo del trabajo experimental", *Trabajos de Prehistoria, 51-1*, pp. 108-109

francesos, el programa experimental d'A. Espelund amb forns del 550-700 d.C. a Noruega i les investigacions de P. Crew al *Snowdonian National Park Study*. En l'àmbit estatal, són destacables els treballs de reproducció d'un complex preindustrial de reducció i forja a Agorregui (Guipúscoa) o l'experiment de pràctica pedagògica que es porta a terme a l'Escola de Mines de Manresa (UPC), reproduint un baix forn i la obtenció de ferro.

Els resultats d'aquestes experiències, especialment de les que intenten reproduir les condicions i infraestructures dels forns protohistòrics, defineixen la dificultat amb la qual es portà a terme la reducció del ferro en època antiga. Apart dels molts condicionants que implica i que obliga a repetir els procediments, evidencia que únicament un artesanat de llarga experiència en el coneixement empíric podia superar, la productivitat era extraordinàriament baixa i, per tant, es requeria d'un important esforç de temps i mitjans (mineral de ferro i combustible) per obtenir quantitats suficients per conformar qualsevol estri d'utilitat pràctica. En el mateix sentit, s'explica la necessitat física de més d'una estructura de combustió, i fins i tot la seva concentració en un mateix indret, si la intenció era obtenir major volum de producció que el simple manteniment local dels atuells d'una petita comunitat.

4.2. EL PROCÉS DE POSTREDUCCIÓ.

El producte de la reducció directa és una massa o esponja de ferro bruta d'inclusions no metàl·liques i que, a efectes pràctics, no pot ser directament forjable. Per a continuar el procés de conversió fins a l'objecte final, calia sotmetre-la a tractament mecànic; aquest podia portar-se a terme en fred, trencant i separant els nòduls metàl·lics de l'escòria, o a temperatura suficient per extreure les impureses sota la pressió del cop de mall, en un procediment anomenat de purificació o de refinament del metall.

Les escòries que es van obtenint en les successives etapes de la cadena operatòria de la reducció directa tenen composicions químiques globals, sobretot respecte als elements majors, molt properes. Aquest fet provoca que freqüentment sigui difícil discernir de quin tipus d'escòria es tracta; tanmateix, presenten diferències que possibiliten una identificació teòrica.

Un primer martelleig de la massa a temperatura de sortida del forn permetia, en aquelles esponges poc compactades i amb un recobriment perimetral d'escòria, eliminar les capes o nòduls adherits més externs i efectuar una inicial neteja. A partir d'aquest producte, el procediment consistia en l'alternança d'escalfaments i martelleig de forma successiva i amb repeticions seriades, que permetia anar netejant el bloc de metall, fins a convertir-lo en una barra o bloc de ferro treballable, l'anomenada *loupe*²⁴⁴ a partir de la qual es forgen els útils. Si l'execució d'aquestes tècniques era eficient i la temperatura assolida era suficient, les inclusions es fonien i s'expulsaven pel cop de martell que, alhora, anava compactant la massa metàl·lica.

L'esmentat procediment es realitzava amb un forn obert, que possibilitava, mitjançant les eines adients, la correcta i continuada manipulació de la massa, que de forma continua es treia i es tornava a introduir en els carbons incandescents. La infraestructura podia ésser tan el forn de reducció reutilitzat, un cop trencada la cúpula, si en tenia, o la llar de forja, fet pel qual es solen atribuir

²⁴⁴ FLUZIN, P. *et alii* (2001) "Etudes métallurgiques ...", op.cit. 223, p. 125
SEERNELS, V. (1993) *Archéométrie des scories ...*, op.cit. 201, p. 9

tasques de postreducció als mateixos tallers de forja ²⁴⁵, emprant-se com a instrumental bàsicament el mall, l'enclusa, martells i pinces ²⁴⁶.

Els procediments que configuren la postreducció generen escòries diferenciades de les de la reducció, en dependència de l'eficàcia de l'etapa anterior, de les característiques de la infraestructura emprada i dels additius emprats en aquesta etapa.

En el cas de les reduccions en forns sense separació d'escòria, l'esponja de metall estarà extraordinàriament bruta de matèries alienes, formant concrecions al voltant de la massa o, en el pitjor dels casos, barrejada amb la matriu metàl·lica. La costosa neteja produirà les típiques escòries de reducció en els primers treballs mecànics.

Les masses produïdes per forns amb separació d'escòria, hauran fos aquesta i permetran una purificació més eficient, a fi d'aconseguir un bloc de metall net. Les escòries obtingudes del martelleig d'aquestes esponges es caracteritzen per una menor quantitat del silicat (Fe_2SiO_4), ja que la major part d'aquest ja ha estat separat prèviament, amb presència d'òxids de ferro sense reduir, ferro metàl·lic (Fe^0) i òxids d'altres elements ²⁴⁷. En la circumstància que la postreducció es practiqués en les llars o forges, les escòries produïdes s'aformaven properes a la concavitat del fons de l'estructura, adquirint una forma característica de casquet o *calotte*; altrament, en aquests casos, el casquet podia incloure restes de l'argila de les parets del forn, a les quals restava parcialment adherida.

A part de les escòries de casquet i amb semblant composició, durant la compactació de la massa, el treball mecànic a cops de martell o mall fa dependre petits resquills (*battitures*) d'òxids de ferro i nòduls d'escòria que, en forma de gota, són expulsades a un radi relativament curt al voltant del punt d'esquitx.

²⁴⁵ Circumstància a ben segur no genèrica en època antiga, donada l'existència de barres de ferro net i purificat com element comercial, les anomenades *currency bar*. Consultar cap. 1.2.

²⁴⁶ SEERNELS, V. (1998) "La chaîne opératoire...", op.cit. 204, pp. 17-18

²⁴⁷ Freqüentment en les escòries i en forma d'òxid són presents Mn, Ca, Si, Co, Mg, K i Al; el Mn pot reduir-se, integrant-se una part a la matriu metàl·lica de ferro com element minoritari i l'altre a l'escòria com a òxid; el P pot quedar com una inclusió de Ca_2PO_4 o incorporar-se al metall, fet que empitjora les propietats mecàniques amb una major fragilitat; el Cu també pot incorporar-se al metall com a solució sòlida; el S pot trobar-se en forma de sulfur, essent perjudicial per a les propietats mecàniques del metall.

La postreducció significa pel ferrer el moment de verificar empíricament el resultat de la reducció. Si bé, i en dependència de la modalitat d'infraestructura emprada²⁴⁸, podia haver-se realitzat una observació prèvia consistent en el control del color que anava adquirint el metall reduït (**fig. 12**), en el moment d'extreure la massa i iniciar el cinglatge podia advertir-se directa i físicament les característiques del producte.


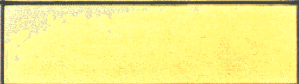
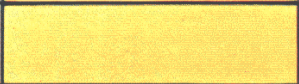







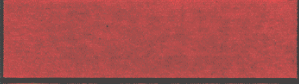


1300° C i superior		Groc molt clar
1200° C		Groc clar
1100° C		Groc
1000° C		Ataronjat clar
950° C		Ataronjat
900° C		Roig molt clar
850° C		Roig clar
810° C		Roig cirera clar
780° C		Roig cirera
740° C		Roig cirera fosc
680° C		Roig fosc
630° C		Marró canyella
550° C		Marró fosc

Figura 12. Taula de colors a temperatura del metall de ferro.

²⁴⁸ Davant d'una manifesta dificultat arqueològica per identificar les característiques de les supraestructures dels forns de reducció, principalment en les intervencions antigues, la historiografia moderna alterna la interpretació del baix forn amb cúpula, el baix forn obert o l'existència d'ambdós, com a evolució tecnològica o contraposadament. El seguiment visual de la reducció i del seu producte només podia existir en els baix forns oberts, restant una incògnita fins al final del procés en el cas dels tancats. Consultar cap. 3.1.

L'artesà experimentat identificava aquelles particularitats de l'esponja heterogènia a partir dels seus atributs físics, com el ja esmentat color, el so provocat pel cop de martell o la capacitat de resistència a l'estri tallant, un cop portada la massa a temperatura. La combinació d'aquests indicis físics li permetia diferenciar empíricament les zones endurides o més acerades i separar-les, si s'esqueia. A partir d'aquest punt, li era possible agrupar les parts separades amb àrees de característiques similars per formar dues o més masses de propietats diferents o, directament, barres o *currency bar*²⁴⁹ pel seu emmagatzematge o trasllat a un altre taller; com a opció alternativa, podia mantenir-les per conveniència en petites porcions i làmines de metall de propietats mecàniques diferenciades, amb les quals es conformarien els objectes a la pròpia forja.

²⁴⁹ Són múltiples les varietats morfològiques que adopten les barres bipiramidals o les anomenades *currency bar*, les quals semblen formar part d'aquest comerç que vincula, paral·lelament a l'organització en sistemes socials complexes, centres de producció metal·lúrgica amb tallers especialitzats de forja. La diversitat dels models identificats s'expressa tant en forma de feixos de fines tires de metall, com en forma de paral·lepípedes (antecessors dels actuals lingots) o en aparença de làmines planes, fet que, sovint, ha suposat la seva identificació errònia en context arqueològic com a objecte funcional (espasa, falç, emmanegament, etc.).

MOHEN, J-P. (1992) *Metalúrgia prehistòrica...*, op.cit. 2, fig. 54

PLEINER, R. (1969). *Iron working in...*, op.cit. 10, fig. 6

SEERNELS, V. (1998) "La chaîne opératoire...", op.cit. 204, fig. 33

4.3. LA FORJA. PROCEDIMENTS DE MILLORA DE LES PROPIETATS MECÀNIQUES.

L'etapa posterior a la postreducció correspon als procediments que formen part de la forja, i que convertiran el metall ja net en els objectes finals.

A partir del bloc de metall purificat, l'artesà elabora els útils metàl·lics gestionant el seu procediment amb dues línies d'actuació, alhora diferenciades però intrínsecament vinculades:

- conformar físicament l'objecte, i
- dotar-lo de les millors propietats mecàniques necessàries en funció del seu ús.

Ambdues finalitats s'executen a través de procediments que, en bona part, es sobreposen, essent prou efectius en la consecució del primer objectiu i, generalment, poc eficients en la consecució de les característiques metal·lúrgiques precisades per la peça²⁵⁰.

Els primers procediments del ferrer a la forja es centren en les característiques metal·lúrgiques i morfològiques del metall producte de la postreducció. Aquest pot ser una *loupe* o barra de carburació heterogènia o, al contrari, pot tractar-se d'una barra, o porcions d'aquesta, de característiques individualment homogènies, restant separades per grau de carburació diferent.

La diversitat cronològica i geogràfica del coneixement de la siderúrgia en època protohistòrica motiva que es trobin múltiples procediments. Historiogràficament es considera que en un primer estadi evolutiu de la pràctica siderúrgica, l'artesà emprava un únic bloc de metall heterogeni, com a mètode més fàcil per elaborar l'objecte²⁵¹. No sembla probable que amb el citat mètode es

²⁵⁰ L'habilitat de l'artesà inclou múltiples procediments; si bé els tractaments mecànics són assolibles a partir d'un relativament curt aprenentatge, que inclou la còpia morfològica de models preexistents, els procediments que impliquen tractaments tèrmics o termoquímics es recolzen en el coneixement empíric i d'especialització. Altrament, la manca de tècniques de control vers la qualitat del producte significà que, tot i el coneixement de diversos procediments pràctics i la intenció d'aplicar-los, el resultat final no fos l'òptim; aquesta circumstància és palesa en el conjunt de materials d'estudi del present treball d'investigació. Consultar caps. 9 i 10.

²⁵¹ MOHEN, J-P. (1992) *Metalúrgia prehistòrica...*, op.cit. 2, pp. 178-179

PLEINER, R. (1980) "Early Iron ...", op.cit. 140, pp. 379-394

TYLECOTE, R.F. (1987) *The early history...*, op.cit. 194, pp. 40-41

poguessin elaborar objectes de grandària superior a elements d'ornament personal o útils de volums mitjans; essent comprovada l'escassa productivitat i capacitat de les infraestructures de reducció antigues, fóra imprescindible reunir més d'una d'aquestes reduïdes *loupes* de ferro per conformar objectes com espases, armament llancible pesant o qualsevol altre objecte de pes considerable. Altrament, tot i poder considerar-se el treball de conformació amb un únic bloc més simple, pel ferrer havia de resultar molt més fàcil tallar la massa i convertir-la en porcions aplanades pel martellatge o làmines per a procedir a la seva neteja individual, el que li permetia expulsar amb major eficiència les inclusions no metàl·liques atrapades en el metall. La possibilitat de treballar amb porcions de massa diferents afegia el cabdal avantatge metal·lúrgic de combinar làmines de divers grau de carburació, optimitzant les propietats mecàniques de l'estri a conformar en vinculació a les seves exigències funcionals.

Per a conformar l'estri mitjançant el procediment del laminat, l'artesà escalfava les porcions de la *loupe* separant-les pels atributs físics que li determinaven el grau de carburació de cadascuna; tot seguit, creava dos o més blocs de carburació i duresa homogènia, les martellava i les convertia en làmines planes, per continuar tallant-les segons la mesura i nombre necessari ²⁵². Els fulls de metall o làmines es sobreposaven alternades sobre la llar de la forja, a fi de procedir a la seva unió a temperatura o soldadura ²⁵³; finalment, l'artesà disposava d'una acumulació aplanada de capes de metall amb prou volum per procedir a la conformació i tractaments termoquímics, si s'esqueia, de l'objecte. En el cas de que la soldadura es realitzi amb metalls de grau de carburació semblant, acer – acer o, sense carboni, ferro – ferro, el treball resulta facilitat per

²⁵² S'ha pogut comprovar que el ferrer actuava intencionadament afegint-hi una làmina més de la qualitat de metall, normalment el més carburat, que creia l'indicat per ésser el perímetre de l'objecte. Amb aquesta metodologia, apilava les làmines començant i acabant amb les de la mateixa "família". El fet d'emprar les làmines amb més contingut de carboni com les externes el capacitava per a efectuar tractaments termoquímics posteriors que milloressin les propietats mecàniques de l'estri.

²⁵³ La soldadura és la unió a temperatura de dos metalls, habitualment entre ferro o el seu aliatge l'acer. Tot i que es realitzin de forma correcta, s'introdueix en el metall una relativa discontinuïtat, expressada sovint com a tensions intergranulars, que predisposen al trencament. El freqüent creixement dels grans, generalment per fusió o per migració, disminueix proporcionalment propietats com la resistència mecànica a la tracció i la duresa.

la similitud de temperatures d'austenització dels diferents cossos a unir en calent: poden quedar perfectament soldats, no deixant visible cap escletxa o rastre dels fronts d'unió. Fora la mateixa circumstància aconseguida amb el plegament d'una única làmina plana allargassada sobre ella mateixa, a fi de crear volum.

El procediment de soldadura entre làmines de ferro de diferent carburació obligava a portar el metall per sobre de la línia crítica superior Ac_3 per a que fos efectiu, alhora que determinava el creixement del gra de l'estructura, vinculat a les temperatures assolides, i la possible descarburació, en dependència de les condicions oxidants ²⁵⁴; les dificultats de control sobre la temperatura a assolir, diferent per a cadascun dels cossos, el manteniment d'aquesta durant el temps suficient i el continuat treball de martellatge sobre l'apilament representaven prou dificultats per aconseguir resultats suficientment correctes, generant de forma habitual soldadures deficientes, amb possibilitat d'obertura d'esquerdes i corrosió, per, conseqüentment, disminuir la qualitat final de l'objecte.

Les escòries de forja, a l'igual que les de postreducció, presenten dificultat en la diferenciació vers les escòries de reducció directe respecte la seva composició química. Altrament, el rebuig obtingut de la forja es caracteritza teòricament per una escòria més rica en ferro metàl·lic que les obtingudes en les etapes precedents de la cadena siderúrgica; hi ha una mancança del silicat (Fe_2SiO_4) i la presència generalitzada d'òxids de ferro, així com òxids d'altres elements. Morfològicament, poden adoptar la forma del fons de la llar, amb la mateixa tipologia de casquet que les escòries de postreducció, o la forma de gotes i resquills de metall, a modus d'esquitx de la barra martellada.

Disposant del metall en forma adient per la conformació de l'objecte, el ferrer el manipulava en calent, a suficient temperatura per a que aquest resultés prou mal·leable i deformable per un treball mecànic eficient. En aquest sentit, forjar un metall és deformar-lo en calent sotmetent-lo a esforços de compressió,

²⁵⁴ L'estudi metal·logràfic evidencia que moltes de les unions a temperatura o soldadura es devien fer per sota Ac_3 , possiblement en un interval de temperatura entre Ac_1 i Ac_3 , quan l'austenització és encara parcial; aquest fet provocaria unes soldadures defectuoses per, entre altres dificultats, no haver austenitzat la totalitat d'ambdues superfícies de contacte. GULIAIEV, A.P. (1974). *Metalografia*, op.cit. 237, pp. 90-95

aprofitant la seva plasticitat. La capacitat de soldadura, a altes temperatures i mitjançant el treball mecànic, i la forjabilitat són les característiques singulars del ferro.

En una metodologia novedosa respecte d'altres metal·lúrgies, el martellatge i els procediments conformants havien de realitzar-se en calent, per sobre la temperatura de recristal·lització ²⁵⁵, per evitar la deformació de la granulometria que causava el treball en fred; superant el punt tèrmic concret, que l'artesà advertia a partir del color ataronjat del metall, s'eliminaven les deformacions de la xarxa granulomètrica en referència a la temperatura assolida per, un cop refredada la peça, haver recuperat l'estructura i les propietats del metall prèvies a tota l'acció mecànica. La deformació plàstica a temperatures superiors a la de recristal·lització elimina l'acritud ²⁵⁶ i, a mesura de que aquesta temperatura és més alta, la duresa del ferro martellat disminueix; aquest fet, que havia d'ésser conegut empíricament per l'artesà protohistòric, podia provocar l'experimentació d'altres procediments que permetessin millorar les propietats mecàniques dels estris a produir.

Durant el treball en calent a la forja, el ferrer emprava l'instrumental al seu abast, depenent del seu nivell tècnic i d'evolució empírica, per donar forma al bloc o plec de làmines superposades; els procediments mecànics bàsics per conformar els objectes eren el martellatge, el doblegament, el reblament i la incrustació ²⁵⁷, si bé i amb l'especialització de l'artesà i la multiplicitat d'aplicacions que la generalització del ferro implica, aquests es subdividiren en tècniques més elaborades (**fig. 13**).

²⁵⁵ La temperatura teòrica de recristal·lització del ferro pur és de 450° C, considerant-la com a restauració interna de les tensions del gra. A la pràctica, la recristal·lització es produeix a temperatures prou superiors, essent probable que a la forja, ja des d'època protohistòrica, es portés el metall fins al punt crític superior, Ac₃, a temperatures de domini austenític per a fer-lo més plàstic i treballable. A aquesta T s'entraria al canvi d'estat alotròpic, passant de Fe_α+Fe₃C a Fe_γ(C) durant l'escalfament i a la inversa en el posterior refredament, canviant l'estructura cristal·lina amb l'esmentat refredament i formant un nou gra lliure de deformació. A aquest tractament tèrmic s'anomena recristal·lització. El treball mecànic no deformarà el gra mentre es realitzi per sobre aquesta temperatura.

GULIAIEV, A.P. (1974). *Metalografia* ..., op.cit. 237, pp. 83-88

²⁵⁶ Augment de la duresa i de la resistència a la tracció provocada per la deformació plàstica.

²⁵⁷ PONS, E. (1984) *L'Empordà de l'edat...*, op.cit. 3, p. 205

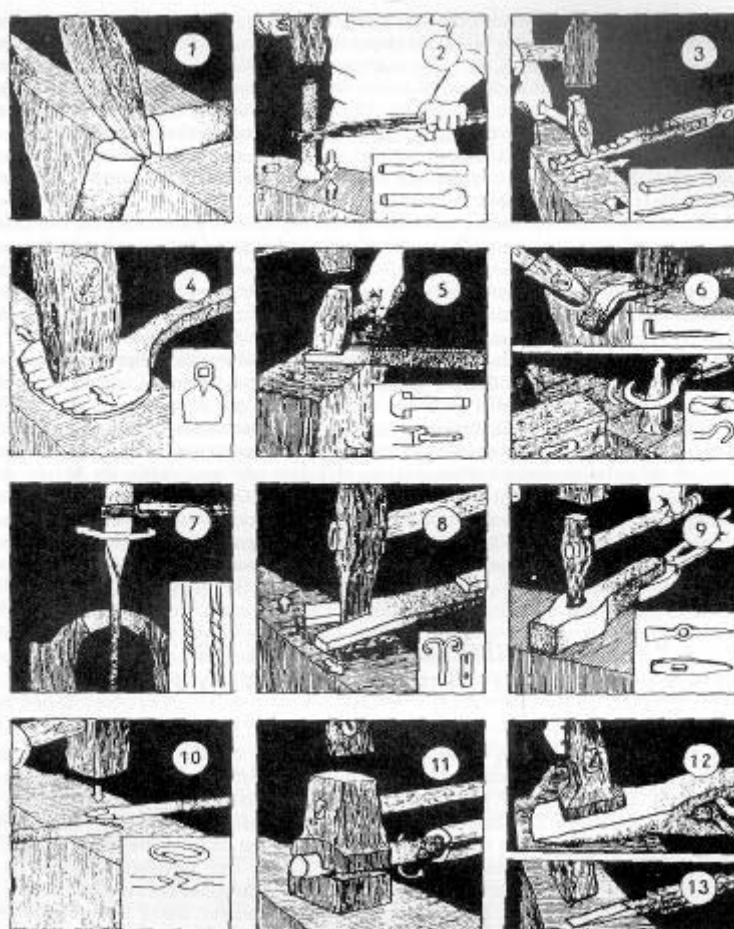


Figura 13. Síntesi gràfica de l'especialització en el procediment de conformació física dels estris: 1) seccionar; 2) engruixir; 3) estirar en longitud; 4) eixamplar; 5) aplanar; 6) donar forma; 7) torçar i cargolar; 8) separar; 9) perforar; 10) separar en continuïtat; 11) arrodonir seccions; 12) regularitzar de superfícies; 13) aguditzar extrems (a partir de Mohen, 1990, p. 173, f. 53; sobre il·lustracions de Pleiner, 1962)

Prèviament esmentats, els treballs de conformació de l'estri es portaven a terme en calent, a fi de disposar d'un metall de consistència prou plàstica per a poder efectuar els procediments citats. Paral·lelament a aquests, o com a conjunt de procediments darrers ²⁵⁸, es practicaven els tractaments tèrmics i termoquímics que tenien com a propòsit la millora de les propietats mecàniques de l'estri.

²⁵⁸ Cal suposar que si durant la forja de l'estri es podia assolir, de forma intencionada, altes temperatures, els tractaments tèrmics realitzats amb anterioritat resultarien inútils, i l'austenització retornaria el gra a les seves característiques precedents (hereditàries), un cop es produís el posterior refredament. Únicament el tractament termoquímic de la cementació, si es prenen les mesures adients per evitar la descarburació per contacte amb l'aire, podia practicar-se amb anterioritat als tractaments mecànics en calent, produint-se, amb tot, una variació en l'estructura final.

Els tractaments tèrmics són aquelles operacions en el curs de les quals una peça de metall és portada de temperatura ambient a una de més elevada, mantinguda cert temps a aquesta darrera i, tot seguit, refredada, essent, per tant, els factors de temps i temperatura les principals variables del seu funcionament; com a tractaments tèrmics practicats en cronologies protohistòriques es relacionen l'esmentada recristal·lització, el tremp, el revingut i el recuit. Altrament, els tractaments termoquímics són aquells en què, mitjançant una temperatura elevada, existeix una transferència química d'àtoms entre el metall i la matèria amb la qual resta en contacte; fonamentalment, la cementació és el tractament documentat i evidenciat en l'Antiguitat, si bé fou possible la pràctica de la nitruració.

El tractament tèrmic del tremp ha estat considerat un dels indicadors tecnològics d'evolució cronològica del coneixement del treball del ferro, pel fet que historiogràficament no es considera plenament emprat fins a època romana ²⁵⁹; tanmateix, la vigència de la pràctica del tractament des d'inicis del I mil·lenni a.C. al Pròxim Orient i a la protohistòria europea i peninsular és plenament demostrada ²⁶⁰. S'emprà com a tècnica simple per endurir l'objecte a partir de submergir-lo en líquid després del procés de forja.

El tremp és únicament possible en l'acer; tècnicament consisteix en el refredament bruscat del metall des d'una temperatura superior a la de transformació ($>A_{c3}$), el que suposa que la solució sòlida d'austenita no disposa de temps per a descomposar-se en ferrita i cementita, i es transforma en una solució sòlida sobresaturada de carboni en Fe_{α} , anomenada martensita, la qual disposa de major duresa i resistència a la tracció.

La transformació de l'austenita es troba directament vinculada a la velocitat de refredament; aquest factor es determina tan per les condicions del procediment i de la natura del mitjà de refredament (**fig. 14**), com per les característiques

²⁵⁹ TYLECOTE, R.F. (1987) *The early history...*, op.cit. 194, p. 45

²⁶⁰ La tradició literària, les fonts clàssiques, la iconografia i els estudis metal·logràfics sobre diferents materials contextualitzats, inclosos els analitzats al present estudi, així ho demostren. Consultar capítols 2, 9, 10, 11, 12 i 13.

físiques de l'objecte que rep el tractament tèrmic que determinen la seva penetració ²⁶¹.

Tècnica / Mitjà de refredament	Agitació nul·la	Agitació moderada	Agitació forta	Agitació violenta
oli	0.2	0.3	0.5	0.7
aigua	1		1.5	
salmorra	2			5

Figura 14. Taula comparativa de grau de severitat del tremp en relació a la tècnica de procediment i mitjà de refredament, considerant 1 al tremp en aigua i sense agitar (adaptació a partir de Molera, 1991, fig.37)

A velocitats inferiors de refredament a 1 (segons figura anterior), la naturalesa de la solució final és diferent a la martensita. Hi ha un punt, anomenat velocitat crítica de tremp, que determina la velocitat mínima de transformació per assolir la martensita ²⁶². Si el refredament es fa prou ràpid però a una velocitat menor es formaran altres productes de transformació, fora el procediment esmentat com a tremp suau.

Amb refredaments a velocitat inferior, la transformació austenítica genera estructures diferents. En aquest sentit, l'objecte pot haver estat mantingut sota la temperatura crítica inferior durant força temps, pot haver-se escalfat i refredat alternativament vorejant la temperatura esmentada o pot haver-se escalfat lleument per sobre i, tot seguit, s'ha refredat lentament; en tots aquests casos, el producte seria una perlita característica, amb el component cementític en forma d'esferoides, l'anomenada perlita globular. Altrament, si la temperatura de refredament és més ràpida, però sense arribar a la crítica de refredament, es forma una estructura intermèdia entre la perlita més fina i la martensita, serà la bainita.

Aquest guany de duresa provocat pel tremp, si bé resultava un avanç respecte les propietats prèvies del metall, afegia l'inconvenient important de la fragilitat, que, en les peces de major grandària, podia provocar la presència d'esquerdes; com a solució al problema hipotèticament es pogué introduir la tècnica del revingut,

²⁶¹ Bàsicament són el gruix de la peça, la quantitat del component de carboni i la grandària del gra austenític.

²⁶² El propòsit d'obtenció de la martensita es motiva per assolir el màxim d'enduriment.

consistent en tornar a escalfar lleument l'acer per sota la temperatura de transformació, a fi de, conservant almenys parcialment la microestructura de martensita transformada des de l'austenita pel refredament ràpid del tremp, suavitzar el grau de duresa i augmentar la tenacitat; a mesura que s'augmentava la temperatura, el tremp més reversibilitat adquireix, disminuint la resistència a la tracció i el límit elàstic, i augmentant l'elongació. Les dificultats de control tècnic de la operació, on no hi ha canvi de color en el metall calent, ha fet suposar que si aquesta es produïa, havia de ser de forma generalment accidental ²⁶³, no considerant-se una tècnica de coneixement estès en època protohistòrica.

Un darrer tractament tèrmic que, si bé no generalitzat, podia haver-se practicat puntualment en la siderúrgia preromana fou el recuit de la peça, utilitzat a fi de corregir possibles deformacions de la granulometria de la peça. Es tracta d'una recristal·lització total portant l'objecte per sobre de la temperatura d'austenització A_{c3} , per, finalment, deixar refredar lentament; s'aconseguia reorganitzar el gra deixant, tanmateix, empremtes internes degudes a la tensió soferta. Amb tot, el coneixement siderúrgic del comportament del metall, necessari per emprar de forma correcta i intencionada aquest tractament tèrmic, havia de restar limitat en l'Antiguitat, essent utilitzat per artesans molt experimentats, els quals podien reaprofitar de nou l'estri eliminant la seva història prèvia de tractaments per dotar-lo de noves propietats.

En l'apartat de tractaments termoquímics, la cementació n'és el bàsic i l'emprat des dels inicis de la pràctica siderúrgica; devia descobrir-se accidentalment al comprovar la millora de propietats mecàniques, principalment duresa, que comportava el fet de que l'estri, de ferro o acer dolç distribuït heterogèniament, reposés en el llit de carbons incandescents de la llar. Com a metodologia més controlada, i paral·lelament a les tècniques ja emprades en la metal·lúrgia del bronze, s'apunta la possibilitat de que alguns ferrers empremsin gressols petits i tancats col·locant porcions de la *loupe* barrejades amb carbons esmicolats en petits grans per, tot seguit, escalfar-ho a temperatures d'austenització ²⁶⁴.

²⁶³ MADDIN, R. *et alii* (1977) "Cómo empezó la...", op.cit. 18, p.99

²⁶⁴ APRAIZ, J. (1978) *Fabricación de hierro...*, op.cit. 8, p.30

El tractament consisteix en la difusió del carboni a alta temperatura; la transmissió d'àtoms de carboni es produeix mantenint la zona d'interès a temperatura d'austenització, per sobre Ac_3 , durant prou temps i en contacte amb el carbó de llenya (**fig. 15**).

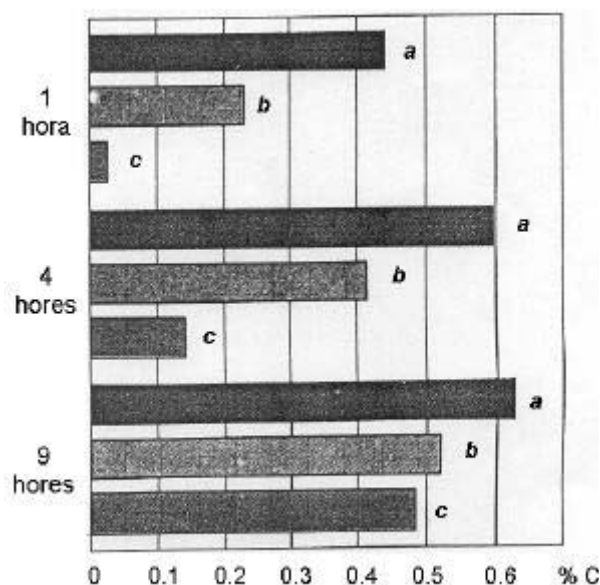


Figura 15. Diagrama comparatiu de transferència de carboni durant la cementació, en relació al temps de contacte i a la fondària de penetració en la superfície del metall - a) 0,5 mm. de penet.; b) 1 mm. de penet.; c) 1,5 mm. de penet. - (adaptat a partir de Maddin-Muhly-Wheeler, 1977, p. 94).

A conseqüència de la penetració superficial del carboni en el ferro s'obté una capa superficial de considerable duresa i d'alt contingut amb C i, alhora, es conserva un nucli més dúctil. Del període de temps que la zona a enriquir estigui en contacte amb el carburant a la suficient temperatura, dependrà el grau de penetració i contingut de carboni; en aquest sentit es considera a la cementació un tractament superficial, ja que la difusió és molt lenta.

Resultava extraordinàriament difícil per a una infraestructura antiga mantenir la mateixa o similar temperatura durant molt de temps, el que suposa que en època protohistòrica la cementació resti, de forma més marcada, en les capes més perimetrals de l'objecte, havent assolit una penetració molt limitada.

Amb aquest senzill procediment, ben experimentat i controlat, podien aconseguir-se estris amb bones propietats mecàniques, amb prou tenacitat per

no ésser fràgils als cops i amb tall prou dur per superar les propietats assolides per altres metalls.

Un darrer procediment termoquímic d'aplicació en època antiga pogué ésser la nitruració. Tot i no ser clarament documentat fins el moment ²⁶⁵ potser pel fet de limitar-se a la superfície dels objectes i amb penetracions molt lleus, àrees de major afectació per la corrosió dels objectes de ferro arqueològic, la seva aplicació era factible tècnicament amb els mitjans de la siderúrgia protohistòrica. La nitruració és un tractament termoquímic d'enduriment superficial a relativament baixa temperatura, entre 450° i 580° C, en el qual la zona a tractar entra en contacte amb una superfície incandescent rica en nitrogen; els àtoms d'aquesta superfície es transfereixen creant una capa perifèrica de nitrurs de gran duresa, evitant tractaments posteriors. Millora les propietats de fricció i de resistència a l'abradió, a la fatiga i a la corrosió, tot i que pot provocar la rugositat superficial de les peces tractades.

Els seus beneficis havien d'ésser comprovables empíricament per l'artesà de forma similar al tractament de la cementació, obtenint superfícies clarament més endurides que les del metall abans de tractar. Hipotèticament, el procediment s'hauria portat a terme de forma accidental en el seu inici, al dipositar l'objecte sobre el combustible incandescent en el qual, a part del carbó de llenya, hi eren presents components rics en nitrogen i de coneguda utilització com agents calorífics, com els fems o excrements animals ²⁶⁶ o les restes òssies de rebuig i de procedència alimentària. Del seu ús intencional no hi ha notícia en context de la protohistòria peninsular o en les fonts clàssiques, tot i que fou possible que la millora de les propietats d'aquest tractament es confongués amb la ben coneguda cementació i no es diferenciés entre ambdós.

²⁶⁵ Alguns autors comenten la suposada presència d'agulles de nitrur en objectes de ferro d'Europa Oriental i de la costa mediterrània, en cronologies de s. VI-IV a.C.
MARÉCHAL, J.-R. (1969) "Propagations du procédé...", op.cit. 65, pp. 283-284
MOHEN, J.-P. (1992) *Metalúrgia prehistòrica...*, op.cit. 2, p. 174

²⁶⁶ La utilització dels fems animals, principalment de remugants, com a carburant és un fet contrastat antropològicament fins als nostres dies. La seva conformació com a blocs o paral·lepípedes assecats al sol permetia l'emmagatzemament i el seu ús complementari per alimentar estructures de combustió de tot tipus.

Com a procediments finals del treball de conformació d'estris a la forja, s'inclou els diversos treballs d'acabament, la pràctica dels quals aniria vinculada a la tradició tecnològica de cada grup productor. L'herència de la metal·lúrgia del bronze en el bagatge cultural permetria adaptar tècniques conegudes amb anterioritat, com el gravat, el cisellat, el repussat o el difícil art de la soldadura amb d'altres metalls ²⁶⁷.

El brunyit i polit en fred sembla ser un procediment molt més generalitzat ²⁶⁸. La seva finalitat no és altre que dotar de la clàssica lluentor metàl·lica i d'una superfície allisada als estris, fet pel qual havia d'ésser especialment freqüent en tot aquell utilatge que impliqués un mínim de valor estètic, com l'armament o aquells estris que podien formar part de l'intercanvi comercial. La tècnica consistia en refregar al metall materials de gra més gruixut a, progressivament, més fi, utilitzant compostos petris de diferent densitat, fustes diverses, argiles i llims, matèries vegetals, cuir, pells o tèxtils de major o menor poder abrasiu ²⁶⁹.

²⁶⁷ Aquestes tècniques són apreciables, principalment, en els primers estadis de l'ús del ferro, quan aquest encara és considerat un metall amb valor de prestigi (com el ganivet de ferro i or de la tomba de Tuthankhamun (s. XIV a.C.)), o en la confecció d'armament ofensiu i defensiu (espases, cascs, martingales i escuts) de personatges de poder. Consultar caps. 2 i 3.

²⁶⁸ SEERNELS, V. (1993) *Archéométrie des scories ...*, op.cit. 201, p. 9

²⁶⁹ SEERNELS, V. (1998) "La chaîne opératoire...", op.cit. 204, pp. 26-27

5. IDENTIFICACIÓ MICROSTRUCTURAL

Les matrius metàl·liques dels objectes de ferro i acer de cronologia protohistòria, resultants dels procediments duts a terme en les diverses fases per a l'obtenció de l'objecte, mostren un conjunt de constituents identificatius dels procediments i tractaments tèrmics i termoquímics realitzats. Reflectides les condicions de formació en el diagrama d'equilibri ferro – carboni, les microestructures de possible formació en la zona referent a l'acer són les següents:

FERRITA

La ferrita és el Fe_{α} o ferro quasi pur, i es troba format per grans polièdrics d'estructura homogènia, units entre ells per les seves cares; observant a nivell microscòpic una superfície polida i atacada, es pot apreciar l'entramat poligonal característic, més o menys deformat, perimetrat pel límit o frontera del gra (**fig. 16**). Cristal·litza en el sistema cúbic centrat en el cos de vuit àtoms ubicats en els vèrtexs i un al centre (**fig. 26.1**). Les seves propietats mecàniques són una resistència a la tracció de 280 MPa, capacitat d'estirament del 35 % i duresa d'aprox. 100 HV, essent el constituent més tou, dúctil i mal·leable, alhora que magnètic.

Pot aparèixer en diferents condicionants:

- com a component únic en ferros de contingut inferior al 0,01% de C;
- com element proeutectoide acompanyant la perlita;
- formant part de les làmines de la perlita;
- com a matriu de la perlita globular;
- barrejada amb la martensita a acers hipoeutectoides trempats;
- i en forma d'agulles o bandes aciculars; en aquest darrer cas, les agulles apareixen orientades en la direcció dels plànols cristal·logràfics de l'austenita, anomenant-se cristal·lització de tipus Widmanstätten (**fig. 17**), la qual es provoca per un escalfament elevat seguit d'un refredament relativament ràpid;

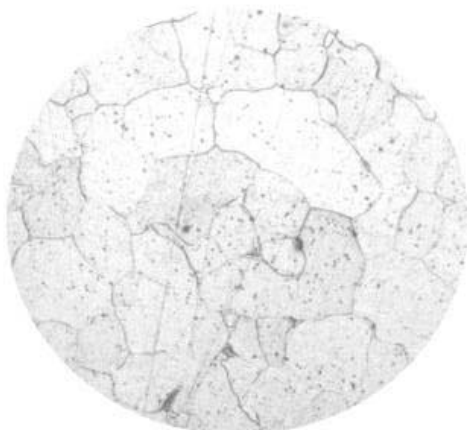


Figura 16. Estructura de grans polièdrics de ferrita (x 250 augm.) (de cap. 9.1.2., fot. 2002/5/1)

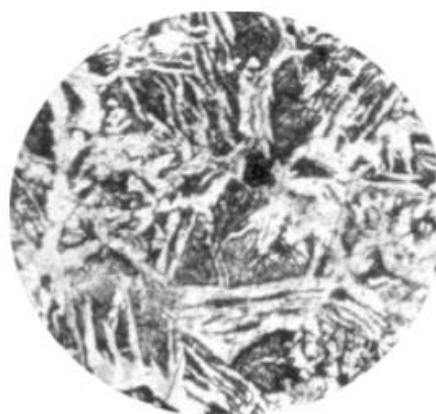


Figura 17. Estructura de cristallització de ferrita tipus Widmanstätten (x 225 augm.) (de cap. 9.4.2., fot. 2055/1/2).

CEMENTITA

Amb el nom de cementita s'identifica el carbur de ferro Fe_3C , amb un contingut de 6,67% de C i 93,33% de Fe. És el constituent més dur de l'acer, aprox. 800 HV, i, alhora, el més fràgil dels tres components; cristal·litza formant un paral·lelepípede ortoròmbic (4,5 x 5 x 6,7 Å) (**fig. 26.2**). Té propietats magnètiques fins els 218°C, temperatura a partir de la qual deixa de ser-ho.

En els acers apareix en els següents condicionants:

- com element proeutectoide en acers hipereutectoides, formant una xarxa que envolta els grans perlítics;
- com a component de la perlita laminar (**fig. 18**) i dels glòbuls de la perlita globular;
- en forma vermicular o intergranular en les unions dels grans ferrítics dels acers hipoeutectoides (**fig. 19**).

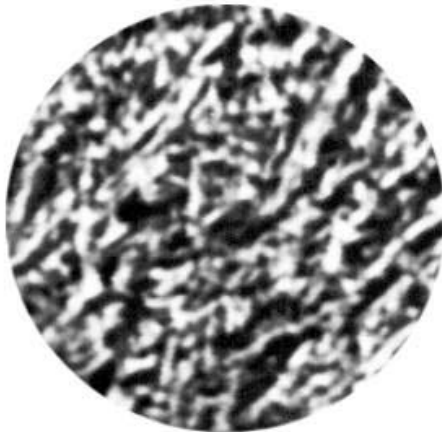


Figura 18. Estructura de làmines i glòbuls de cementita com a component perlític (x 8000 augm.) (de cap. 9.3.2., fot. 2036/1/2).



Figura 19. Estructura hipoeutectoide amb cementita terciària intergranular (x 425 augm.) (de cap. 9.3.2., fot. 2037/1/3).

PERLITA

Constituent eutectoide format per capes alternades de Fe_{α} + Fe_3C , ferrita i cementita. Està compost per sis parts de ferro i una de carbur, proporció equivalent al 13,5% de Fe_3C i al 86,5% de Fe o el 0,8% de C i 99,2% de Fe. Les propietats mecàniques que ofereix són una resistència a la tracció de 800 MPa, una capacitat d'estirament del 15% i una duresa d'entre 150 i 300 HV. La ferrita i cementita que la componen apareixen normalment formant làmines paral·leles i alternades amb reflexos nacrats (**fig. 20**).

Aquesta formació es produeix quan els graus de refredament de la austenita són petits, essent producte d'un refredament natural, deixant reposar l'objecte fins arribar a temperatura ambient. Segons la velocitat de refredament, les làmines apareixen més o menys separades, essent més fina a major velocitat. Aquesta distància interlaminar permet classificar-les en:

- perlita grollera, amb separació de làmines d'aprox. 400 μ m i duresa de 200 HB, que s'obté per refredament molt lent;
- perlita normal, amb separació de làmines d'aprox. 350 μ m i duresa de 220 HB;

- perlita fina, amb separació de làmines d'aprox. 250 μm i duresa de 300 HB, producte pel refredament natural relativament més ràpid.

Segons la disposició dels seus components, poden classificar-se dos tipus de perlita:

- perlita laminar, que prové de d'un refredament lent de l'austenita (**fig. 21**);
- perlita globular o granular, que es produeix quan el metall es manté cert temps a una temperatura oscil·lant al voltant d' Ac_3 .

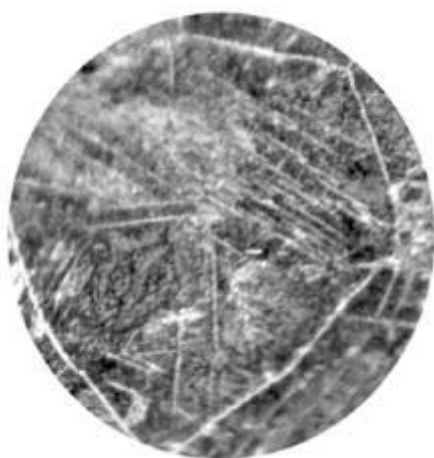


Figura 20. Estructura eutectoide amb grans perlítics (x 800 augm.) (de cap. 9.3.2., fot. 2027/2/2).



Figura 21. Estructura amb gra perlític laminar (x 875 augm.) (de cap. 9.1.2., fot. 2002/8/2).

AUSTENITA

L'austenita correspon a l'estat alotròpic conegut com a ferro gamma, essent, alhora, la solució sòlida de carboni o carbur de ferro en ferro gamma $\text{Fe}_\gamma(\text{C})$ (entre 0 i 1,7% C). La disposició atòmica de la retícula elemental de l'austenita correspon a la del sistema cúbic centrat en les cares i ubica els àtoms de carboni en el cub de ferro gamma de cares centrades, disposats desordenadament i a l'atzar (**fig. 26.3**).

Es tracta d'un component poc magnètic i molt dens, amb propietats mecàniques de ductilitat i tenacitat, gran resistència al desgast, resistència a la tracció 880-1050 MPa, una duresa aproximada de 250 HV i capacitat d'estirament de 30-60%.

Les seves característiques són les d'un constituent de composició variable i inestable, difícil de trobar a temperatura ambient si no és en forma retinguda, a causa d'un refredament ràpid en determinats acers, en forma d'austenita residual i acompanyant a la martensita.

El ferro i els acers es troben formats de cristalls d'austenita quan es troben a temperatures superiors a les crítiques. L'observació d'aquests cristalls els mostra similars als de ferrita però de contorns més rectilinis i angles més vius.

MARTENSITA

Component format per una solució sòlida sobresaturada de carboni en ferro alfa $Fe_{\alpha}(C)$, la concentració de la qual és igual a la de l'austenita inicial. Després de la cementita, és el component més dur, variant la duresa, resistència i fragilitat amb el contingut de C. Amb propietats magnètiques, es caracteritza per una resistència a la tracció de 1700-2500 MPa, una duresa de 600-700 HV i una capacitat d'allargament d'entre 2,5%-0,5% C.

Cristal·litza en un sistema tetragonal, amb una retícula poc diferent al cub centrat en el cos del ferro alfa (**fig. 26.4**). Presenta un aspecte acicular (**fig. 22**), amb làmines en forma d'agulles situades paral·lelament o que es tallen formant angle de 60° i 120°.

BAINITA

Amb el nom de bainita s'agrupa el component que es forma en l'interval de velocitat de refredament entre la transformació perlítica i la martensítica (**fig. 23**). Engloba les nomenclatures anteriorment emprades de troostita i sorbita.

Correspon al producte de la descomposició de l'austenita formada per un agregat de ferrita i carbur de ferro, amb una temperatura de refredament relativament ràpida però inferior a la velocitat crítica de tremp. A partir de l'aparença i el grau de velocitat en el refredament se'n diferencien dos tipus:

- bainita superior, l'agregat més fi, presenta un gra molt petit en formació característica de ploma d'au (**fig. 24**), essent format a l'interval de temperatura entre 600° C i 400° C; la seva resistència a la tracció és de 1400-1750 MPa, amb una duresa aproximada de 500 HV i una capacitat

d'allargament del 5%-10%; es troba formada per làmines ²⁷⁰ amb distància interlaminar d'aproximadament 100 m μ i, habitualment acompanya a la martensita ubicant-se als contorns dels cristalls;

- bainita inferior, obtinguda a partir del refredament de l'austenita a velocitat bastant inferior a la crítica de tremp, la seva aparença és d'agulles gruixudes o tavelles (**fig. 25**), essent format entre els 400° C i els 200° C; les propietats mecàniques són força diferenciades a les de la bainita superior: resistència a la tracció de 880-1400 MPa, duresa de 300 HV aproximadament i capacitat d'allargament de 10%-20%; la distància interlaminar és de 100-250 m μ .

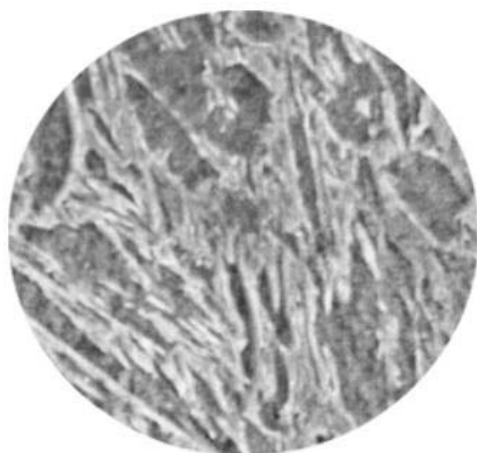


Figura 22. Estructura acicular de martensita (x 3800 augm.) (de cap. 9.1.2., fot. 2001/1/4).

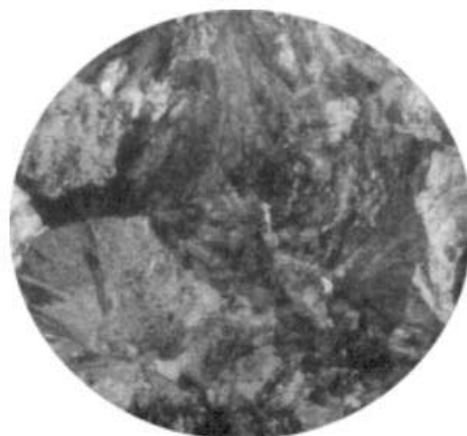


Figura 23. Estructura bainítica (x 390 augm.) (de cap. 9.1.2., fot. 2002/2/1).

²⁷⁰ La seva disposició cristal·logràfica és més semblant a les plaques que formen la martensita que a l'estructura laminar de la perlita.



Figura 24. Estructura de bainita superior en forma de ploma d'au (x 4100 augm.) (de cap. 9.3.2., fot. 2040/1/3).



Figura 25. Estructura de bainita inferior (x 1100 augm.) (de cap. 9.6.2., fot. 2064/2/3).

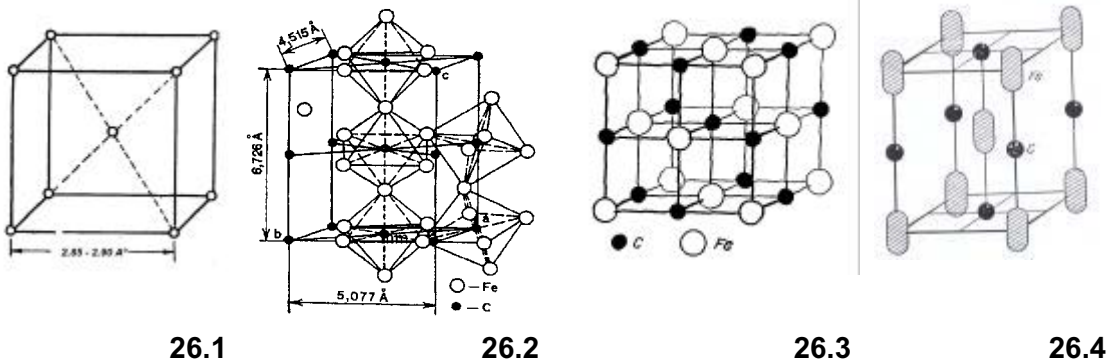


Figura 26. Esquema comparatiu de la disposició cristal·lina teòrica de la ferrita, la cementita, l'austenita i la martensita, amb ubicació atòmica dels components que la constitueixen.