
Una aproximació a la metal·lúrgia medieval de Barcelona: les reixes gòtiques de la catedral

Jordi Auladell i Marquès*
Júlia Simon i Arias**

Resum

Del conjunt de reixes de la catedral de Barcelona s'han seleccionat aquelles que, per referència documental històrica, testimonien un origen d'elaboració d'entre el segle XIV i inicis del XVI. Delimitat un conjunt mostral baixmedieval, s'han obtingut mostres del metall de les estructures i les decoracions a fi de procedir al seu estudi arqueometal·lúrgic: metal·lografia de l'estructura cristal·lina de la matriu metàl·lica, determinació de microdureses, anàlisi qualitativa dels elements químics i determinació qualitativa i semi-quantitativa d'elements de les inclusions no metàl·liques atrapades en el metall. La finalitat de l'estudi ha estat conèixer el grau de desenvolupament tecnològic durant el període en el qual foren realitzades aquestes reixes. En aquest punt, la recerca permet d'advertir les tècniques dels artesans, les qualitats de metall usades i les característiques de les infraestructures emprades. La recerca sobre les reixes les vincula amb referents diversos: les notícies històriques i els tractats sobre el procediment de la farga catalana, d'on s'interpreta, per exemple, un estadi primitiu sense trompa d'aire i unes tècniques de treball prou singulars. Altrament, els resultats obtinguts són comparables amb d'altres mostres sincròniques d'origen centreeuropeu, on el propi corpus es troba més desenvolupat. Aquestes diferències i semblances situen la tècnica de la farga i els mètodes d'elaboració de les reixes en el nivell tecnològic del moment. Finalment, l'estudi possibilita una darrera etapa comparativa per a resseguir l'evolució metal·lúrgica: l'equiparació de resultats en relació amb mostres analitzades procedents del mateix entorn geogràfic, si bé de cronologia prèvia (corpus ibèric, romà i alt medieval), en relació amb les obtingudes per arqueometal·lúrgia experimental i amb les mostres d'objectes similars elaborats amb procediments moderns o contemporanis. En aquest sentit, els resultats són significatius del coneixement acurat de la tècnica i de l'aplicació de solucions pragmàtiques, amb un nivell qualitatiu plenament adaptat a les necessitats mecàniques precisades.

Resumen

Del conjunto de rejas de la catedral de Barcelona se han seleccionado aquéllas que, por referencia documental histórica, atestiguan un origen de elaboración entre el siglo XIV y el inicio del XVI. Delimitado un conjunto de muestras bajomedievales, se han obtenido muestras del metal de las estructuras y las

* Universitat de Barcelona.

** Universitat Politècnica de Catalunya. La investigació s'emmarca en el projecte interuniversitari *Conveni sobre l'estudi tecnològic i estructural dels objectes de ferro protohistòrics i històrics del nordest peninsular*, vigent entre els grups de recerca GRAP (UB) i PROCOMAME (UPC), dut a terme pels autors.

decoraciones con el fin de proceder a su estudio arqueometalúrgico: metalografía de la estructura cristalina de la matriz metálica, determinación de microdurezas, análisis cualitativo de los elementos químicos y determinación cualitativa y semi-cuantitativa de elementos de las inclusiones no metálicas atrapadas en el metal. La finalidad del estudio ha sido conocer el grado de desarrollo tecnológico durante el periodo en el cual fueron realizadas estas rejas. En este punto, la investigación permite advertir las técnicas de los artesanos, las calidades de metal usadas y las características de las infraestructuras utilizadas. La investigación sobre las rejas las vincula con referentes diversos: las noticias históricas y los tratados sobre el procedimiento de la fragua catalana, de donde se deduce, por ejemplo, un estadio primitivo sin trompa de aire y unas técnicas de trabajo bastante singulares. Sin embargo, los resultados obtenidos son comparables con otras muestras sincrónicas de origen centroeuropeo, donde el propio corpus se encuentra más desarrollado. Estas diferencias y similitudes sitúan la técnica de la fragua y los métodos de elaboración de las rejas en el nivel tecnológico del momento. Finalmente, el estudio permite establecer una última etapa comparativa para seguir la evolución metalúrgica: la equiparación de resultados en relación con muestras analizadas procedentes del mismo entorno geográfico, si bien de cronología previa (corpus ibérico, romano y alto medieval), en relación con las obtenidas por arqueometalúrgia experimental y con las muestras de objetos similares elaborados con procedimientos modernos o contemporáneos. En este sentido, los resultados son significativos del conocimiento esmerado de la técnica y de la aplicación de soluciones pragmáticas, con un nivel cualitativo plenamente adaptado a las necesidades mecánicas precisadas.

Amb motiu de les diverses actuacions de restauració i rehabilitació de la catedral de Barcelona i en el marc de la recerca vinculada a la tecnologia del ferro antic i medieval a Catalunya, es considerarà d'interès proposar l'estudi arqueometal·lúrgic del conjunt de les reixes d'origen gòtic ubicades en diverses capelles de la nau central i del claustre de la seu barcelonina.

La finalitat d'aquest estudi rau en un propòsit doble: per una part –i en l'àmbit de les tasques de preservació patrimonial–, disposar d'informació referent a l'estat de conservació de les reixes gòtiques; per l'altra, i principalment, conèixer el nivell de desenvolupament tecnològic durant el període en el qual foren realitzades. En aquest darrer aspecte, la recerca pot permetre advertir les tècniques metal·lúrgiques dels artesans, les qualitats de metall usades i les característiques de les infraestructures emprades.

A partir dels estudis documentals i historiogràfics dels diversos elements patrimonials de l'edifici, el registre de reixes, cancells i baranes de ferro existents resta cronològicament prou identificat, fet que ha possibilitat la definició d'un conjunt mostral amb datació determinada. Una vegada delimitat un conjunt mostral baixmedieval, s'han obtingut mostres del metall de les estructures i les decoracions a fi de procedir al seu estudi arqueometal·lúrgic.¹

1. El present article forma part d'un estudi de major amplitud que, per raons d'espai, no s'inclou en la seva totalitat: J. AULADELL I J. SIMON, *Estudi arqueometal·lúrgic de les reixes gòtiques de la Catedral de Barcelona*, 2009, inèdit.

El conjunt mostral: les reixes gòtiques de la catedral

Com passa amb altres elements del conjunt monumental, les reixes de les capelles de la catedral de Barcelona foren forjades, reformades o modificades en diverses èpoques. L'estudi arqueometal·lúrgic es centra en l'anàlisi de les reixes gòtiques, bona part d'elles bibliogràficament documentades a partir dels llibres d'èpoques i obres conservats al mateix Arxiu Capitular de Barcelona i amb datacions originals d'entre finals del segle XIV i mitjan segle XVI.²

La necessitat de disposar d'una base cronològica confirmada circumscriu un conjunt mostral temporalment homogeni, al que s'hi afegeixen aspectes determinants, com el grau d'afectació patrimonial o la disponibilitat d'accés. En aquest entorn d'actuació, la possibilitat d'anàlisi s'ha concretat en sis reixes de capelles i una reixa d'accés ubicades a la nau eclesial i al claustre, les quals han proporcionat un total de dinou mostres d'estudi:

Reixa de capella de Sant Antoni de Pàdua i Sants Cosme i Damià (nau eclesial).

Reixa de la capella de Sant Josep Oriol (nau eclesial).

Reixa de la capella del Puríssim Cor de Maria, Sant Sebastià i Santa Tecla (nau eclesial).

Reixa de la capella dels màrtirs de 1936-39 (claustre).

Reixa de l'accés a l'escala del terrat del claustre (claustre).

Reixa de la capella de la Mare de Déu de Lourdes (claustre).

Reixa de la capella del sepulcre de la família Girona Agrafel (claustre).

S'han extret mostres de les diverses parts que conformen les reixes per a procedir a la seva anàlisi metal·lúrgica; el nombre d'aquestes mostres ha variat d'entre dues i tres per reixa, segons les característiques de conservació i disponibilitat de cada element. A fi de complir l'objectiu d'identificar el grau de desenvolupament tecnològic durant el període en el qual fou realitzat, ha calgut obtenir mostres ubicades en àrees concretes i determinants: almenys una de bàsica de les barres horitzontals o passamans, que, amb els barrots, representen el suport estructural, i una o més de posteriors corresponents als elements ornamentals (com ara motllures o decoració annexa) i als elements auxiliars de fixació (com reblons o claus). En aquest article relacionem únicament les mostres corresponents a la reixa de l'accés a l'escala del terrat del claustre (CR05), on s'identifiquen característiques prou representatives del conjunt mostral, reservant l'espai de conclusions per resumir una visió genèrica de la totalitat del *corpus* estudiat.

2. Les referències bàsiques per establir la cronologia del conjunt mostral han estat les següents: L. AMENÓS, *L'activitat i les produccions dels ferrers en el marc de l'arquitectura religiosa catalana (segles XI-XV)*, tesi doctoral, Barcelona, Universitat de Barcelona, 2004; R. FARRANDO i R. OMELLA, *Les reixes de la Catedral de Barcelona*, Barcelona, I. B. Les Corts, 1996.

El mètode experimental

S'han portat a terme els següents estudis analítics del conjunt mostral:

Metal·lografia de l'estructura cristal·lina, mitjançant microscopia òptica i electrònica.

Composició química semi-quantitativa, mitjançant dispersió d'energia de raigs X.

Determinació semi-quantitativa de les fases mineralògiques de les inclusions no metàl·liques atrapades en el metall.

Determinació de les dureses de les diferents estructures metàl·liques, emprant el microduròmetre.

Per poder desenvolupar aquests estudis, hem procedit a obtenir porcions en forma de falca o talls transversals de les àrees d'interès predefinides, sempre amb una superfície metàl·lica inferior a 10x5 mm. Considerant com a mostra la llenca de metall disponible, s'ha encastat en una proveta de baquelita (de 25 mm. de diàmetre) per a possibilitar el seu desbast, polit i posterior atac químic, a fi de permetre l'observació microscòpica de les microestructures existents en la cara metàl·lica. Amb posterioritat a les observacions macroscòpiques inicials, s'ha emprat un equip fotomicroscòpic òptic de reflexió per, tot seguit, utilitzar la microscopia electrònica de rastreig per identificacions a majors augments, tant de la microestructura com de les inclusions no metàl·liques presents, essent el procediment completat amb les proves de determinació de microdureses mitjançant l'indentador *VickersHardness*. Per a comprovar els resultats i concretar l'anàlisi genèrica i puntual dels elements constituents, es recorre a l'anàlitzador per dispersió d'energia de raigs X (EDX).³

La reixa de l'accés a l'escala del terrat del claustre

La reixa de l'accés a l'escala del terrat del claustre és un dels elements de forja de major antiguitat del conjunt, el qual s'elaborà sincrònicament a la construcció de l'arc apuntat amb decoració lobulada, estructura a la qual complementa encaixant amb exemplar conjunció. Inicialment, era l'accés a la petita capella d'advocació a Sant Bartomeu i Santa Isabel d'Hongria, la qual fou patrocinada el darrer quart del segle XIV per Bertomeua Bou, esposa de Francesc de Santcliment, magnats als quals s'atribueixen els elements heràldics fixats a la llinda sobre el batent;⁴ en el mateix sentit, i amb data de 1389, consta el pagament de la reixa al ferrer Pere Orelles (*figura 1*).⁵

3. En el marc del conveni de recerca, el present estudi s'ha realitzat en el Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica de l'ETSEIB (UPC). En el mateix sentit, volem agrair especialment la col·laboració de la senyora Montserrat Marsal, del Servei de Microscopia Electrònica.

4. FARRANDO i OMELLA, *Les reixes...*, pàg. 39.

5. AMENÓS, *L'activitat...*, pàg. 134-135.

En aparença, l'estructura metàl·lica es troba en bon estat de conservació i es caracteritza per un batent d'únic passamà central amb alta freqüència de barrots longitudinals que el travessen, engruixint-ne la secció a cada pas d'element. De bastiment fix encaixat mitjançant espigues als brancalls decorats, sobre la xapa on s'ubica un pany modern, es situa l'anella-tirador, fixada al segon barrot.

També com estructura fixa, es localitzen els esmentats elements heràldics, en forma d'escut: un amb un bou i l'altra amb una campana. A la part superior destaca la decoració de la reixa, que s'integra en l'arc apuntat d'arquets lobulats esculpits a la pedra, perfilant amb vergalina⁶ dos arcs apuntats seriatos amb lòbuls entrelaçats culminats per petites flors, tot just sobre el batent, i, coronant l'estructura, un oval amb quatre lòbuls interns també amb flors a les interseccions de la tija.

DESCRIPCIÓ I INTERPRETACIÓ MICROESTRUCTURAL

Les mostres obtingudes afectes a la reixa CR05 són les següents:

Passamà (travesser horitzontal central): mostra amb referència CR0501 (*figura 2*).

Rebló de fixació de l'argolla-tirador: mostra amb referència CR0502 (*figura 3*).

CR0501

A) DESCRIPCIÓ I ANALÍTICA

La mostra observada presenta una microestructura heterogènia on és present una àrea ferrítica, que ocupa la major part de la mostra, i una altra de ferrítico-perlítica, a la qual s'hi adverteix diferent gradient de carboni. En aquest sentit, a la vora de l'escaire del passamà, que presenta una gran osca en la mostra, s'observa una microestructura hipoeutectoide (aproximadament 0,3% C) caracteritzada per un gra ferrític de grandària mitjana i un gra perlític petit disposat entre les vores de gra ferrític (*figura 4*), essent microscòpicament visible la presència de perlita laminar extremadament fina (*figura 5*). A mesura que es ressegueix la mostra cap a l'interior, l'aceració disminueix progressivament fins arribar a una matriu completament ferrítica, a una distància aproximada de 3 mm. des de l'esmentat escaire; alhora, a mesura que desapareix la carburació, el gra ferrític creix.

L'àrea ferrítica s'estén a ambdues cares del passamà (*figura 6*), si bé en la zona més propera a la cara ampla encara és possible apreciar escadusseres cadenes de cementita terciària lliure entre la granulometria ferrítica. La zona interna de la mostra presenta una microestructura totalment ferrítica caracteritzada per grans de grandària diversa, alguns de força grans i d'altres molt més petits, tots ells amb límits irregulars.

6. Barra de ferro de secció prima, emprada per treballs de menor resistència estructural. Vegeu: P. MOLERA, «Tècnica de la farga», dins S. RIERA (coord.), *La Farga Catalana: un procés siderúrgic autòcton*, Barcelona, Associació d'Enginyers Industrials de Catalunya, 1997, pàg. 43.

En referència a les inclusions no metàl·liques evidenciades, no especialment abundants, es troben disseminades per tota la matriu, sense concentracions o fileres identificades. Es presenten en dos formats ben diferenciats: diverses de rodones i, la major part, de morfologia irregular i fragmentada. En algunes de les darreres, i a gran augment, s'han apreciat diverses fases internes, amb diverses tonalitats de gris i negre, i estructures dendrítiques (*figura 7*).

Els valors de les microdureses realitzades sobre diferents zones de la matriu metàl·lica aporten els següents resultats, els quals confirmen les observacions realitzades:

- a) 108,7 HV a la matriu ferrítica.
- b) 121,7 HV a la matriu ferrítico-perlítica.
- c) 105,2 HV a la matriu ferrítica.

En l'apartat analític, s'ha procedit a realitzar dues analítiques (EDX) de tipus qualitatiu referent als elements compostius de la mostra.

La primera correspon a la matriu metàl·lica (*figura 8*), on s'evidencia el component gairebé exclusiu de ferro, amb un lleu indicatiu de l'element carboni,⁷ sense que existeixi cap altre element minoritari detectat.

La segona analítica qualitativa correspon a una inclusió en la qual s'havien detectat fases diverses (*figura 8*), i on l'EDX indica que hi són presents múltiples elements constituents (*figura 9*). En aquest sentit, l'element que es troba en gran quantitat és el silici (Si) i, en ordre d'intensitat decreixent, el ferro (Fe), el calci (Ca), l'alumini (Al), el potassi (K), el magnesi (Mg) i el manganès (Mn), a part d'oxigen (O₂) i sofre (S), amb una mínima indicació. Aquesta munió d'elements pressuposa la hipòtesi que el silici participa en la formació de més d'un silicat, tenint en compte –encara que no s'ha pogut confirmar amb l'anàlisi– que els nòduls dendrítics blancs semblen d'òxid de ferromanganès. La proporció en què es troba el silici, aparentment més elevada que en els olivins, pot significar que el compost format fou del tipus dels piroxens, els quals incorporen amb facilitat calci i alumini. Quedaria el potassi que, combinat amb el silici, donaria el romanent vitri. La dificultat de l'esmentada exposició es centra en el fet que els piroxens són molt rars com escòries dels processos directes d'obtenció del ferro.

B) INTERPRETACIÓ

La microestructura observada presenta la diversitat pròpia d'un ferro de molt baix contingut en carboni, en el qual s'ha produït una carburació localitzada o cementació, la qual és present en una petita àrea superficial i va minvant en C fins a convertir-se en ferrítica a mesura que s'avança cap a l'interior de la peça.

De ben segur, es tracta d'un ferro de farga, amb qualitat estandarditzada i adient pel treball en forja. A partir d'aquest metall base, es pogueren donar dues possibilitats: una primera, consistent en una certa heterogeneïtat original de la barra, amb zones més carburades produïdes durant la reducció del masser de metall; o una segona, consistent en què, durant el treball de forja i conformació de la reixa, el

7. El C i l'O no són proporcionalment detectats per l'anàlisi espectral.

repòs durant prou temps d'algunes zones de la barra sobre els carbons afavorís la cementació aleatòria localitzada.

En tot cas, la presència d'una zona pròpiament ferrítico-perlítica es tractà d'una circumstància accidental, ja que l'estructura disposava de duresa suficient (entre 105 i 110 HV) per a les necessitats mecàniques i funcionals a menester.

Per la seva part, la grandària i la irregularitat del gra ferrític indica un procés inacabat de creixement possiblement per fusió, quan, a temperatura de recristal·lització insuficient,⁸ els grans s'han anat agrupant eliminant els seus límits, per bé que no de forma majoritària, sense que amb una estabilitat en la temperatura i en el temps la fusió hagi permès incorporar tots els grans petits per a formar-ne de majors amb els límits regulars i poligonals. La limitada temperatura de treball es produí durant l'intens esforç mecànic que es donà a l'objecte per deformar-lo i encabir-hi els barrots, circumstància evident en la fragmentació de moltes de les inclusions no metàl·liques i en algunes deformacions de gra atribuïbles al martelleig. Amb tot, aquesta dificultat de manteniment tèrmic ha provocat la diversitat morfològica del gra, perjudicant la qualitat del metall.

L'anàlisi semi-quantitativa realitzada a la matriu referma la puresa del ferro amb el qual es conformà l'estri, sense cap altre component minoritari que pugui afectar les seves propietats mecàniques.

Altrament, i en relació a les inclusions observades, el seu nombre és prou limitat, fet que indicaria una relativa eficiència en els processos previs de cinglatge en la neteja i purificat del masser i en els treballs mecànics de posterior conformació de l'objecte. Tanmateix, amb els tipus d'anàlitzades, no ha estat factible determinar res més que els elements que han intervingut en la seva formació.

Morfològicament, semblen evidents dos tipus d'inclusió: unes de rodones, que en hipòtesi correspondrien a òxids de ferro i, per tant, foren de primera obtenció, i les fragmentàries, amb diverses fases analitzades. Aquestes semblen correspondre a les habituals escòries del mètode d'obtenció de la farga catalana, amb presència de potassi (K), vinculat al combustible emprat, i de calci (Ca), procedent de la mena original o per transferència de les parets del propi forn de reducció.⁹ Es trobarien formant un mínim de dues fases de silicats complexos, un de cristal·lí i un segon, el fons, possiblement vitri, el qual agrupa diversos dels elements identificats.

CR0502

A) DESCRIPCIÓ I ANÀLISI

La mostra observada presenta una microestructura ben diversa, essent en la seva major part ferrítico-perlítica amb percentatge no uniforme de carboni; tanmateix, en la franja paral·lela al tall recte, s'observa una zona hipereutectoide, molt diferenciada a la resta de la superfície d'estudi, si bé no es homogenia en tot el límit.

8. En un hiatus tèrmic d'entre 900° i 700° C, en la franja entre la temperatura crítica superior i la inferior.

9. Circumstància prou evidenciada en els forns primitius de farga catalana. Vegeu: J. SIMON, *La farga catalana*, Barcelona, Societat Catalana de Tecnologia, 1992, pàg. 107-124.

Iniciant l'observació des del tall recte, s'aprecia que la vora està formada per un hipereutectoide amb possibles cadenes de cementita intersticial (0,9% C aproximadament) (*figura 10*); a mesura que es distancia del tall, la microestructura s'endolceix progressivament (*figura 11*), convertint-se en ferrítico-perlítica, caracteritzada per la disposició acicular, tipus Widmånstatten, de la granulometria ferrítica. Tot seguit, a la zona central de la mostra, amb un percentatge de carboni inferior al 0,3%, els grans ferrítics no es mostren equiaxials, desenvolupant-se els grans perlítics als seus vorals. Finalment, la meitat de la mostra oposada al tall recte presenta un hipoeutectoide de molt baix contingut en C (0,1%-0,2% C), amb gra ferrític equiaxial de grandària molt variable i una més nombrosa presència d'inclusions no metàl·liques (*figura 12*).

Al sector del tall recte, anterior a la zona més carburada, s'aprecia la diferència entre el límit descarburat i l'estructura hipereutectoide ubicada tot seguit. A l'extrem oposat del tall recte s'observa una microestructura ferrítico-perlítica, amb petites àrees en disposició Widmånstatten i d'altres pràcticament ferrítiques, contraposades a la zona ubicada just per sota, d'aparença eutectoide. En sentit cap a la zona més carburada es mostra un increment del percentatge de C de la vora respecte l'anterior, amb major presència de grans perlítics; tot seguit, presenta major carburació i progressiva ubicació dels grans ferrítics aciculars en els límits dels grans perlítics.

En aquesta àrea propera a la vora recta, algunes zones es mostren especialment carburades, arribant gairebé a l'hipereutectoide (*figura 13*), si bé es concentra en una àrea que ocupa un terç de la longitud del tall; la granulometria allí mostrada presenta grans lleugerament deformats compostats per finíssima perlita globular.

La zona de la mostra menys carburada, la major part de la superfície d'estudi, no és, en cap cas, absolutament ferrítica, observant una microestructura ferrítico-perlítica dolça (inferior al 0,2% C). Tanmateix, el gra ferrític no es troba torturat, essent de grandària força homogènia i ubicant els escadussers grans perlítics en els límits de gra.

Les inclusions no metàl·liques evidenciades són més presents a les zones ferrítico-perlítiques, en especial a les ubicades properes al perímetre del rebló. Es presenten en un format força genèric, essent la seva morfologia irregular i fragmentada.

Els valors de les microdureses realitzades sobre diferents zones de la matriu metàl·lica aporten els següents resultats, concordants amb la resta d'estudis realitzats:

- a) 247,5 HV a l'àrea més carburada.
- b) 220,1 HV a l'àrea ferrítico-perlítica.
- c) 253 HV a l'àrea més carburada.
- d) 149,1 HV a l'àrea ferrítico-perlítica.
- e) 115,3 HV a l'àrea ferrítico-perlítica.

En referència a l'apartat analític, s'ha realitzat l'anàlisi qualitativa puntual (EDX) en diferents zones de la mostra metàl·lica; a l'àrea amb granulometria més ferrítica, l'analítica mostra l'element ferro (Fe) com a únic i sense cap altre constituent (*figura 14*).

Analitzada una de les diverses inclusions no metàl·liques visibles (*figura 15*), l'espectre palesa diversos elements, possiblement indicadors de la presència de dues o tres fases diferents. Semblen existir nòduls d'òxid de ferro (wüstita), amb la presència majoritària de l'element ferro (Fe) i també la presència de manganès (Mn), substituïnt al Fe; possiblement existeix, a més, un oliví faialític i una tercera fase, silicat complex, funcionant com a remanent de múltiples components, com el calci (Ca), el potassi (K), el magnesi (Mg) i l'alumini (Al).

B) INTERPRETACIÓ

La mostra d'estudi correspon a un petit rebló de fixació de l'argolla de la reixa. Tanmateix, la microestructura observada presenta prou heterogeneïtat com per no estar proporcionades les seves característiques amb les necessitats mecàniques de l'estri.

La superfície analitzada correspon a la meitat aproximada de la secció del rebló, el qual, mitjançant un tall vertical, es separà en dues porcions. En aquest sentit, s'ha apreciat que la cara recta del tall es trobava molt carburada, essent pròpia d'un acer hipereutectoide, amb dureses properes als 300 HV, confirmades al microduròmetre. Contraoposadament, la resta del metall del rebló es conformà a partir d'acer dolç, amb dureses inferiors però suficients per a la seva funcionalitat.

El tall recte, parcialment hipereutectoide, mostra descarburació en bona part de la seva longitud. Possiblement, això es degué al seccionament del cos del rebló que, separant en calent ambdues meitats, va permetre el contacte del metall amb l'aire ambiental. En el mateix sentit, el martelleig en calent possibilità un recristal·lització dels grans, corregint la deformació provocada en el procés de tall i ajustament físic del clau, concloent amb un refredament a temperatura ambient prou ràpid per a permetre la formació de grans aciculars.

En referència a la inclusió no metàl·lica analitzada, morfològicament representativa de les observades a la mostra, presenta els elements habituals que suposadament formen les fases típiques de les escòries del mètode d'obtenció directa de la farga, amb nòduls formats per wüstita (FeO), una fase cristal·lina faialítica i un fons de silicat actuant com a remanent dels elements minoritaris. La wüstita identificaria escòries de primera reducció, originàries del mineral, i mostraria un procés de depuració i cinglatge deficient, incapaç d'extreure les impureses del metall. La presència de potassi i calci es trobaria vinculada, respectivament, al combustible emprat (carbó vegetal) i, com a hipòtesi, a restes de les parets del forn adherides al masser durant la reducció.

Consideracions arqueometal·lúrgiques sobre la reixa d'accés a l'escala del terrat del claustre

El conjunt mostral de la reixa de l'accés a l'escala del terrat del claustre engloba dues mostres de ferro-acer de dues àrees ben diferenciades, una del passamà, i per tant pertanyent a l'estructura bàsica, identificadora de la naturalesa del material emprat, i l'altre d'un rebló de subjecció, element complementari a la reixa.

Ambdues mostres presenten la microestructura metàl·lica i les inclusions pròpies del ferro obtingut pel mètode català: la provinent del passamà amb estructura ferrítica i ferrítica-perlítica (de baix contingut en carboni) i la del rebló també ferrítica-perlítica però amb una composició i disposició més heterogènia.

Pels efectes que la deformació plàstica va provocar en alguns dels seus grans i per les fissures i esquerdes de les inclusions, el passamà sembla que va estar treballat a cops de martell quan la seva temperatura ja era baixa. Potser aquest fet es troba vinculat al corregiment de les tensions i regularitzacions de volum de la barra quadrangular provocades per les perforacions del pas dels barrots perpendiculars.

Per la seva banda, pel que fa al rebló, la característica metal·logràfica principal consisteix en un major grau de carburació a la zona central de la tija respecte les àrees perimetrals. En aquest sentit, és congruent amb la hipòtesi d'un masser molt heterogeni; així devia ser en el segle XIV, ja que el tractat clàssic de Muthuon¹⁰ descriu com, d'antic, es tractaven les massoques i massoquetes que s'obtenien partint el masser, emprant cinc tipus d'estenalles de grandàries diferents per reescalfar les porcions en el fogar i portar-les sota el martell: es trossejava, s'escalfava, s'estirava i es llençava a l'aigua.¹¹ Tanmateix, no ha d'estranyar que una zona més carburada del masser, o una carburació produïda en un dels escalfaments, en un dels molts passos de compactació i estirament hagi quedat en el centre de la barra amb la qual s'ha realitzat el clau.

La forma descrita d'heterogeneïtat del masser es soluciona tècnicament amb la incorporació de la trompa d'aire o caixa dels vents a la infraestructura de la farga. La trompa proporciona continuïtat i potència al buf i, per tant, més homogeneïtat a la temperatura del forn i, en conseqüència, en la del masser, fet que en bona part elimina les anteriors diferències de carburació en el mateix bloc reduït, quan l'aire s'insuflava mitjançant una o més manxes. El moment de l'avanç tecnològic sembla consolidar-se al llarg del segle XVII.¹²

En referència a les inclusions no metàl·liques, els seus elements constituents assenyalen diferències. A la primera mostra, els esmentats elements fan suposar que el metall ha incorporat a les inclusions no metàl·liques material silícic de les parets del forn¹³ o del decapant afegit durant el procés; altrament, com explica novament Muthuon, en temps més antics circumstancialment es tirava sorra al forn durant el procés d'obtenció, després d'una hora i mitja d'iniciat, per a liquar l'escòria.¹⁴

A la segona mostra hi són presents les intensitats dels elements pròpies de les típiques escòries de primera obtenció.

10. L'enginyer francès J. M. Muthuon, a cavall dels segles XVIII i XIX, s'erigí com un dels més fidels i detallats descripcioners dels procediments de treball de la farga catalana, tant dels processos a ell contemporanis com dels més tradicionals. Vegeu: J. M. MUTHUON, *Traité des forges dites catalanes*, París, Manucius, 1897.

11. «...de manera que el ferro va continuament i sense interrupció, del fogar a l'enclusa tres vegades, de l'enclusa al fogar dues vegades, i la tercera al magatzem...» [traducció del francès] (MUTHUON, *Traité...*, pàg. 191-194 i 203).

12. Actualment es considera, de forma generalitzada, una de les aportacions tècniques autòctones cabdals en el perfeccionament de la farga. Vegeu: A. GALLARDO i S. RUBIÓ i TUDURÍ, *La Farga Catalana*, Barcelona, Exposició Universal de Barcelona, 1930, pàg. 34; J. MASCARELLA, *La farga*, Girona, Diputació de Girona, Caixa de Girona, 1993 (*Quaderns de la Revista de Girona*, 43), pàg. 49.

13. El fet que l'interior del forn no estigués folrat per planxes metàl·liques i que adquirís silici provinent de la pedra i el morter de la obra, ja significaria un model de forn de farga primitiu, molt possiblement anterior al segle XVI, quan s'incorporà la millora. Vegeu SIMON, *La farga...*, pàg. 107-124.

14. «.....es reparteix un o dos grapats de fundent per sobre l'orifici de la tovera» [traducció del francès] (MUTHUON, *Traité...*, pàg. 130).

A partir de les conclusions tècniques de les mostres d'estudi i de les referències bibliogràfiques referents als procediments de la farga més antiga, es pot afirmar que la reixa fou forjada en època medieval, amb infraestructures anteriors a les millores introduïdes a partir dels segles XVI i XVII, corresponent, per tant, a l'original tanca-ment esmentat en les notícies històriques.

Conclusions genèriques a la tecnologia de les reixes de la catedral

El conjunt mostral de l'estudi comprèn un grup representatiu de reixes metàl·liques de la seu. Tanmateix, no en són presents tant les de cronologia dubtosa o clarament moderna com algunes de singulars¹⁵ i les que ferren els nombrosos finestrals. Es tracta, per tant, d'una visió àmplia però no absoluta, si bé representa un apropament a la realitat de la tecnologia metal·lúrgica baixmedieval representada en l'edifici cultual.

Les reixes foren realitzades a partir de ferro o acer forjat obtingut mitjançant el mètode directe, on el metall no assolía la temperatura suficient per passar a l'estat líquid i calia treballar-lo en estat pastós. Amb tot, essent l'estructura de suport de base ferro, nombroses reixes presentaven elements decoratius elaborats amb aliatges del coure, tant bronze com llautó. La combinació d'ambdós metalls responia al pragmatisme respecte a la solidesa de la reixa i, alhora, a l'ostentació artística i decorativa dels elements ornamentals sobreafeigits.

En referència al nivell tecnològic evidenciat a l'estudi arqueometal·lúrgic, cal assenyalar inicialment que la cronologia del conjunt mostral correspon a una franja temporal dels segles XIV-XVI, en la qual encara no s'havia evolucionat al que la historiografia anomena "farga catalana"; si més no, les infraestructures i les tècniques s'ajusten a un estadi previ o precursor de l'esmentada.

En el moment de producció de les reixes només es disposava d'un forn baix, sense recobriment intern amb planxes de ferro, i amb la injecció-subministrament d'aire produïda per manxes. Les particularitats d'aquesta estructura, amb les parets internes nues i sense trompa d'aire, determinà algunes de les principals característiques de les microestructures observades en les mostres de ferro, com la presència de silici originari del recobriment intern del forn en forma d'inclusions entre el metall o l'heterogeneïtat de la distribució del carboni, amb zones pràcticament de ferro pur i d'altres d'acer amb grau de carburació divers. Aquestes característiques resultants han pogut ser reproduïdes mitjançant l'arqueologia experimental, on rèpliques d'aquests models de forns han generat massers heterogenis i amb idèntics resultats metal·logràfics.¹⁶

No obstant això, des del segle XII ja s'havia incorporat la primera gran millora des de la metal·lúrgia antiga: l'aprofitament de l'energia hidràulica, que s'aplicà al

15. Entre d'altres, no s'inclou el conjunt de baranes del baptisteri i de l'àrea de la cripta, algunes elles elaborades, segons la documentació històrica, per mestres flamencs i alemanys entre finals del segle XIV i inicis del XVI.

16. C. FORRIÈRES i P. MERLUZO, «Les premières étapes du travail du fer en foyer de forge, selon des procédés traditionnels japonais», dins P. BENOIT, *Paleometallurgie du fer & Cultures*, Paris, Vulcain, 1995, pàg. 71.

moviment del gran martell o martinet, la qual cosa va permetre compactar més eficientment la massa de ferro i expulsar-ne les escòries a fi d'assolir un metall més net. També hi ha constància de l'aprofitament de la tracció generada per l'energia hidràulica per activar les grans manxes que insuflaven l'aire que propiciava la combustió dins el forn, circumstància que ajudà a elevar la temperatura interna afavorint la reducció del mineral.

Amb aquestes condicions, els centres productors de ferro, les “fabrica” o posteriorment “fargues”, iniciaven el cicle comercial del metall, el qual, segons notícies més tardanes,¹⁷ era transportat fins a magatzems situats en poblacions properes, des d'on agents comercials subministraven matèria prima en formats diversos.¹⁸ Els destinataris del producte, en aquest cas els serrallers barcelonins, el forjaren per elaborar les reixes de la catedral.

El ferro estudiat presenta unes qualitats prou específiques, fruit de les característiques d'aquestes infraestructures i del procediment tècnic amb el qual s'elaborà l'objecte final. Generalment, el metall és de gran puresa, corresponent a un ferro gairebé pur o un acer amb molt baix percentatge de carboni, el que en nomenclatura fargaire s'identificava com a “ferro dolç” o “ferro bo”. Aquest producte, destinat a l'estructura de la reixa, li conferia una duresa relativa però suficient per a les seves necessitats mecàniques, un alt límit elàstic i una gran tenacitat, entesa com a tal la capacitat d'absorbir energia i deformar-se plàsticament sense trencar-se. També s'emprava la tècnica de la soldadura, amb capes de diferent gradient de carboni, que permetia conferir especials propietats mecàniques a aquells elements, reblons o claus, que havien de suportar tensions específiques. Aquest fet indicaria que la perícia dels artesans els permetia, mitjançant el color i la resistència al tall del masser de ferro, identificar les àrees més carburades i separar-les per a treballs amb necessitats concretes.

En el mateix sentit, el producte mostra una especial resistència a la corrosió que li confereix una llarga, i encara actual, perdurabilitat. Si bé la teòrica de la metal·lúrgia considera que un dels motius d'aquesta pervivència es deu a l'estructura fibrosa de la granulometria del metall, en cap mostra del conjunt estudiat no s'ha observat; ans al contrari, són característica prou comuna les microestructures no deformades, gairebé amb grans ortogonals, que indiquen un treball mecànic quasi sempre en calent, a temperatura de recristal·lització, que aconseguia una continuïtat del metall menys propensa a la fragilitat o al trencament. En el cas de les reixes de la seu, el bon estat de conservació es deu a que el ferro obtingut pel mètode directe no assolia temperatures suficients per, en una fusió completa, incorporar d'altres elements que, moltes vegades, podien ser perjudicials. Amb aquesta puresa del metall, i la formació, en procés natural, de l'òxid ferros-fèrric (magnetita), de color negre, molt adherent a la superfície del metall i pràcticament impenetrable a l'aire atmosfèric, les reixes quedaven protegides. L'increment de la contaminació ambiental des dels inicis de la industrialització i el lent deteriorament

17. La descripció correspon al segle XVIII, essent possiblement traslladable a èpoques anteriors (C. MAS, *Història de la farga catalana*, Barcelona, Pagès, 2000, pàg. 278-279).

18. Del procés de reducció del mineral i postreducció, els fargaires n'obtenien almenys dues qualitats de ferro i diversos formats del metall per comercialitzar, base dels futurs objectes forjats; els formats més generalitzats foren la verga o vergalina, els barrots quadrats, les llaunes o barres i el cairal. En època més antiga, la nomenclatura dels productes i els formats variava per contrada i època. Vegeu: AMENÓS, *L'activitat...*, pàg. 23-25; i MOLERA, «Tècnica...», pàg. 43.

físic ha provocat l'aplicació de capes de laca i pintura anticorrosiva que, d'entre altres conseqüències, ha homogeneïtzat la imatge de les reixes, cobrint els colors naturals del ferro, o dels seus òxids, i els aliatges del coure.

Pel que fa a l'anàlisi de components, s'ha reconegut l'existència de manganès en totes les mostres. Aquest element és habitual en les menes catalanes, preferentment les del Pirineu i la Catalunya nord, però també existeix en àrees prelitorals, que acostumen a portar manganès incorporat. El fet també ajuda a pressuposar que el ferro treballat fou un producte autòcton, obtingut de jaciments catalans, reduït a fargues del país i adquirit per l'artesà final, el serraller que acabava elaborant el producte.

El manganès només es troba en les inclusions, mai en la matriu metàl·lica, fet indicador que el forn d'obtenció no treballava a altes temperatures, circumstància que hagués permès el pas d'aquest element al metall. És indicatiu que es verificués metal·logràficament que l'única mostra amb manganès a la matriu metàl·lica es tractava d'un producte de fosa moderna.

També s'ha identificat sofre en alguna de les inclusions de les mostres, element indesitjable en la matriu metàl·lica perquè la fragilitza, però que no afecta si es troba en les inclusions, com és el cas. Tanmateix, si el carbó de llenya quasi no en porta, no hi ha certesa sobre el seu origen. Una hipòtesi indica que l'element és present en petita proporció en el pi mediterrani, essent inexistent en el pi dels Pirineus: aquest fet podria indicar el combustible del forn de reducció i, per tant, localitzaria encara més, en el cas de la reixa concreta, la farga productora del maser en un indret del litoral o prelitoral català.

En relació als aliatges del coure presents en les reixes, aquests es limiten a l'ornamentació i al complement de l'estructura de ferro i acer, bàsicament en els petits motius florals que decoren els accessos i a les motllures dels bastiments i batents. Tant les dimensions com el detall de formes obligava a un minuciós treball del metall, poc adient a la forja i més factible de realitzar recorrent a les tècniques d'emmotllament, el qual no era factible amb la tecnologia metal·lúrgica del ferro d'aquell moment. La manca de necessitats mecàniques específiques per aquests elements propicià l'ús de metall amb menys duresa però amb un punt de fusió prou baix per, en estat líquid, emmotllar-lo i aconseguir la morfologia desitjada.

El conjunt mostral palesa diferències notables en el metall base coure emprat. Per una part, es troba bronze, coure i estany en proporcions diverses d'aliatge, sobretot utilitzat per a les motllures, a les quals confereix un color rogenc fosc; per altre, s'hi detecta l'ús del llautó, coure i zinc,¹⁹ principalment dedicat a les fines decoracions vegetals, a les que dota d'un color daurat brillant i clar. Si bé semblaria evident el reservar el bronze, més dur, per a les motllures, i el llautó per als ornaments afegits, en algun cas la utilització és a la inversa.

Tanmateix, alguns dels treballs denoten manca d'interès per les propietats mecàniques, essent l'única motivació l'aspecte cromàtic. S'evidencia l'ús de materials amortitzats com a metall base, barrejant objectes de composició diferent que provoquen mostres de bronze-llautó, amb objectes d'aliatge de coure, estany, zinc i plom, simultàniament. La presència del plom resultava perjudicial perquè provo-

19. El zinc no s'aïllà fins el segle XVIII. En època anterior s'afegien carbonats de zinc, majoritàriament calamina, al coure en estat fos.

cava major capacitat de deformació però, paral·lelament, facilitava l'emmotllament del producte resultant.

La bellesa dels bronzes i llautons en el conjunt de les reixes obligava a un manteniment periòdic per evitar l'aparició de carbonats, els quals cobrien la lluentor del metall amb el clàssic verdet, fàcilment eliminable amb un poliment de pedra porosa.

Finalment, cal esmentar la persistència de diversos arranjaments realitzats en determinades reixes. S'ha pogut apreciar que, en una de les reixes del conjunt mostral, es conservà l'estructura original de forja, a la qual s'anaren aplicant cobertes de pintura protectora, i s'afegiren dues modificacions en èpoques posteriors. La primera, de mitjan segle XIX i potser vinculada a les obres sufragades per Manuel Girona, quan s'elaboraren unes motllures per a bastiment amb ferro de fosa. En les inclusions no metàl·liques identificades es detecten indicis de la utilització de carbó vegetal per alimentar l'alt forn.²⁰ L'anàlisi d'un fris neogòtic incorporat per la cara externa, format per globelets i arcuacions apuntades seriades, mostraria una reforma posterior, possiblement de mitjan segle XX, amb un metall propi de foneria contemporània.

Les reixes de la catedral serien, per tant, indicadores d'unes infraestructures i uns procediments de treball d'una "farga catalana" primerenca o no plenament desenvolupada, quan encara no s'havia assolit un domini total de les condicions que afectaven el masser i on només la perícia empírica de l'artesà aconseguia un grau suficient d'homogeneïtat del producte, el qual, en qualsevol cas, no abastava el nivell qualitatiu que les millores tècniques posteriors li aportarien. Amb tot, la fama del ferro medieval català el convertí en un dels principals productes d'exportació en l'àmbit de la Mediterrània, amb normes que impedièren la utilització de mineral forà o el comerç amb potències rivals, i amb prestacions plenament comparables a produccions centreeuropees contemporànies de llarga tradició minera i metal·lúrgica.

20. Es documenta la utilització de carbó vegetal en fases poc evolucionades de l'ús de l'alt forn, que a Catalunya comprendrien bona part del segle XIX. Vegeu: S. RIERA TUÈBOLS, «Algunes dades i reflexions del desenvolupament tècnic a Catalunya del segle X al XIX», dins RIERA, ..., pàg. 7-16.



Figura 1. Imatge genèrica de la reixa de l'accés a l'escala del terrat del claustre

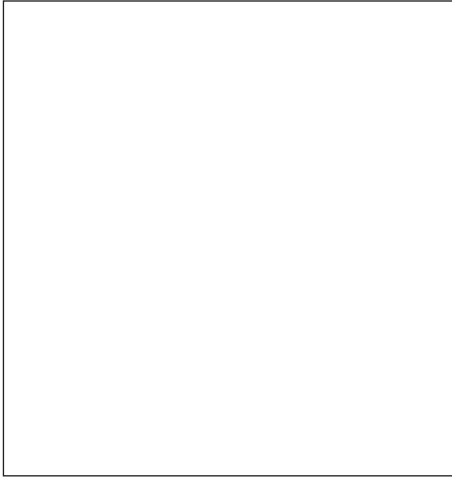


Figura 2. Imatge de la mostra CR0501 amb referències del tall. Els núm. identifiquen les fotografies de microscopia; les lletres, les microdureses.

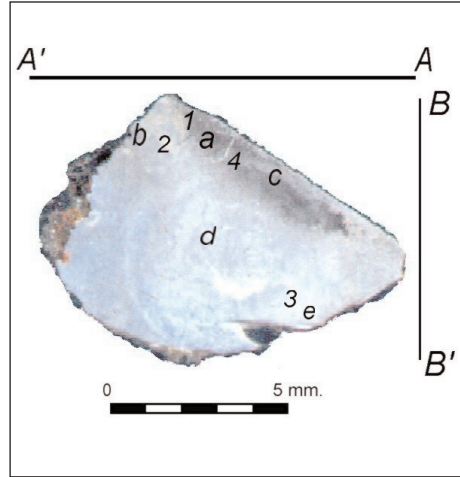


Figura 3. Imatge de la mostra CR0502 amb referències del tall. Els núm. identifiquen les fotografies de microscopia; les lletres, les microdureses.

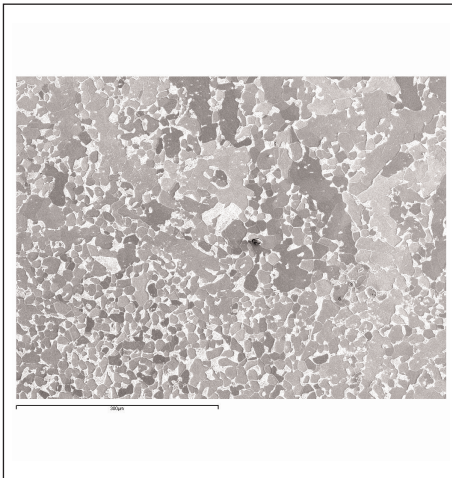


Figura 4. Imatge de la microestructura ferrítico-perlítica identificada prop de la vora de la mostra (microsc.elect., esc.-gràfica).

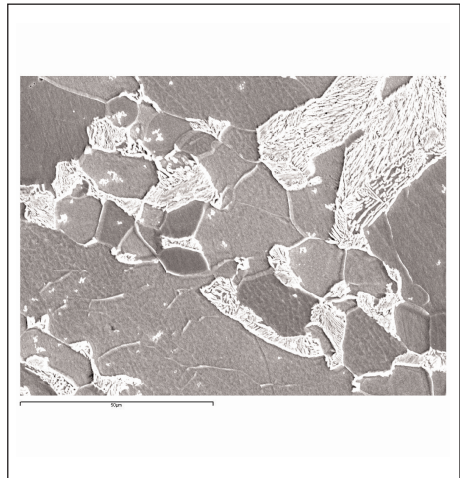


Figura 5. Detall de perlita laminar a la zona ferrítico-perlítica (microsc.elect., esc.gràfica).

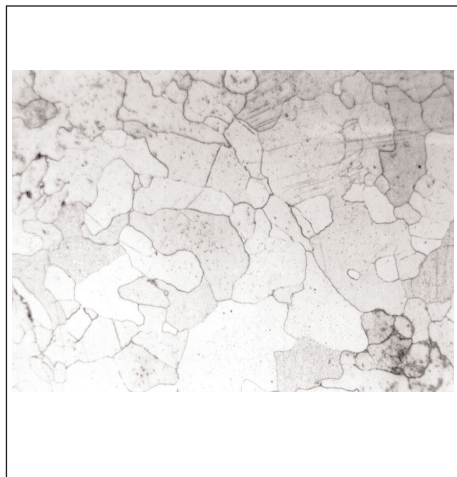


Figura 6. Detall de la zona ferrític-perlítica de la mostra (microscòpic, x 440 augm.).

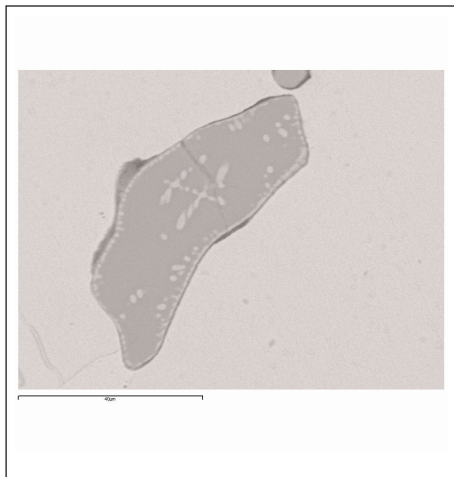


Figura 7. Detall d'inclusió no metàl·lica formada per diferents fases (microsc. elect., esc. gràfica).

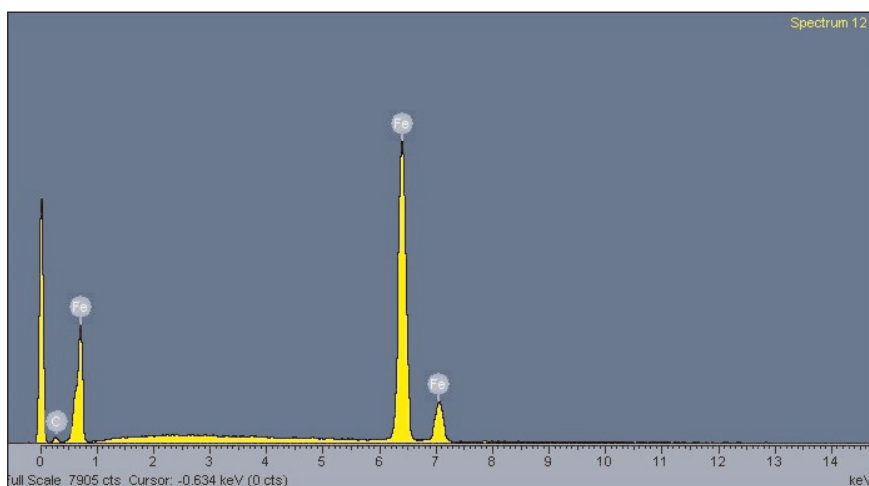


Figura 8. Anàlisi qualitatiu de la matriu metàl·lica de la mostra CR0501.

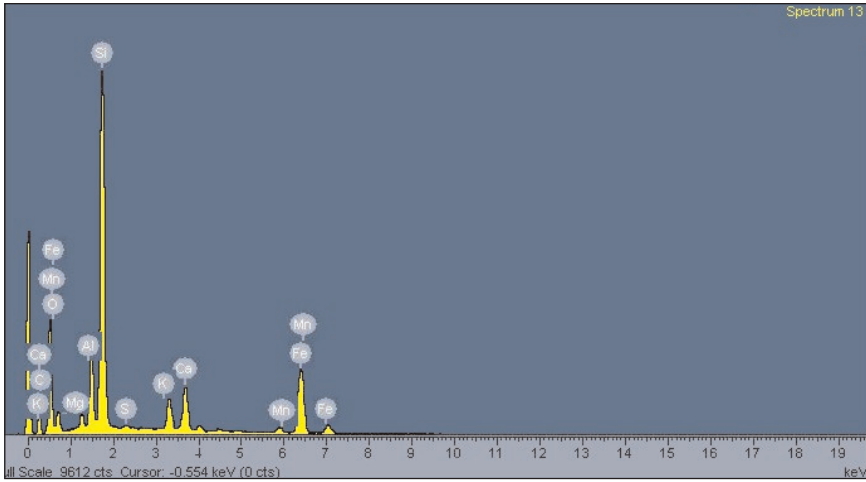


Figura 9. Anàlisi qualitatiu de la inclusió no metàl·lica referenciada a la *Figura 7*

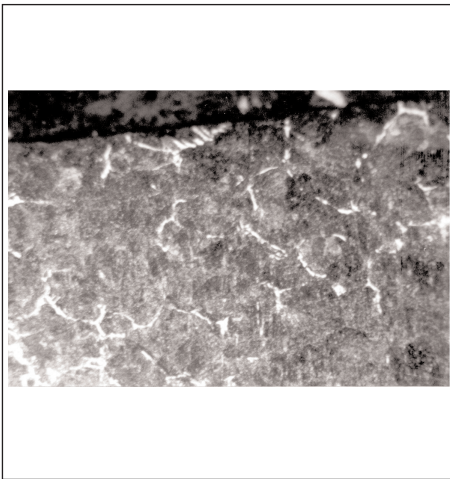


Figura 10. Vora amb microestructura hipereutectoide (microsc.òptic, x 440 augm.)

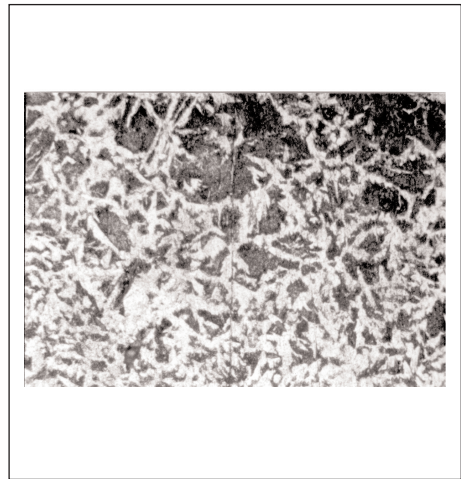


Figura 11. Microestructura ferrítico-perlítica amb ferrita en disposició Widmanstätten (microsc.òptic, x 440 augm.).

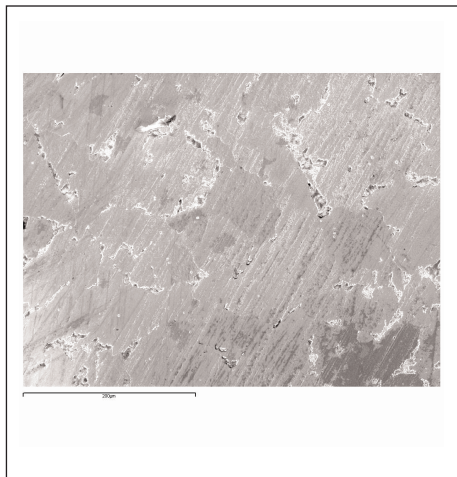


Figura 12. Zona hipoeutectoide amb baix contingut de C (microsc.elect., esc.-gràfica).

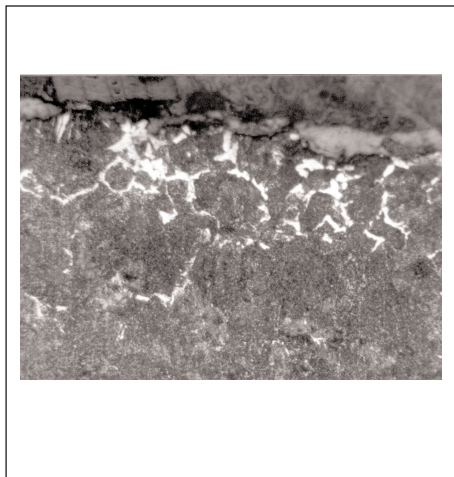


Figura 13. Detall de la vora molt carburada (microsc.òptic, x 440 augm.).

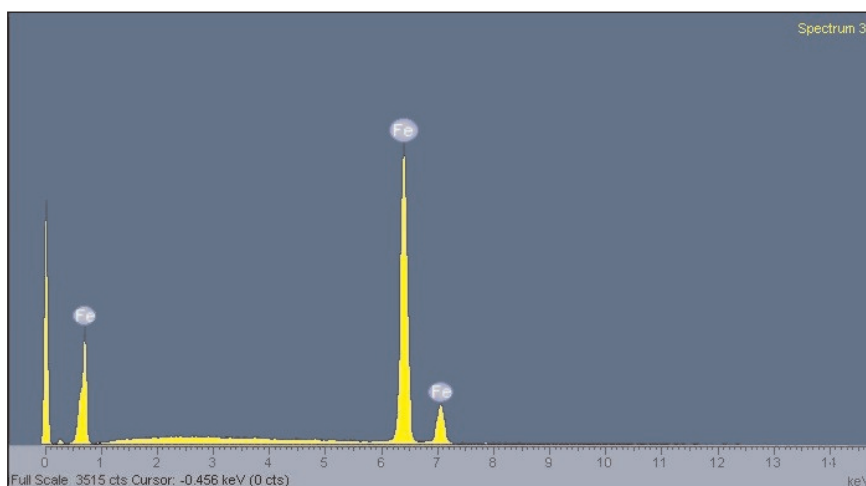


Figura 14. Anàlisi qualitatiu de la matriu metàl·lica a CR0502.

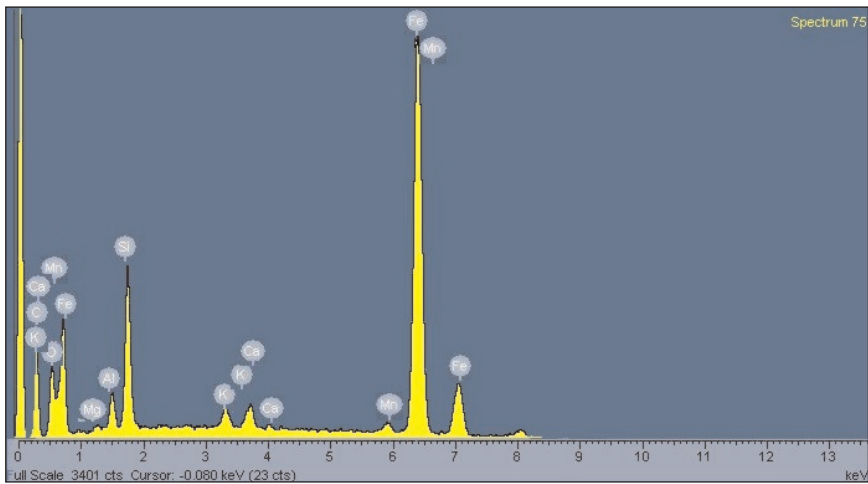


Figura 15. Anàlisi qualitatiu de la inclusió no metàl·lica a CR0502.