

LA METALLURGIA IN ETÀ CLASSICA E MEDIOEVALE

I METALLI NEL MONDO GRECO-ROMANO

Nel mondo greco-romano la metallurgia ebbe un'importanza di gran lunga inferiore a quella attribuita oggi, nel nostro mondo. Nell'architettura, nelle opere idriche, nelle costruzioni navali di quei popoli, metalli svolsero infatti una funzione quasi irrilevante. Basta ricordare che in quei tempi la maggior parte del macchinario veniva costruito con legname. La metallurgia greco-romana non fu altro che la continuazione di quella dell'antico **Vicino Oriente** e costituì la fase dell'età del ferro in cui il rame e il bronzo andavano solo lentamente cedendo il posto ai nuovi arrivati, vale a dire al ferro e all'acciaio. I Greci e i Romani apportarono alla conoscenza degli antichi fabbri soltanto due contributi d'importanza fondamentale e cioè a) la produzione del mercurio e le sue applicazioni per l'estrazione dell'oro; b) la produzione della lega rame-zinco, in altre parole dell'ottone. In ogni modo la metallurgia rimaneva essenzialmente una tecnica di fusione con carbone, con tutte le limitazioni che questa imponeva. Il carbone scarso nella regione mediterranea, e il suo impiego in metallurgia fu tentato per la prima volta nelle fucine e nelle fonderie dei fabbri dell'Europa occidentale e centrale. Nell'età classica il disboscamento nel bacino mediterraneo era divenuto massiccio, per cui prezzi del legname erano in costante e paurosa ascesa. In questo mondo ad economia ancora essenzialmente agricola, le miniere e le fonderie rappresentavano, volendo riportare una felice espressione del Rostovtzeff, mere "isole in un mare di campi e prati". Mancavano, in effetti, delle vere zone industriali.

Nonostante tutto cioè resta il fatto che i Romani lasciarono alle future generazioni ben pochi giacimenti superficiali da scoprire (fig. 4). I loro tentativi di sfruttare giacimenti minerali più profondi furono in ogni modo limitati dall'elevato costo dei pozzi, dal trasporto dei minerali e dal prosciugamento delle miniere, nonché dalla scarsità della manodopera, che divenne particolarmente acuta nel secondo secolo d.C. I Romani rilevarono le imprese di sfruttamento e di fusione elleniche e ampliarono la loro portata, stimolando la suddivisione del lavoro e l'aumento degli specialisti.

Emanarono leggi minerarie e, più che innovatori, nel campo della metallurgia essi furono organizzatori e amministratori d'impresе minerarie. La mancanza d'adatti motori primari fece fallire i loro tentativi di sfruttare giacimenti minerali più profondi e di introdurre nell'uso comune una maggiore quantità di prodotti metallurgici.

L'ORO

Durante l'età classica, l'Egitto perse il suo virtuale monopolio della produzione aurifera (vol. I, pp. 588-91). Giacimenti alluvionali furono scoperti nel bacino del Mediterraneo e in Europa, ma i pochi giacimenti auriferi importanti dell'Asia Minore occidentale, fra i quali notevoli quello sulle rive del Pactolus e quello in prossimità di Astyra nella Troade che si dice avesse costituito le sorgenti della ricchezza di Troia, andavano esaurendosi. I giacimenti alluvionali della Tracia e della Macedonia, sfruttati sin dall'età del bronzo, offrivano ormai ben poche risorse, e così anche quelli delle isole egee. Ciò nonostante, molto oro vergine proveniva a Roma e alla Grecia dal traffico con l'Europa centrale ed occidentale. Secondo la tradizione classica, la Britannia fu considerata una forte produttrice d'oro: in realtà probabile che esso provenisse dall'Irlanda. Nella regione basca della Spagna i Romani organizzarono una produzione d'oro su larga scala, realizzando imponenti opere di ingegneria per il convogliamento e l'immissione di enormi quantitativi d'acqua alle falde aurifere, che venivano in tal modo disgregate. Dall'osservazione di alcune ghiaie bianche si era acquisita una notevole esperienza nell'individuare i minerali auriferi ed era stato scoperto che alcuni minerali di rame, in particolare gli strati ossidati superiori, spesso contenevano oro in notevoli proporzioni.

I processi sostanziali di affinamento, consistenti essenzialmente nella separazione dell'oro metallico dalla matrice, subirono nel complesso pochi mutamenti. I metodi d'assaggio erano già stati da tempo migliorati¹ e nei metodi di affinamento mediante coppellazione come anche nei

¹ Naturalmente per provare l'oro, la "prova del fuoco" avrebbe provocato la perdita di preziosa argento eventualmente presente insieme con le altre impurità metalliche. Le leghe oro-argento erano quindi sfregate su una pietra di paragone, e il colore del segno prodotto era giudicato alla luce dell'esperienza oppure mediante il confronto con un'altra lega di

trattamenti con sale e zolfo adottati per la separazione dell'oro dai metalli comuni², non furono apportati mutamenti di rilievo. A questi più antichi procedimenti si aggiungeva ora quello dell'amalgamazione. Data la mobilità del mercurio, l'estrazione del metallo dai suoi minerali (principalmente solfuro, HgS) non presentava eccessive difficoltà. Con l'arrostimento il mercurio viene distillato, per cui forni devono essere muniti di opportuni impianti di condensazione. I Romani, agli albori della nostra era cominciarono a produrre mercurio in Spagna. I minerali auriferi frantumati venivano trattati con mercurio, e l'amalgama che ne risultava veniva separata dalla ganga comprimendo il tutto in pelli; il mercurio infine veniva distillato. Tale procedimento ci viene descritto in forma succinta da Plinio e fu comunemente praticato nel Medioevo.

In Spagna, al tempo dei Romani, per estrarre l'oro dal rame venne applicata la liquazione³, procedimento che permise di accrescere ulteriormente la produzione aurifera del mondo antico e, nello stesso tempo, di recuperare il prezioso metallo dalla produzione del rame. Questo nuovo sistema per l'estrazione dell'oro venne in uso nel primo secolo a.C. e andò assumendo crescente importanza. Il rame e il piombo, allorché fusi insieme, non si dissolvono in misura rilevante l'uno nell'altro, e l'argento di gran lunga più solubile nel piombo che non nel rame; col processo di liquazione si sfruttarono queste proprietà. Il rame contenente argento e oro veniva mescolato con una quantità di piombo pari a tre o quattro volte il proprio peso, e quindi fuso in pani. Durante questa operazione, la lega di argento e oro veniva incorporata dal piombo. Questo veniva poi lentamente fuso e suddiviso in pani, portando in tal modo l'argento e l'oro con sé e lasciando un pane poroso di rame. L'oro e l'argento venivano poi recuperati dal piombo mediante coppellazione.

La produzione di oro e di argento puro mediante tali procedimenti consentì agli antichi di legare i due metalli in proporzioni diverse per usi artistici e di altro genere; famoso fu "il bronzo di Corinto", una lega di oro, argento e rame. La produzione di oro in foglie fu molto migliorata dai Romani, che erano in grado di produrre foglie di spessore circa doppio del limite più basso raggiunto nei nostri tempi: infatti da un'oncia di oro battuto si ottenevano circa 750 foglie di circa 25 centimetri quadrati. L'oro veniva anche laminato. Il processo d'amalgamazione venne pure usato per recuperare i fili d'oro dalle stoffe donate e costituì una delle operazioni fondamentali degli antichi alchimisti (cap. 21). In realtà l'affinamento dell'oro era estremamente collegato con l'antica alchimia e con la credenza che i metalli si perfezionassero in natura e che nelle miniere essi germogliassero, credenza probabilmente incoraggiata dalle forme dendritiche di alcuni giacimenti d'oro e di argento vergine; le miniere venivano talvolta chiuse per un certo periodo di tempo con la speranza che esse si arricchissero nuovamente.

L'ARGENTO E IL PIOMBO

Il piombo e l'argento venivano ottenuti in massima parte dalla fusione della galena (solfuro di piombo), che generalmente contiene piccoli quantitativi d'argento. Le tecniche d'arrostimento e di riduzione che si svilupparono a tale scopo nell'antico Vicino Oriente (vol. I, p. 593) Si erano, nel periodo miceneo, propagate verso l'ovest: dall'Asia Minore a Greta, nell'Egeo e nella Grecia continentale. La maggior parte dei piccoli giacimenti insulari di galena, quali quelli di Taso, nell'era classica risultavano già esauriti, o addirittura sommersi dal mare, come quello di Sifno. Essi scomparvero completamente ai tempi della scoperta di ricchi giacimenti di galena nel Laurio, nei pressi di Atene, avvenuta nel sesto secolo a.C. Questi giacimenti divennero il principale sostegno dell'economia ateniese. Altre miniere furono sfruttate nella Tracia e nella Macedonia. Galena e argento provenivano anche dall'Ungheria, dal Tirolo, dai monti Harz, dalla Britannia e dalla Francia, ove, durante il periodo di La Tène, vennero generalmente adottate le tecniche produttive del Vicino Oriente in sostituzione delle più antiche tecniche di fusione della tarda età del bronzo. Le miniere d'argento della Sardegna, e soprattutto quelle della Spagna, ebbero una notevole

composizione nota. Non va dimenticata, inoltre la correlazione più complicata fra composizione e densità scoperta, secondo la leggenda, da Archimede nel suo bagno (3° sec. a.C.).

² Coppellazione: l'oro e l'argento impuri erano fusi con piombo; nel forno il piombo fuso si ossidava e formava un litargirio contenente tutti gli ossidi del metallo base, lasciando un nucleo di lega argento-oro. Per separare l'argento dall'oro si faceva uso di zolfo a, di solfuro d'antimonio oppure di una varietà di sale comprendente il cloruro di sodio. Lo scopo principale era quello di combinare l'argento in modo da ottenere un composto (per esempio, solfuro, cloruro ecc.) che lasciava un nocciolo d'oro raffinato. Gli acidi minerali non erano ancora in uso.

³ Liquazione: separazione dei metalli mediante graduale fusione dei metalli stessi a dei loro miscugli eutettici.

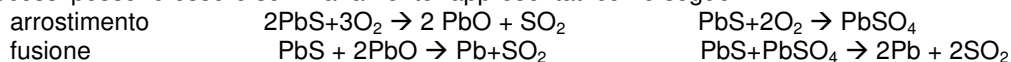
importanza nell'economia romana. Per l'invasione dell'Italia (218-203 a.C.) Annibale raccolse fondi necessari dalle ricche miniere di argento di Cartagena nella Spagna del sud. L'autore del primo libro dei Maccabei (circa 100 a.C.) non ebbe alcun dubbio su ciò che i Romani fecero in Spagna per ottenere argento e oro (i Maccabei 8.3). Nell'età classica i minerali erano diventati un fattore importante nella politica mondiale.

Nel Laurio un piombo argentifero fu estratto dalla galena mediante un procedimento risultante dalla combinazione dell'arrostimento e della fusione⁴. La lega piombo-argento in tal modo ottenuta veniva poi concentrata. L'arrostimento trasformava la galena parte in litargirio e parte in solfato di piombo, mentre con la fusione, ottenuta aumentando la temperatura allorché si raggiungeva il giusto grado di desolforizzazione, si otteneva il piombo. Il trattamento veniva eseguito in forni primitivi costruiti con argilla e con pietre, che venivano poi utilizzate allorché il forno, dopo una vita relativamente breve, si disgregava. In molte località dell'Impero Romano, come ad esempio in Britannia, i forni venivano costruiti sui versanti delle colline in modo da utilizzare i venti prevalenti per il tiraggio. Il piombo grezzo, chiamato plumbum, conteneva da 45 a 80 onces e più d'argento per tonnellata.

Sembra che presso gli antichi il principio del processo Pattinson, del diciannovesimo secolo, fosse in parte già conosciuto. Allorché si fonde del piombo ricco di argento, i cristalli che si formano all'inizio del raffreddamento sono costituiti da piombo quasi puro, per cui la parte liquida viene ad arricchirsi di argento. Tale procedimento può essere ripetuto fino a che il contenuto di argento non raggiunga la percentuale compresa tra 1'1 e il 2 per cento. La lega così ottenuta può essere quindi coppellata per ottenere l'argento, e il litargirio formatosi può essere nuovamente trasferito ai forni di fusione. Studi recenti hanno dimostrato che ciò era quanto avveniva nel Laurio, ed è stato accertato anche che gli antichi Greci erano in grado di disargentare il piombo in modo tanto efficace da lasciare in esso solo lo 0,02 per cento del prezioso metallo. I fonditori romani riuscirono persino a migliorare tale record, raggiungendo un limite di circa 0,01 per cento, e tale fu il limite mantenuto persino nel sedicesimo secolo: infatti Agricola ci dà una cifra equivalente allo 0,008 per cento. I moderni processi consentono di lasciare non più dello 0,0002 per cento d'argento.

I primi risultati eccellenti furono ottenuti soltanto dopo grandi perdite subire durante le fasi preliminari del processo. Le varie tecniche — di arrostitimento, fusione, liquazione, coppellazione — non ponevano allora essere controllare mediante misurazioni termiche e analisi chimiche. Sebbene gli antichi metallurghi fossero in grado di disargentare nel modo più efficace il piombo grezzo, l'estrazione di quest'ultimo dal minerale risultava molto dispendiosa, dato che una buona parte d'argento andava perdura con il piombo nelle scorie d'arrostimento e fusione iniziali. Nel Laurio, ad esempio, per ottenere piombo discretamente puro era necessaria un'elevata temperatura, in modo da assicurare una completa scorificazione delle impurezze, le quali includevano zinco e ferro. Per tale motivo, oltre il 10 per cento del piombo, e più del 33 per cento dell'argento, rimanevano nelle scorie⁵.

⁴ I processi possono essere sommariamente rappresentati come segue:



⁵ Un'efficiente fusione dei metalli dipende da un adeguato controllo della scoria. Il processo di scorificazione ha lo scopo di fluidificare la ganga, ovvero il materiale terroso mescolato col minerale, e il compito non meno importante di assorbire impurità come gli ossidi dei metalli indesiderati. Una scoria acida, per esempio quella silicea, è in grado di rimuovere gli ossidi basici, mentre una scoria basica, generalmente ottenuta con calce, è in grado di assorbire le impurità acide. Purtroppo gli ossidi metallici più importanti (come, per esempio, quelli di Pb, Fe e Sn) solo raramente appartengono nettamente a una di queste due categorie. sicché dare eccessiva importanza alla purezza del metallo fuso può condurre a una notevole perdita di esso nella scoria.

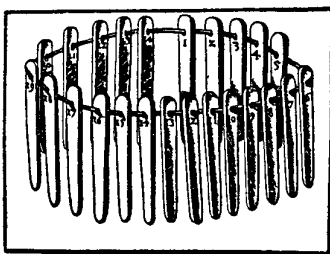


Figura 27 Una serie graduata di aghi per lo sfregamento della pietra di paragone. Il colore della traccia prodotta, confrontato con un campione, indica la quantità d'argento presente. Agricola si dilunga in particolari. Aaricola 1556.

I Romani erano ben consapevoli di tali perdite e, con la loro maggiore esperienza, cercarono un metodo di separazione più efficace. A tal proposito Strabone riferisce che «le miniere d'argento dell'Attica [e cioè quelle nel Laurio] furono in origine preziose, ma in seguito decadde. Inoltre, coloro che le sfruttavano, allorché esse cominciarono a dare solo magri risultati fusero nuovamente i vecchi rifiuti, o fecce, riuscendo così ad estrarre da essi altro argento puro, dato che gli antichi lavoranti erano inesperti nell'arte di riscaldare il minerale nei forni». Allorché nel secondo secolo a.C., dopo che i Romani avevano estratto altri quantitativi d'argento, la produzione nel Laurio cessò definitivamente, qualcosa nell'ordine dello 0,005-0,05 per cento d'argento ancora rimaneva in oltre due milioni di tonnellate di scoria, il cui sfruttamento finale doveva essere intrapreso soltanto nel 1864 da un'impresa siderurgica.

Poco sappiamo circa la costruzione dei forni che venivano usati. Sembra che quelli del Laurio fossero abbastanza alti e che la parte superiore servisse per la fusione, mentre quella inferiore pare fosse usata per l'ossidazione prima della coppellazione. Ci viene riferito che in Spagna i forni di fusione del piombo erano dotati di camini "affinché il gas (biossido di zolfo) che si sprigiona dal minerale possa essere trasportato in alto nell'aria, data che esso è greve e mortale." Raffigurazioni di tali forni sembra che siano state reperite in Sardegna .

I Romani spesso usavano forni a pozzo scavati sul posto, e aventi tuyères per soffiare sulla superficie in modo da ossidare il piombo e liberarlo dalle scorie durante la coppellazione. Questa comunque veniva di solito eseguita in piccoli crogiuoli rivestiti di cenere d'ossa, la quale aveva la funzione di assorbire parte delle scorie.

Per un primo assaggio dell'argento veniva usata la pietra di paragone⁶ (fig.1) e, come alternativa, molti raggugli sul grado di purezza potevano essere ottenuti mediante il cauto riscaldamento del metallo nelle mani di un esperto. È probabile che un più accurato assaggio abbia interessato la coppellazione gravimetrica.

L'argento era importante non solo in oreficeria, ma anche nella coniazione delle monete, che infatti erano generalmente d'argento. Tali monete di solito contenevano circa il 10 per cento di rame, valore che ben concorda con l'affermazione di Plinio che il tribuno Livio Druso (91 a.C.) 'legò l'argento [nelle monete] con un'ottava parte di bronzo". Queste monete furono sempre stampate fra due forme (fig.446); esse possono facilmente essere distinte dagli antichi fucinati, che generalmente contenevano moltissimo rame e zinco ed erano di solito prodotti con fusioni.

Il piombo e il litargirio erano prodotti in notevoli quantità: lamiere e barre di piombo erano largamente usate nell'edilizia, le pareti di pietra erano tenute insieme con morsetti di piombo anche nell'età micenea. Il piombo in lamiera trovò la sua più frequente applicazione nella copertura dei tetti. Allorché le proprietà meccaniche non erano considerate indispensabili ed erano richieste basse temperature di fusione, il piombo veniva anche usato in bronzi economici, in sostituzione della stagno. Le tubazioni di piombo ebbero parte preminente nell'approvvigionamento idrico (cap. 19), e anche le saldature col piombo furono comunemente praticate; le formule date da Plinio per le saldature eseguite con stagno e piombo ben reggono il paragone con quelle odierne. I Romani sapevano che il piombo produce segni neri sulla pergamena, e il termine inglese lead pencil (matita di piombo) è derivato da tale uso, sebbene le moderne matite non contengano piombo, ma grafite.

STAGNO, ANTIMONIO E ARSENICO

I metallurghi greci e romani trovarono giacimenti di stagno poveri e di difficile sfruttamento. I giacimenti di stagno alluvionale e i minerali veniferi del Vicino Oriente si erano già da tempo

⁶ La pietra di paragone era generalmente costituita dal minerale siliceo nero, non friabile. noto come lidite o pietra lidiana.

esauriti, sicché il metallo doveva essere importato dall'Europa centrale e occidentale. Lo stagno proveniente dalla Spagna settentrionale, dalla Bretagna e dalla Cornovaglia era infatti indispensabile alla metallurgia del periodo classico e fu oggetto di intenso traffico. Il "metallo britannico", come talvolta essa fu definito, era riesportato dall'Egitto in Somalia e perfino in India. Le miniere della Spagna erano state sfruttate sin dagli albori dell'età del bronzo e furono mantenute in continua attività anche durante il periodo romano fino al loro esaurimento, verificatosi intorno al 250 d.C. Le miniere della Bretagna, sfruttate sin dal 500 a.C., furono probabilmente abbandonate ben presto, a causa della concorrenza spagnola. Sembra che la produzione di stagno della Cornovaglia si sia inserita nel mercato internazionale verso la stessa epoca e abbia continuato ad alimentarlo almeno fino ai giorni di Cesare. È provato che durante il primo periodo dell'Impero, forse a causa dell'esaurirsi dei giacimenti alluvionali, la produzione dello stagno subì un notevole declino, ma allorché nel terzo secolo d.C. ebbe inizio l'estrazione dai minerali veniferi, le miniere della Cornovaglia riacquistarono la loro antica preminenza e infransero il monopolio che il Portogallo e la Galizia spagnola avevano detenuto durante il primo e il secondo secolo d.C.

Il metodo d'estrazione dello stagno dal suo minerale (cassiterite, SnO_2) subì soltanto lievi mutamenti. Quando si poteva ancora disporre di stagno alluvionale, il metallo era ottenuto mediante una semplice fusione con carbone di legna. Allorché ebbe inizio la lavorazione dei minerali veniferi, la fusione fu fatta precedere da una calcinazione iniziale a una temperatura di 600-700 °C, allo scopo di eliminare i costituenti volatili quali lo zolfo e l'arsenico; tale operazione era nota anche agli antichi metallurghi. Durante la fusione, come fondente veniva generalmente usata la calce viva.

In Spagna i Romani costruirono grandi acquedotti per il lavaggio dello stagno alluvionale, di cui riuscirono a produrre molti milioni di tonnellate. Lo stagno importato dalla Cornovaglia veniva colato in lastre a forma di H di peso conveniente per consentire di sospenderne una a ciascun fianco di un animale da soma. Dall'esame dei resti degli antichi forni risulta che si riusciva ad ottenere un metallo di sorprendente purezza, ma soltanto a costo di notevoli perdite, sia nella scoria sia per effetto della volatilizzazione. Dall'analisi dello stagno e del piombo provenienti dalla Cornovaglia e dalla Spagna, risulta che normalmente il grado di purezza raggiunto superava il 99,9 per cento.

Lo stagno fu principalmente utilizzato nella fabbricazione del bronzo, ma non molto meno importante fu la sua lega col piombo. Le leghe stagno-piombo erano utilizzate come materiale di saldatura per molte applicazioni e, sin dai tempi dei Romani, anche come peltro per vasellame e altri oggetti casalinghi. Il peltro era generalmente costituito dal 70 per cento circa di stagno e dal 30 per cento di piombo. Nel Medioevo si usava soltanto dal 3 al 15 per cento di stagno, mentre in epoche posteriori fu generalmente usata la proporzione dell'80-85 per cento. Ci viene inoltre riferito che "Un metodo scoperto nelle province galliche consiste nel placcare gli oggetti di bronzo con piombo bianco [in altre parole stagno], in modo da renderli quasi indistinguibili dall'argento". Ciò era ottenuto immergendo gli oggetti in leghe fuse, come ad esempio una costituita da ottone, piombo e stagno. Nell'antico gergo lo stagno era denominato "piombo bianco" e il piombo "piombo nero"; La confusione è resa ancora più evidente dal fatto che spesso anche l'antimonio è chiamato "piombo", sebbene il termine più corretto sia *plumbum cinereum*. Gli antichi si riferivano all'antimonio anche col termine *stimmi*, che era usato sia per il metallo sia per il suo minerale, la stibnite (Sb_2S_3).

Nel periodo che precedette l'età classica, l'antimonio era talvolta ottenuto mediante la semplice fusione della stibnite con carbone di legna e nell'era classica tale procedimento non subì alcun mutamento sostanziale. Nell'Europa preistorica spesso furono usati bronzi all'antimonio (Ungheria e Gallia); e anche nell'età classica il metallo trovò una certa utilizzazione nei bronzi, in sostituzione dello stagno. Insieme con l'arsenico, esso ebbe inoltre parte importante negli esperimenti degli antichi alchimisti.

L'arsenico, sotto forma di solfuro (realgar, As_4S_4 e orpimento, As_2S_3), si trova in natura generalmente associato con solfuri di altri metalli, sicché è apparso come un costituente di leghe sin dai tempi più antichi. Soltanto raramente, però, tale fatto costituisce un vantaggio, poiché l'arsenico ha un limitatissimo valore metallurgico e trasmette alle leghe la sua caratteristica fragilità. I composti dell'arsenico furono comunque ben noti come pigmenti e come ingredienti per la preparazione di ricette mediche e di veleni.

RAME E SUE LEGHE

a) *Rame e bronzo.* Nell'età classica la metallurgia del rame aveva progredito sensibilmente oltre la semplice fusione di minerali superficiali, come gli ossidi e i carbonati, precedentemente praticata. Sacche locali di tali minerali erano ancora sfruttate, ma generalmente erano state esaurite sin dal sesto secolo a.C.

La maggior parte delle miniere di rame menzionate nella letteratura classica fornivano minerali di solfuro. Le migliori e più generose fonti furono, nell'antichità classica, Cipro, l'Asia Minore (con giacimenti in prossimità dei due famosi centri metallurgici di Samo e Pergamo), la Macedonia, la Toscana (nei pressi di Volterra), il Tirolo, la Stiria, la Carinzia, La Cornovaglia, il Devon, l'Anglesey e infine la Spagna e il Portogallo, i cui giacimenti eclissarono tutti gli altri dei tempi romani. Strabone esagera entusiasticamente sulle qualità delle miniere spagnole allorché, riferendosi ai giacimenti minerari di Rio Tinto, sul versante meridionale della Sierra Morena, dice: "Fino ad oggi in nessuna località del mondo è mai stato trovato oro, argento, rame o ferro allo stato naturale, in tale abbondanza e di così buona qualità. Colà l'estrazione è oltremodo proficua, poiché la quarta parte del minerale estratto dai lavoratori del rame è costituita da rame puro".

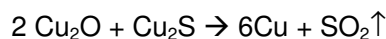
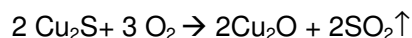
Nell'età classica, l'evoluzione della tecnica di fusione del rame non introdusse alcun principio nuovo. Localmente, per piccoli giacimenti minerari isolati, potevano ancora essere impiegate tecniche di fusione molto antiquate; ma la produzione maggiore, proveniente da complessi minerali di solfuro, richiedeva per la rimozione delle impurità, inclusi gli altri metalli, molta più perizia e attenzione. Di qui il fatto che nell'età classica, e invero per molti secoli successivi, i metodi di fusione primitivi furono adottati fianco a fianco con quelli più elaborati.

Mentre dai minerali, ossidi e carbonati, il rame può essere estratto mediante una semplice fusione con carbone di legna, i trattamenti dei minerali di solfuro sono molto più complessi. Essi comprendono tre fasi.

a) Il minerale è arrostito in modo tale da ottenere l'eliminazione dell'eccesso di zolfo e degli ossidi volatili, come quello di arsenico, nonché una parziale ossidazione dei solfuri di ferro; con l'arrostitimento si rende inoltre più agevole la frantumazione del minerale.

b) Dopo l'aggiunta di appropriati fondenti, si procede alla fusione. Nella parte anteriore della suola il materiale fuso si separa, formando uno strato superiore, costituito da scoria, e uno inferiore, costituito da metallina. Lo scopo dell'operazione è, in effetti, quello di ottenere una metallina quanto più ricca possibile di solfuro di rame puro. Un controllo inadeguato, in questa fase della lavorazione, determina una perdita di rame nella scoria e l'inclusione di una certa quantità di impurità nella metallina.

c) L'ultima fase dell'operazione consiste in una parziale ossidazione della metallina. Questa viene fusa e, con del carbone affiorante alla superficie, il liquido in agitazione viene investito dal getto d'aria. (Oggi giorno l'aria viene immessa nel metallo fuso in un convertitore). I residui di ferro, di piombo e di altri metalli con potenziale elettrochimico negativo, e con loro anche una parte del solfuro di rame, vengono in tal modo ossidati. Dalla reazione del solfuro di rame residuo con i vari prodotti dell'ossidazione si ottiene rame e anidride solforosa. Le principali reazioni possono essere così rappresentate



Questa terza fase del processo deve essere condotta con cura, in modo da eliminare tutte le impurità e nello stesso tempo da lasciare il metallo più o meno privo di ossido di rame, che gli conferirebbe una certa fragilità. Sembra che con una certa perizia si riuscisse a ottenere rame purissimo senza alcun ulteriore affinamento; infatti, sebbene prima dei tempi greci non fossero conosciuti altri processi, gli esemplari di rame antico sono spesso purissimi⁷. Tuttavia non è escluso che la particolare operazione d'affinamento nota come trattamento al legno verde, che occupa un

⁷ Al tempo dei Romani, fino al 99 per cento. I moderni processi di ossidazione consentono un affinamento di circa il 99,3 per cento e i metodi elettrolitici di oltre il 99,9 per cento.

posto preminente nei testi di chimica, fosse nota ad alcuni metallurghi romani. Tale operazione consiste nel sospingere dei paletti di legno al di sotto della superficie del rame fuso, in modo che i composti volatili di carbonio che si sprigionano dalla massa fusa per effetto dell'elevata temperatura provochino una riduzione dell'ossido presente nel metallo. Comunque, un accenno a tale operazione appare, in epoca molto più recente, in uno scritto di Teofilo sulla purificazione del rame (circa 950 d.C.):

Prendete un recipiente di ferro della misura che preferite e rivistitelo internamente ed esternamente con argilla ben polverizzata e impastata; quindi lasciatelo completamente asciugare. Collocatelo poi sui carboni di una forgia, in modo che il getto d'aria prodotto dal mantice possa investirlo in parte all'interno e in parte all'esterno, ma non al di sotto. Disponete intorno ad esso del carbone in piccoli pezzi, versatevi dentro il rame, distribuendolo in modo uniforme, e ricopritelo con uno strato di carbone. Quando, dopo aver soffiato a lungo, il rame si fonde, scopritelo, cospargere subito ceneri di carbone sulla superficie del liquido, e agitatelo con un bastoncino di legno stagionato come se voleste mescolarlo; vedrete il "piombo" bruciato aderire direttamente a queste ceneri come una colla. Una volta che questo è stato asportato, sovrapponetevi nuovamente del carbone e, dopo una lunga soffiatura come quella iniziale, scoprite il rame e procedete come prima. Ripetete l'operazione fino a che, cocendolo, non abbiate estratto completamente il "piombo". Versare il rame fuso sulla forma all'uopo preparata e provatene la purezza. Prima che si raffreddi, tenetelo con le tenaglie e, incandescente com'è, battetelo fortemente sull'incudine con un grosso maglio. Se esso si rompe o si spacca, dovete fonderlo nuovamente come prima; se invece rimane integro, raffreddatelo in acqua e cocetene dell'altro [rame] allo stesso modo.

L'accenno al piombo non deve essere interpretato alla lettera, poiché in quest'epoca non esisteva una netta distinzione fra i vari metalli e i rispettivi ossidi. Teofilo qui ci descrive una prova pratica per determinare il punto in cui il processo è da ritenersi completo. Degna di rilievo è l'importante osservazione finale sulla fragilità.

Naturalmente, nella fusione dei minerali di solfuro, le possibilità di riutilizzare i prodotti intermedi in una fase precedente del processo non sempre furono completamente comprese nell'antichità: d'altronde tale economia non sempre era necessaria, dato che molto dipende dall'impurità del minerale. Raramente i testi classici forniscono notizie esaurienti su questo genere di operazioni, e ancor oggi le analisi di antichi metalli e scorie in nostro possesso sono insufficienti a formare un quadro esatto delle tecniche di fusione adottate nei centri di fusione del rame. L'arrostimento, la fusione iniziale, una seconda e probabilmente una terza rifusione, nonché l'affinamento finale, non sempre erano operazioni isolate; alcune di esse venivano spesso eseguite simultaneamente e persino nello stesso forno.

Al tempo dei Romani, in quasi tutti i centri fusori i minerali di solfuro venivano ridotti su larga scala in rame "nero" (puro al 95-96%); questo metallo semigreggio veniva poi affinato nei centri di lavorazione. Tuttavia, in alcune regioni, come la Britannia romana, i lingotti di rame puro sono abbastanza frequenti.

Il tipo di forno variava da un centro all'altro. Le primitive blumiere e forge del tipo di quelle usate dai fabbri del periodo pre-classico venivano ancora costruite: erano però preferiti i forni a tino. Generalmente questi erano a due cavità sovrapposte, collegate fra loro da un collo piuttosto stretto; la parte inferiore, più piccola, veniva riempita con carbone di legna e quella superiore col minerale. Essi consentono, come il loro lungo uso ha dimostrato, una fusione continua. Forni di questo tipo furono anche usati a Mitterberg nel Tirolo (1600-800 a.C.) e nella maggior parte delle regioni greche, Cipro inclusa. Sembra che i fonditori romani di Populonia in Italia, e di Rio Tinto in Spagna, preferissero i forni per blumi ed a suola del tipo catalano (fig. 38 a). Molti autori classici concordano nell'affermare che il carbonio usato per la fusione del rame era preparato con alberi e piante particolari.

La scelta dei fondenti usati dipendeva dalle impurità del minerale, ma indubbiamente si utilizzava qualsiasi materiale disponibile atto a combinarsi facilmente con la ganga, o parte terrosa del minerale, in modo da formare un miscuglio fusibile. A Cipro i Romani usavano un fondente con notevole contenuto di manganese, a Rio Tinto vari tipi di quarzo, a Taso la calce. Frequentemente anche la metallina ottenuta dalle ultime fusioni era rimescolata al minerale trattato nella prima fusione come fondente ausiliario. Sembra che i fonditori preistorici del Mitterberg già conoscessero questo procedimento; tuttavia queste fusioni non furono quasi mai eseguite con risultati

soddisfacenti e ciò è provato dal fatto che le scorie contengono sempre molto rame. In alcuni casi il contenuto di piombo di certe scorie sta ad indicare l'uso della liquazione; è anche possibile, però, che il piombo o la galena fossero aggiunti al minerale da fondere allo scopo di assorbire le impurità, come appare da una descrizione del Biringuccio, del sedicesimo secolo.

L'affinamento del rame era eseguito in un forno a cupola molto simile ad un normale forno per ceramiche. Questo tipo di forno è venuto alla luce a Salisburgo e in Lorena, e si è rivelato molto più adatto dei forni a tino per la fusione del rame a temperature elevate. Il rame affinato era distinto in vari tipi, come l'*aes coronarium*, che era in lamiera, l'*aes regulare*, che era quello più malleabile e l'*aes caldarium*, che era quello nero, più impuro.

La produzione del rame di Cipro sofferiva parzialmente al fabbisogno della Grecia continentale sin dai tempi micenei, e in altre parole fin da quando i Greci avevano stabilito dei centri commerciali sulle isole. Tuttavia i sovrani locali, e in seguito i Totomei, che conquistarono Cipro, custodirono gelosamente il loro monopolio. Gli imperatori romani, continuando questa politica, concessero lo sfruttamento delle miniere cipriote al re Erode; e sebbene come produttrice di rame fosse ora superata dalla Spagna, Cipro continuò ininterrottamente a commerciare tale metallo fino al quarto secolo d. C., e perfino durante la dominazione bizantina. Dopo un periodo di declino la produzione fu ripresa dai governanti franchi e veneziani (1192-1573) e più tardi dai Turchi.

La produzione locale greca era cessata subito dopo il periodo miceneo. Al tempo di Strabone, agli inizi dell'era cristiana, anche le miniere di rame dell'Eubea risultavano esaurite, e nel periodo ellenistico una certa produzione si ebbe soltanto nella catena dei monti Otrisi; di qui l'importanza che nella stessa epoca i Greci attribuirono al rame cipriota. Il rame importato era trasformato in oggetti e in bronzi in centri di lavorazione come Corinto, Delo, Chio, Samo, Cizico, Rodi e Pergamo (fig. z8). I Romani disposero che la lavorazione dell'oro e dell'argento fosse riservata esclusivamente allo Stato, mentre quella del ferro e del rame rimaneva libera. Le tasse erano soltanto la metà di quelle imposte in precedenza dai sovrani macedoni.

In Italia le miniere di rame della Toscana erano sfruttate dagli Etruschi, ma dopo la conquista dell'Etruria i Romani, servendosi di sistemi di drenaggio più progrediti, riuscirono ad aumentare la profondità dei pozzi esistenti da una media di circa 125 metri a circa 200 metri. Sotto la Repubblica si sfruttavano ancora miniere nella regione fra Populonia e Volterra e il bronzo etrusco costituiva ancora un prodotto locale: nella zona esisteva anche del minerale di stagno. Allorché Catone organizzò le miniere della Spagna, di nuova acquisizione e assai ricche di metalli, la produzione mineraria etrusca declinò fino a che una legge del secondo secolo a.C. non la fece cessare in tutta l'Italia. Probabilmente il motivo immediato di tale decreto è da individuarsi nel desiderio del Senato di preservare le risorse italiane.

La Spagna produceva rame fin dai tempi preistorici. Nel distretto di Huelva e nel Portogallo orientale vi sono masse di scoria valutate 30.000.000 di tonnellate, di cui almeno la decima parte risale al periodo preromano. La produzione fu iniziata anche nella Spagna settentrionale. L'area di sfruttamento romana, mai estesa a sud del Guadalquivir, coincide pressappoco con l'area dell'odierna zona mineraria. Le ricche miniere della Sierra Morena furono annesse dall'imperatore Tiberio (14-37 d.C.) allorché egli fece giustiziare Mario, proprietario dell'*Aes Marianum*.



Fig.28 Dipinti in rosso su una coppa greca proveniente da Vulci, presero Roma. Vi è raffigurata una fonderia e la fusione di una statua in bronzo. 5° secolo a.C.

La Gallia romana, oltre a sfruttare i piccoli giacimenti locali, dovette in ampia misura far ricorso all'importazione. Cesare afferma che la Britannia doveva importare bronzo e rame; eppure le miniere del Cheshire, del Galles nord-occidentale, dell'Anglesey e dello Shropshire erano già in attività molto prima dell'avvento dei Romani, i quali ne continuarono lo sfruttamento. Su molti pani di rame di forma circolare e appiattita del peso di 14-23 chilogrammi è stata trovata la sigla dei concessionari: questo rame era per lo più affinato ad oltre il 99 per cento. In Germania il minerale di rame era lavorato principalmente oltre i confini del dominio romano. La produzione delle grandi miniere di rame delle Alpi orientali era andata declinando fin dall'età del ferro e dopo il 400 a.C. era virtualmente cessata; tuttavia da queste regioni, come anche dall'Ungheria, continuava a giungere a Roma una certa quantità di rame.

Il rame e il bronzo romano divennero elementi importanti nel commercio mondiale e le monete di rame erano esportate nella Slesia, nella Prussia orientate e nella zona del Baltico; fra le leghe di rame usate in queste regioni e quelle usate per la coniazione delle monete romane, esiste una precisa relazione. Anche le esportazioni di rame verso l'India attraverso il Mar Rosso ebbero grande impulso la produzione locale dell'India era stata insufficiente anche nel periodo ellenistico — e in alcune stazioni commerciali della costa occidentale dell'India sono stati rinvenuti veri e propri tesori di monete romane. Ci viene riferito, inoltre, che il rame era esportato anche nell'Oman e nel Golfo Persico; si trattava indubbiamente di metallo europeo eccedente, che da Alessandria veniva inviato a Malabar e a Barygaza (Broach) e di qui smistato dai commercianti indiani.

L'estrazione mineraria romana e la fusione su larga scala avevano reso necessarie nuove forme organizzative. Contratti d'affitto erano concessi dallo Stato ad appaltatori privati, spesso capitalisti romani che facevano investimenti su larga scala. Vi fu anche un'ampia divisione del lavoro; ma, contrariamente all'opinione comune, ai centri minerari e di fusione non era adibita soltanto manodopera costituita da schiavi. Sebbene il lavoro manuale fosse eseguito in gran parte da condannati e da schiavi, vi era anche un largo impiego di specialisti. Le leggi minerarie della ricca miniera di Ajustrel in Spagna, oggi in nostro possesso, contengono i regolamenti sulle tasse e distinguono il lavoro nelle miniere in: estrazione, lavaggio, frantumazione, fusione, preparazione, rottura, separazione e affinamento. Gli scarichi delle miniere e i cumuli di detriti rocciosi erano soggetti a tassa. Nelle leggi sono menzionati molti esperti che godettero di notevoli privilegi, e che, come gli specialisti del rame e del bronzo, formavano potenti corporazioni.

Analogamente, in Italia, nella fabbricazione di oggetti di rame e di bronzo, si pervenne a un notevole grado di specializzazione e di divisione del lavoro. A Capua, verso la fine dell'età repubblicana, esisteva un vero e proprio sistema produttivo di fabbrica, e grandi quantitativi di questi oggetti di rame e di bronzo, di fattura perfettamente uniforme, sono stati rinvenuti dappertutto in Italia e perfino in Germania, in Svezia e in Finlandia. A Capua il metallo era legato con stagno o zinco e quindi colato, lucidato e intagliato o fucinato. La produzione di semplici utensili da cucina e attrezzi agricoli richiedeva l'opera di diverse botteghe e i calderai erano allo stesso tempo artigiani e mercanti. Gli oggetti fuori uso erano rifusi e nuovamente colati e, per sopperire ad esigenze immediate, subivano la medesima sorte anche gli oggetti immagazzinati. I calderai erano ben organizzati; essi costituirono una potente corporazione nella stessa Roma, e a Milano una di queste corporazioni era formata da 1200 membri.

b) Ottone. Lega di rame e zinco, fu la più importante delle nuove leghe dell'età classica. Con l'aggiunta di zinco al rame si ottengono leghe progressivamente più resistenti, più dure e meno malleabili del rame puro, fino a che

Il contenuto di zinco non raggiunga circa il 40 per cento. In questo campo sono comprese le varietà più utili d'ottone, la cui caratteristica generale è costituita dalla vasta gamma di proprietà, che si possono ottenere non soltanto con la variazione della composizione ma anche con la

lavorazione a freddo. La loro resistenza alla trazione è paragonabile a quella dei bronzi allo stagno (da 24 a 70 kg/mm²) ed è inferiore a quella degli acciai (da 47 a 157 kg/mm²). Un ottone contenente il 20 per cento di zinco è di colore simile a quello dell'oro, mentre le leghe ricche di zinco sono di un bianco opaco. I minerali di zinco usati erano il carbonato e il silicato, entrambi noti come calamina.

Sebbene sembri attendibile che l'ottone sia stato scoperto nel primo millennio a.C. (vedi in seguito), risulta tuttavia che né i metallurghi dell'età classica, né quelli del Medioevo furono in grado di preparare lo zinco metallico, che, infatti, fu ottenuto soltanto nel sedicesimo secolo d. C. Tutti gli ottoni erano prodotti mediante un processo di cementazione. Per ottenere lo zinco dalla calamina è necessario raggiungere un'elevata temperatura (circa 1300 °C) con carbone di legna; e poiché tale temperatura è superiore al punto d'ebollizione del metallo, il vapore di quest'ultimo si separa e normalmente si riossida condensandosi poi sotto forma di ossido di zinco. Se però in un miscuglio di minerale di zinco polverizzato e carbone di legna si riscalda del rame, una parte dello zinco formatosi in prossimità del rame si diffonde su quest'ultimo formando uno strato di ottone. Questo era l'antico processo di cementazione, il cui principio è simile a quello su cui si basa la fabbricazione dell'acciaio mediante diffusione del carbonio.

Sembra che gli ideatori di tale procedimento siano stati i Mossineci, popolo abitante nel Ponto a sud di Trebisonda, nel cui territorio vivevano molte

o caste di fabbri come i Calibei. Ci viene riferito che "il bronzo dei Mossineci eccelle per la sua lucentezza e la sua straordinaria bianchezza. Essi non aggiungono stagno, bensì uno speciale tipo di terra che viene fusa insieme col rame. Si dice che l'inventore non rivelò mai il suo segreto, per cui gli antichi bronzi di questa regione sono straordinari per le loro eccellenti qualità, che invece quelli più recenti non posseggono". Sembra che questi Mossineci, forse i Meshech dell'Antico Testamento, abbiano scoperto la fabbricazione dell'ottone nel primo millennio a.C.

Gli autori classici identificarono la varietà naturale di calamina, costituita da carbonato di zinco, con l'ossido di zinco bianco che frequentemente si forma, come prodotto secondario, durante la fusione del rame, condensandosi sul cielo del forno. Entrambi i prodotti erano chiamati *cadmeja* o *cadmea*. Questi autori consideravano il minerale come un prodotto impuro e preferivano quello più condensato, che talvolta chiamavano *pompholyx*. Il *cadmeia* era identico al più recente *tutiya* o *tuthy* degli alchimisti e metallurghi musulmani e alla nostra tuzia.

Il più antico riferimento all'ottone è costituito probabilmente da un'iscrizione dell'ottavo secolo a.C. che si trova nel palazzo del re assiro Sargon II (722-705 a.C.) a Khorsabad. In essa si menziona il rinvenimento di porte di legno rivestite con una lamiera di "bronzo bianco" proveniente da Musasir, regione montuosa ad ovest del Tigri. È certo che i Persiani usarono l'ottone dal quinto secolo a.C. in poi, e Dario (521-486 a.C.) possedeva "un calice che sembrava d'oro ma che emanava uno sgradevole odore." La Persia era abbastanza ricca di minerali di zinco, ma qui la produzione di ottone su larga scala non iniziò prima del sesto secolo d.C., non prima cioè che questa tecnica fosse introdotta in India per poi passare, circa due secoli più tardi, in Cina.

Comunque la fabbricazione dell'ottone si diffuse solo lentamente verso l'Occidente. Né Omero (8° sec. a.C.?) né Erodoto (5° sec. a.C.) lo conoscevano. Ove si consideri che il vero ottone non contiene soltanto una piccola percentuale di zinco che viene dal minerale fuso, bensì una media del 30-38 per cento di tale metallo, la sua fabbricazione in Grecia prima del periodo augusteo (I sec. d.C.), dovette essere del tutto eccezionale.

La medesima considerazione va fatta per l'Italia, ove le monete di Roma repubblicana contengono talvolta fino al quattro per cento di zinco. Vere monete di ottone furono comunque coniate dall'imperatore Augusto e il loro contenuto di zinco, che inizialmente raggiungeva senz'altro il 17 per cento circa, andò gradualmente aumentando. Nondimeno l'ottone rimaneva relativamente costoso, e perfino diversi secoli più tardi, durante l'impero di Diocleziano (284-305), il suo valore era da sei a otto volte superiore a quello del rame. I centri più importanti della sua produzione erano allora l'Etruria e il distretto di Stolberg, nei pressi di Aquisgrana, ove fra il 74 e il 77 d.C. erano stati scoperti alcuni giacimenti. Questo centro prosperò notevolmente fra il 150 e il 300 d.C., ma nel quarto secolo d. C. subì un declino. La produzione fu ripresa nel quinto secolo, e nell'undicesimo secolo il centro divenne preminente, come anche lo divennero i giacimenti minerali di zinco allora scoperti da poco nella valle detta Mosa.

I prodotti romani d'ottone erano esportati in Egitto e da qui in altre regioni dell'Africa, dove la lega era molto apprezzata. Cosma Indicopleuste (6° sec. d.C.) ci dice che ai suoi tempi gli indigeni dell'Abissinia consideravano ancora l'ottone più prezioso dell'argento. Ai tempi romani, nella re-

gione del Mar Rosso e nel regno abissino di Axum, esso costituiva uno dei più importanti mezzi di scambio. Alcuni di questi ottoni erano fabbricati a Cipro, coi *cadmeia* colà recuperati durante la fusione dei minerali di rame.

FERRO ED ACCIAIO

Dall'800 a.C. in poi l'uso del ferro per la costruzione di armi e di attrezzi si andò progressivamente diffondendo nell'Europa centrale. Il più antico centro metallurgico europeo del ferro fu l'Austria. L'antico Norico comprendeva la maggior parte dell'Austria a est del Tirolo, e l'industria norica del ferro forniva gli armamenti per molti conflitti tribali e migrazioni nell'Europa centrale. Tuttavia, intorno al 400 a.C., il baricentro si era spostato verso le regioni celtiche e verso la Spagna. Alle tecniche di fabbricazione del ferro la civiltà classica aggiunse ben poco, ma lo sviluppo della produzione su larga scala e la specializzazione della manodopera costituirono fattori determinanti nell'evoluzione dell'industria.

Ai tempi romani prevalevano ancora i semplici forni a suola, riscaldati con carbone di legna. Il minerale, dopo essere stato arrostito, era mescolato con carbone di legna e talvolta con un fondente; il riscaldamento ne provocava una riduzione, e sul fondo si raccoglieva un blumo di ferro duro e spugnoso ricoperto con feccia o scoria liquida. Tale blumo era poi nuovamente riscaldato e battuto col maglio sino ad essere ridotto a una massa compatta, operazione questa che, per ottenere la espulsione di tutta la scoria, doveva essere ripetuta diverse volte. Alcune fucine per la produzione di blumi avevano un tiraggio naturale, come i forni fusori romani di Populonia in Etruria e di Witderspool presso Warrington per cui, salvo il fatto che nel processo veniva talvolta usato del carbone fossile, esse differivano di poco da quelle dei fabbri preistorici europei. Normalmente queste fucine erano costituite da un forno per l'arrostitimento dei minerali, da un forno fusorio e da una forgia da fabbro.

Uno dei più antichi forni speciali per il ferro fu quello catalano, di cui si servivano gli antichi fabbri della Catalogna (Spagna) e della Francia, e che fu in uso in queste regioni fino al diciassettesimo secolo e anche oltre (fig. 38B, p. 73). Nel forno l'aria veniva immessa mediante due mantici azionati alternativamente in modo da produrre un continuo getto d'aria. I forni non avevano ancora una struttura permanente, e molti di essi dovevano essere ricostruiti dopo ciascuna fusione; erano tutti alimentati con legna. Questi processi consentivano di ottenere un ferro saldato malleabile, direttamente dal minerale.

Erano anche usati forni a tino del tipo di quelli descritti per la fusione del rame (p. 51); essi furono i precursori del futuro *Stückofen* (p. 74) e dell'altoforno. Essi producevano un blumo con maggior contenuto di carbonio, che veniva poi trasformato in ferro saldato malleabile o in acciaio con una successiva operazione. Le temperature che si ottenevano in questi forni a tino erano piuttosto elevate, ma non abbastanza da consentire che il ferro permanesse a tali temperature fino a carburarsi e a trasformarsi in ghisa. Se ciò avveniva era per caso, e comunque l'antico fabbro avrebbe scartato il prodotto ritenendolo scadente e fragile. Infatti i mucchi di ghisa rinvenuti nel Norico non sono altro che scarti.

Alcuni forni preistorici usati a Tarxdorf, nella Slesia, erano in grado di produrre un blumo semifuso del peso di circa 23 chilogrammi in otto o dieci ore e con l'ausilio di circa 90 chilogrammi di carbone di legna; per la fucinatura e il riscaldamento successivo erano necessari altri 12 chilogrammi di carbone.

I forni romani del Norico raramente producevano blumi di peso superiore a 45 chilogrammi. Il minerale trovato in questa regione era un carbonato di ferro contenente manganese che facilitava la fabbricazione dell'acciaio. Quando si doveva ottenere il "ferro duro" o acciaio, si usava carbone di legna in pezzi più grossi e in maggior quantità, si prolungava il tempo di fusione e si riduceva il tiraggio fino a ottenere il grado di carburazione desiderato. Il ferro dolce (ferro saldato) era ancora prodotto come in passato, e per ottenere pezzi di ferro più grossi si saldavano insieme quelli più piccoli. I Romani, con i loro forni a tino, suole e forge adattate per le varie operazioni, come la fusione, la carburazione e la saldatura, seppero abilmente perfezionare processi tramandati dai fabbri dell'antico Vicino Oriente e della Gallia.

Gli autori classici danno rilievo al fatto che la diretta produzione dell'acciaio dal minerale dipende in larga misura dal tipo di minerale utilizzato. Per i minerali più trattabili i fonditori non usavano alcun fondente. A Populonia il minerale siliceo proveniente dall'isola d'Elba era mescolato con calce, analogamente a quanto avveniva per il minerale più argilloso di monte Valerio. Nell'Erzberg sono

state rinvenute scorie con diverso grado di fusibilità ed è risultato che le più antiche sono anche le più ricche.

Nel Norico la possibilità di produrre acciaio con un processo diretto fu dovuta alla presenza di ferro spatico (carbonato di ferro) e all'uso di ben congegnati forni a tino della profondità di 1-2 metri. I Romani importavano dall'Oriente il pregiatissimo "ferro serico", credendo che esso provenisse dalla Cina. In realtà si trattava di acciaio al crogiuolo prodotto nel distretto di Hyderabad, in India, e messo in commercio in pani rotondi del diametro di 13 centimetri e dello spessore di 13 millimetri, aventi un peso di circa 1 chilogrammo. Nel periodo islamico l'arte di produrre l'acciaio al crogiuolo pervenne a Damasco e a Toledo, e l'acciaio "damasco"⁸ era fabbricato in altre regioni d'Europa con tali pani. Essi erano saldati insieme in due o più direzioni con colpi di maglio e le lame così formate dopo una lunga fucinatura venivano raffreddare e rinvenute fino a ottenere la durezza desiderata. La superficie di queste lame ha un caratteristico aspetto mazzato o striato.

Sembra che i produttori indiani inviassero il loro acciaio agli Axumiti dell'Abissinia, i quali ne tenevano la provenienza segreta e lasciavano che i Romani l'attribuissero alla Cina. Anche i re persiani lo avevano ricevuto dall'India e c'è riferito che Alessandro Magno ne ricevette tre tonnellate da un re indiano: l'acciaio importato era trasformato in coltelli e armi di lusso in centri come Damasco e Irenopoli. L'acciaio persiano, prodotto con processi analoghi, durante il tardo Impero Romano fu considerato secondo soltanto al ferro serico. Oltre a questa costosa importazione, rimaneva sempre l'antico processo di cementazione, che consentiva di ottenere, mediante carburazione in una forgia, uno strato esterno di acciaio sul ferro saldato. I fabbri greci e romani usavano questa tecnica con molta abilità ed erano in grado di controllare le proprietà finali dell'acciaio mediante la tempra, il rinvenimento e la ricottura. Dall'esame di alcune spade romane del quarto secolo d.C. risulta che, per ottenere un buon taglio, erano usate le seguenti tecniche:

- a) saldatura di una striscia di acciaio damaschino su entrambi i lati di una lama d'acciaio duro,
- b) saldatura di bordi taglienti di acciaio duro su ferro,
- c) cementazione superficiale mediante una lunga fucinatura.

⁸ Talvolta chiamato anche "damaschino", sebbene questo termine sia più comunemente usato per indicare l'acciaio ageminato con filamenti d'oro d'argento o di rame.



Fig. 29 Dipinto in nero su un vaso attico proveniente da Orvieto, raffigurante una fucina greca e una selezione d'attrezzi greci. Di particolare interesse sono le tenaglie articolate. 6° secolo a.C.

L'industria ferriera di Cipro era insignificante, e a Creta, contrariamente a molte leggende, non vi erano centri di fusione. Nel Mediterraneo orientale il principale centro di produzione del ferro era l'Asia Minore, con i suoi ricchi giacimenti del Ponto, dei monti del Tauro, della Frigia e della Caria. Nella Grecia continentale, durante il periodo miceneo, il ferro era costoso quanto l'oro; ma dal decimo secolo a.C. esso fu prodotto su scala sempre più vasta fino a diventare gradualmente un metallo d'uso comune. Nell'opera di Omero, il *chalkeus* è un fabbro ferraio, sebbene il poeta descriva l'età del bronzo. I suoi eroi brandiscono armi di bronzo di splendida fattura e tuttavia Achille offre in dono dei blumi di ferro greggio. Molto ferro proveniva da piccoli giacimenti minerali generalmente esauriti sin dall'età classica della Grecia, come per esempio quelli della Samotracia e dell'Eubea. Si ritiene che la saldatura del ferro (*kollesis*) sia stata inventata da Glauco di Chio, nel settimo secolo a.C.

Nella Laconia, in seguito famosa per il suo acciaio, a Lesbo, a Sifno e in alcune altre isole minori, la produzione ebbe inizio soltanto nel quinto Secolo a.C. Il ferro proveniente da questi centri di fusione era messo in commercio in forma di barre, come gli "spiedi" spartani che probabilmente erano usati per cucinare, ma che in commercio rappresentavano sia monete sia metallo. Nelle città greche il ferro era fucinato da specialisti che lo trasformavano in oggetti di uso locale (*figg. 29 e 30*).

Nell'Atene di Pericle (morto nel 429 a.C.) i fabbri erano per lo più degli stranieri. Fabbriche d'armature erano dirette da Pasio e Cefalo. Sembra che il padre di Sofocle fosse un fabbro e che Demostene (morto nel 322 a.C.) avesse ereditato una fabbrica di spade. Ci viene riferito che un banchiere siciliano del quarto secolo a.C. organizzò un'incetta d'acciaio calibeo, "...resosi conto che il ferro costituiva un genere indispensabile, una volta egli riuscì ad accaparrare il prodotto di tutti i fonditori di ferro, realizzando così un profitto del 200% allorché ne sopravvenne la scarsità." In Macedonia le miniere furono sfruttate anche nei tempi romani.

Intorno al 900 a.C. gli Etruschi dell'Italia settentrionale intrapresero lo sfruttamento delle miniere di ferro dell'isola d'Elba e della Toscana, miniere in cui si può scorgere un potente fattore dell'espansione dell'antica Roma. In Italia, all'epoca di Varrone (116-27a.C.), molti villaggi erano forniti da fabbri ambulanti. Nella stessa Roma la presenza di fabbri ferrai può già essere rilevata dai primi documenti; ma il metallo era ritenuto un intruso e a certi ordini religiosi ne era proibito l'uso durante le cerimonie. Simili proibizioni dell'uso del ferro si trovano anche nell'Antico Testamento (*Deuteronomio 27.5; Giosuè 8.31*).



Fig. 30 Dipinto in nero su un vaso attico raffigurante la fucina di Efesto. 6° secolo a.C.

Le miniere di Populonia fornirono le armi a Scipione per l'invasione dell'Africa nel 204 a.C. e anzi, durante il periodo bellico che va dal 200 al 150 a.C., buona parte del ferro proveniva ancora dalle miniere italiane ed era lavorato nella regione fra Roma e Capua. Un decreto senatoriale del secondo secolo a.C., che proibiva lo sfruttamento minerario in Italia, non ebbe alcun effetto sull'isola d'Elba, una delle più antiche colonie greche in Italia. I blumi prodotti fino al tardo periodo imperiale erano di qui trasportati, attraverso Pozzuoli e altri porti, nel continente, ove venivano poi trasformati in armi ed attrezzi. L'esaurimento delle foreste dell'Elba potrebbe spiegare il fatto che sull'isola si eseguisse soltanto la prima fase della lavorazione. Già prima del 100 a.C. lo Stato romano disponeva di fabbriche d'armi proprie. Le esigenze militari determinarono la concentrazione dell'industria a Pozzuoli, a Siracusa, a Reggio, a Populonia, a Volterra, e in un paio di altre località, e ciò spianò il cammino al futuro controllo statale.

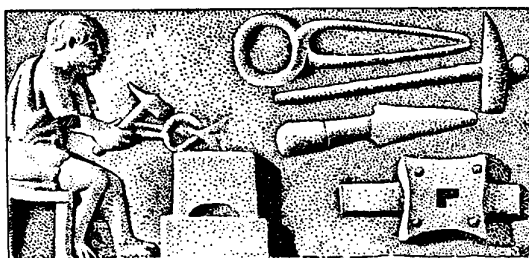
Gradualmente l'industria si spostò verso le province, in vicinanza delle miniere. In generale lo Stato romano era autosufficiente per quanto riguardava i metalli, e soltanto alcuni prodotti speciali, come l'acciaio serico, venivano importati. Indipendentemente dalle fucine e dalle fabbriche statali, quasi tutte le province avevano centri di fusione propri. I giacimenti dell'Inghilterra e della Gallia sfruttati per sopperire ai fabbisogni locali; soltanto nel caso di abbondanti giacimenti minerari di formazione massiccia, come quelli della Carinzia e dell'Aude, nella Gallia, il governo romano confiscava le miniere e ne affidava lo sfruttamento ad affittuari imperiali.

Nei testi sono frequenti i riferimenti alla specializzazione dei prodotti. Perfino i Greci dell'epoca di Alessandro già distinguevano diversi tipi di acciaio. L'acciaio sinopico era usato per attrezzi da falegnami, l'acciaio caillbeo e quello laconiano per lime e trapani, l'acciaio lidiano per spade, e così via. Al tempo dei Romani l'acciaio spagnolo e quello norico detenevano il primo posto nella fabbricazione delle armi; ma anch'essi cedettero al confronto con l'acciaio serico e quello partiano (persiano), di provenienza orientale, allorché si poté disporre di questi ultimi.

Nella società del periodo classico il fabbro occupò sempre un posto preminente (figg. 31-32). Nell'antico Impero Romano vi furono potenti corporazioni di *fabri* a Milano e a Brescia; entrambe usavano ferro norico e acciaio. Al tempo di Plinio, Como era famosa per la sua industria del ferro. A Populonia vi erano ancora alcuni fabbri ferrai, ma in buona parte il commercio del ferro si era spostato a Pozzuoli, dove, tuttavia, sembra che non sia esistita alcuna corporazione di *fabri*; probabilmente nelle fucine di questa località fu impiegata mano d'opera costituita da schiavi. Al contrario, nella valle del Po le corporazioni di fabbri erano tanto potenti da costituire un importante fattore della politica imperiale.



Fig. 31-Fucina romana del 1° secolo d.C. Da una pietra sepolcrale nelle catacombe di Domitilla.



In Spagna il minerale di ferro della regione basca non fu seriamente sfruttato prima del

quinto secolo d.C.: il minerale lavorato dai Romani era quello della parte occidentale della Spagna e del Portogallo; gli articoli esportati erano generalmente armi e coltelli. La loro fama fu dovuta all'uso di particolari metodi di fabbricazione, come l'interramento e la corrosione del prodotto, probabilmente allo scopo di migliorarlo, e l'uso di certe acque che si riteneva possedessero speciali proprietà tempranti. L'importanza di questa industria è confermata in un gran numero di documenti relativi alle società, ai funzionari e ai privati interessati nell'estrazione, nella fusione e nella distribuzione del ferro. Alcuni letti alluvionali della Catalogna di Alicante e di Toledo furono sfruttati soltanto nel tardo periodo imperiale e nel Medioevo.

Fig.32 Fabbro romano dedito alla produzione di serrature, con i suoi attrezzi e un esemplare dei suoi prodotti. 2° secolo d.C.

Nell'Europa centrale i Romani controllavano i giacimenti di ferro del Norico e della valle di Sana, nella Bosnia. Nel Norico, le scorie di questo periodo ammontano a circa centomila tonnellate, corrispondenti a qualcosa come 30.000 tonnellate di metallo. I Romani finirono col preferire i minerali bianchi e gialli e quello spatico rosso (carbonaro ferroso greggio) dei più antichi fabbri. Alcuni minerali da loro usati contenevano titanio, che è un eccellente componente dell'acciaio. Lo sfruttamento romano dell'Erzberg stiriano si protrasse almeno fino al 316 d.C. Al nord il ferro veniva fuso nel Giura centrale, nella Gallia nord-orientale, nel Lussemburgo, nell'Alsazia settentrionale e nell'Eifel. Allo stesso tempo le tribù germaniche sfruttavano molta limonite bruna (un ossido idrato di ferro) e alcuni giacimenti come quelli della zona di Siegen dovevano, molti secoli più tardi, diventare famosi. Nella Britannia romana il ferro era prodotto nel Weald e nella foresta di Dean. Altre fonderie e fucine sono venute alla luce, ma sembra che esse fossero destinate a sopperire ai fabbisogni locali piuttosto che ad alimentare l'esportazione (fig. 33). Alcune città francesi devono probabilmente i loro natali alle fucine celtiche per blumi.

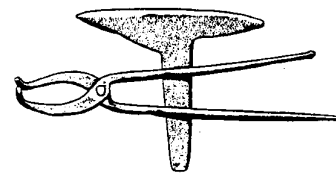


Fig.33 Incudine e tenaglie del 4° secolo d.C. rinvenuto a Silchester. Scala 1:10.

LA METALLURGIA MEDIOEVALE IN GENERALE

La caduta dell'Impero Romano fu preannunciata da un graduale declino del potere centrale e dal conseguente declino dell'attività metallurgica e mineraria. La diminuzione della produzione metallurgica ebbe inizio nel terzo secolo d.C., e sembra che fino al nono o al decimo secolo i fonditori e fabbri locali usassero i minerali di superficie o vecchi pozzi per soddisfare una domanda che diminuiva con l'aumentare del disordine. Così in Francia la fusione continuò ad essere praticata nella Borgogna settentrionale, nella Champagne meridionale, nel Berry, in Normandia, nella Bretagna, nella Vandea, nel Périgord, nel Delfinato e nei Pirenei. Inoltre, il ferro era ancora prodotto in Renania, in Toscana, in Spagna e nelle Alpi orientali. È provato che la produzione del ferro ebbe a soffrire meno severamente di quella dell'argento, del piombo, del rame e dello stagno. Asce, coltelli, spade, vomeri e simili arnesi erano sempre necessari, ed evidentemente le armi di acciaio erano oggetto di molta attenzione. Dalla scarsità di informazioni sul rame e sul bronzo si può arguire che i turbamenti politici affrettarono la sostituzione di questi metalli da parte del ferro. Verso il nono secolo, col relativo cessare del caos politico, la metallurgia mostrò una certa ripresa, e cominciarono così a delinearsi alcuni caratteri della metallurgia medioevale.

a) Nuove miniere e centri di fusione sorsero oltre i confini dell'ex Impero Romano.

b) Una letteratura sull'estrazione mineraria e sulla metallurgia fu gradualmente creata, in un primo tempo per l'applicazione dei metalli nell'arte e nella decorazione, successivamente per istruire l'ufficiale dell'esercito, l'ingegnere, il banchiere, il saggiaiore e il fonditore.

c) Fu iniziata l'estrazione del carbone fossile, che venne ad essere usato su larga scala per alcune operazioni preliminari, sebbene le fusioni finali fossero ancora eseguite con carbone di legna. La metallurgia rimaneva così essenzialmente un procedimento legato all'uso del carbone di legna anche se con l'accentuarsi della scarsità del legname l'uso generale del carbone fossile andava sempre più aumentando.

d) L'energia idraulica fu gradualmente applicata alla metallurgia e i mantici, magli e i mulini a pestelli idraulici sostituirono quelli azionati dall'energia umana e animale.

Mentre la metallurgia degli altri metalli rimase virtualmente stazionaria fino al sedicesimo secolo, la produzione del ferro su larga scala e l'utilizzazione dell'energia idraulica condussero alla specializzazione dell'attrezzatura, al raggiungimento di temperature più elevate e all'allestimento di forni che resero possibile la produzione della ghisa. Verso la fine di questo periodo già si costruivano veri e propri altiforni.

Sebbene poco sia stato ancora rivelato dai documenti relativi alla metallurgia del primo Medioevo, molto è stato possibile apprendere mediante lavori di scavo. Moderne analisi di reperti di epoche anteriori sono state finora oggetto di scarsa attenzione, mentre ricerche del genere — come quelle relative alla Francia dei Merovingi (481-752) — hanno sempre dato sorprendenti risultati. Col trascorrere dei secoli, le antiche tecniche metallurgiche non furono certo dimenticate. Sovente esperti siriani, come quelli menzionati in un decreto del 374 nel codice teodosiano lavoravano nell'Europa occidentale cesellando argento, indorando elmetti, fabbricando scudi ed eseguendo ogni genere di lavoro d'intarsio dei metalli. Durante il settimo secolo, gli armaioli che lavoravano nella Borgogna si sparsero per la Francia settentrionale e occidentale: essi perfezionarono una tecnica del tutto particolare per la fabbricazione dell'acciaio sagomato (p. 465). Le armi d'acciaio orientali di questo tipo sono perfettamente omogenee e la sagoma è sviluppata per cristallizzazione, mentre l'acciaio occidentale sagomato era formato saldando insieme delle bandelle di acciaio orientale, che venivano poi tagliate, piegate e fucinate in modo da formare il particolare modello. Gli oggetti di acciaio sagomato di fattura occidentale divennero ricercati anche nei paesi arabi. Tali fatti gettano una luce vivida sulla sopravvivenza di complicatissime tecniche, e dovrebbero renderci cauti nel condannare la metallurgia del cosiddetto evo oscuro. Abbiamo inoltre motivo di ritenere che alcuni tipi di forni per il ferro, di cui parleremo in seguito, furono introdotti proprio in questo periodo.

Se consideriamo i pochissimi testi antichi in cui sono trattati argomenti metallurgici, ci rendiamo conto della natura molto frammentaria delle nostre conoscenze. La più antica di queste fonti è costituita da un ricettario dell'ottavo secolo intitolato *Compositiones ad tingenda musiva*, ovvero "Ricette per la colorazione dei mosaici". Esso contiene ricette per artisti e artigiani, ricavate per la maggior parte da testi greci e bizantini più antichi (p. 356). La fusione dei minerali di oro, argento e piombo è descritta in modo piuttosto vago, mentre la lavorazione dei metalli è trattata più dettagliatamente. Il resto contiene inoltre la descrizione del procedimento usato per produrre sottili lamine metalliche, per l'applicazione dell'oro mediante la sua amalgama e per la fabbricazione dell'ottone (*orichalcum*). L'uso di leghe contenenti piombo è indice di scarsità di stagno;

Il *Mappae clavicula de efficiendo auro*, ovvero "Chiave della formula per lavorare l'oro" sembra che risalga all'ottavo secolo (p. 356), sebbene la più antica versione in nostro possesso risalga a due secoli più tardi. Si tratta di un altro manuale per la lavorazione di metalli e leghe per l'artista e l'artigiano; esso contiene inoltre formule per leghe da usare come sostituti dell'argento e dell'oro. Anche i bronzi menzionati in questo testo contengono molto piombo.

Il terzo manuale, *De coloribus et artibus Romanorum*, ovvero "Delle pitture e delle arti dei Romani", attribuito a Eraclio, consta di tre parti, di cui le prime due furono probabilmente composte da un cittadino romano del decimo secolo: la terza parte fu aggiunta in Francia nel dodicesimo secolo. Anche qui troviamo descrizioni relative all'affinamento dell'oro e dell'argento, all'amalgamazione, ai materiali per la saldatura di metalli diversi, alla fabbricazione di alcuni metalli e leghe in sottili lamiere, nonché le formule per tali leghe.

Il quarto e più elaborato documento è il *Diversarum artium schedula*, ovvero "Saggio su varie arti", di Teofilo, prete probabilmente di origine greca stabilitosi in un monastero tedesco dopo aver girato in lungo e in largo l'Europa. Questo lavoro fu forse scritto nel decimo secolo, ma viene generalmente attribuito a un'epoca alquanto posteriore. Teofilo si occupava della doratura di copertine per libri e della decorazione dei manoscritti, della preparazione di vetro istoriato per cattedrali, del niello e di altre lavorazioni metalliche, come anche di intarsio dell'avorio. La sua dissertazione sui metodi di costruzione va dai calici, turiboli e cembali alle campane e agli organi da chiesa. Egli non dimentica la tecnica necessaria a preparare i materiali occorrenti agli artisti, descrivendo, per esempio, la costruzione di un forno per il vetro e la preparazione di vetro di colori diversi. Per quanto riguarda la metallurgia dell'oro egli discute sulle varie qualità di oro, sulla coppellazione e sull'amalgamazione, soffermandosi, inoltre, sulla fabbricazione dell'oro in foglie, dell'oro in polvere e di leghe simili all'oro. Tratta dei materiali di saldatura per l'applicazione delle strisce di piombo sul

vetro da cattedrale istoriato, degli attrezzi metallurgici e loro costruzione, dell'affinamento e fusione dell'argento, della liquazione, della costruzione dei forni di coppellazione e della colorazione dell'oro in foglie. Oltre a tutto ciò egli ci fornisce particolari circa l'estrazione del rame dai minerali raccolti in superficie, come la malachite o i solfuri ossidati, istruzioni per la costruzione di un forno a crogiolo per la fusione di piccoli quantitativi di rame e i metodi d'applicazione di pigmenti diversi sul rame. Una descrizione della fusione delle campane costituisce uno dei più importanti argomenti del suo libro, che, fra l'altro, si sofferma anche sulla suola per blumiere, sulla saldatura dolce e autogena del ferro, sulla fusione di recipienti di stagno e di ottone e sulla saldatura dello stagno. Sebbene non si tratti di un manuale di metallurgia, essendo destinato ai decoratori ed ai costruttori di chiese, questo volume ci fornisce un buon quadro della misura in cui le tecniche metallurgiche classiche sopravvissero.

Una nuova applicazione della metallurgia fu costituita dalla fusione delle campane per chiese. Le prime campane usate nelle chiese del quinto secolo erano costruite con lamiere di ferro: i loro precursori furono i campanelli da tavola usati dai Romani. Le campane fuse in bronzo fecero la loro prima apparizione nell'ottavo secolo, e già nel nono secolo esse erano comuni nelle chiese dell'Europa occidentale. La loro fusione fu di stimolo all'arte metallurgica, poiché le forme erano spesso molto più grandi di qualsiasi altra precedentemente usata. A Lubeca, intorno al 1250, vi era una strada dei campanari ed alcuni fonditori di campane del secolo successivo assunsero a fama internazionale. La loro esperienza si rivelò di grande importanza allorché, con l'invenzione della polvere da sparo, furono introdotte le armi da fuoco e si fusero i primi cannoni e palle da cannone (p. 75); essa si rivelò ancora di primissima importanza quando la ghisa divenne d'uso più comune.

Dopo Teofilo, ben pochi documenti di rilievo ci sono pervenuti. Sebbene Alberto Magno (1193?-1280), in una delle sue opere, abbia trattato anche argomenti di metallurgia, le sue osservazioni sono del tutto superficiali. Esistono informazioni frammentarie provenienti da documenti medioevali, ma vere e proprie istruzioni o manuali non compaiono prima del quindicesimo secolo. A quest'epoca appartengono infatti i *Kriegsbücher*, "Libri sulla guerra", ed i *Rüstungsbücher*, "Libri sull'armamento", per lo più scritti nell'Europa centrale e che trattano della metallurgia in generale. Verso la fine di questo secolo, una tradizione letteraria quasi ininterrotta sulle tecniche metallurgiche ebbe inizio con i *Bergbüchlein*, i *Probierebüchlein* e altri libri sulla metallurgia e sull'estrazione mineraria, che i nuovi torchi da stampa cominciarono a produrre su scala più vasta di quella resa possibile dagli *scriptoria* degli antichi monasteri. Le nostre conoscenze sulla metallurgia medioevale derivano principalmente dai ritrovamenti fatti negli antichi centri fusori, da dati economici e da tradizioni di epoche posteriori.

In alcune regioni dell'Europa centrale, specialmente nella Foresta Nera e nello Harz, nella Sassonia e nella Boemia, nella Slesia e in Ungheria, le risorse a cui avevano attinto gli antichi fabbri erano ancora in attesa di uno sfruttamento più completo. Queste regioni erano ancora ricche di legname e abbondavano inoltre di torrenti e ruscelli montani in grado di fornire energia. Agli albori del Medioevo la graduale colonizzazione da parte dei coloni fiamminghi, tedeschi e francesi, fece di queste regioni la principale risorsa della metallurgia medioevale. Nel giro di pochi secoli i popoli germanici divennero gli specialisti minerari e metallurgici della loro epoca.

Le regioni più antiche conservavano ancora la loro antica funzione. Nelle Cevenne e in altre regioni della Francia e della Spagna si continuava a eseguire il lavaggio dell'oro. Le miniere d'argento del Devon erano ancora tanto importanti da essere, nel 1299, concesse in affitto ai Frescobaldi — una delle più ricche imprese fiorentine del Medioevo — da Edoardo I; e i minerali di piombo provenienti da Alston Moor erano lavorati dai Tillmann di Colonia (1359). Nel 1316 a La Caunette, nella Linguadoca, venivano scoperti dei minerali di piombo ricchi di argento.

La maggior parte dell'oro e dell'argento destinati al commercio e alla decorazione delle chiese proveniva dalle regioni a est del Reno. Nel 1136 alcuni mercanti che trasportavano salgemma da Halle alla Boemia attraverso Meissen scoprirono i ricchi giacimenti argentiferi di Freiberg in Sassonia, le cui vene erano venute alla luce per effetto delle piene primaverili. I campioni di minerale portati al centro di produzione argentifera di Goslar, nello Harz, risultarono ricchissimi e determinarono una vera e propria "corsa all'argento". A Freiberg, intorno al 1170, l'attività mineraria e fusoria era in pieno sviluppo ed aveva portato alla creazione di un centro metallurgico di circa 30.000 abitanti. La produzione fu in costante ascesa fino al 1348, anno in cui la peste nera ne causò l'interruzione che doveva durare quasi un secolo. Nonostante ciò, verso la metà del quindicesimo secolo, Freiberg poteva vantare ben 52 fonderie.

A Goslar, in un primo tempo si otteneva argento dai filoni di rame di Rammelsberg, scoperti nel 968 e divenuti importanti nell'undicesimo secolo. Successivamente vi si sviluppò la produzione del rame, dello zinco e del piombo, e nel 1215 furono scoperti i ricchi filoni di Mansfeld. Più avanti, nel quattordicesimo secolo, Stora Kopparberg in Svezia divenne una seria concorrente. In Ungheria la fusione dei minerali era eseguita fin dai giorni di Carlo Magno (morto nell'814), che ai lavori delle miniere e nelle fonderie soleva adibire prigionieri. Qui la produzione dei metalli continuò fino al 1442, anno in cui la conquista polacca arrestò i lavori. Nelle Alpi orientali, miniere d'argento di una certa importanza erano quelle di Trento.

Per la maggior parte questi minerali di argento erano di natura complessa. Il loro trattamento implicava la liquazione e altri processi di separazione. Nel diciottesimo secolo i magli, gli stampi e i mantici azionati a mano erano numerosi nelle città minerarie. Durante i primi decenni del tredicesimo secolo troviamo qualche accenno all'uso di ruote idrauliche nelle miniere di argento di Trento. Nel secolo successivo esse erano già divenute abbastanza comuni in tutte le regioni alpine. L'uso di tali macchine comportò investimenti di capitali maggiori di quelli precedenti e dallo sviluppo minerario e metallurgico dipese in buona parte il sorgere del capitalismo occidentale. Si crearono leggi e diritti minerari sul modello romano e i centri industriali come Freiberg, Chemnitz e

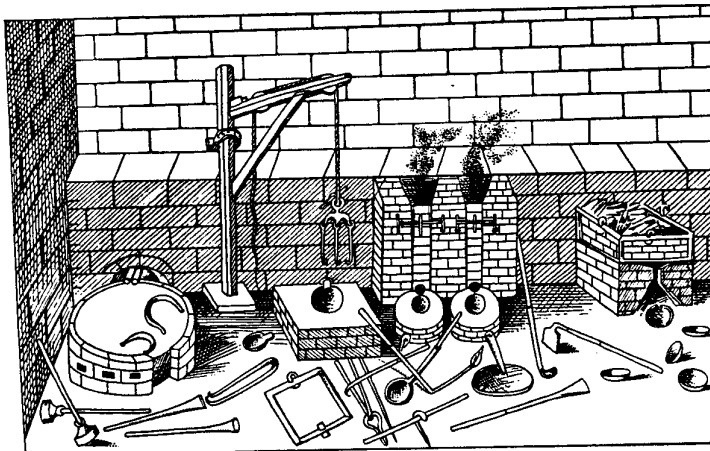


Fig. 34 La fusione del rame argentifero nel 15° secolo. In questa illustrazione e nella seguente sono raffigurare le varie fasi della fusione dei rame al quale è stato aggiunto piombo o un suo composto per poter estrarre l'argento. Al centro vi sono due piccoli altiforni. In quello di destra il minerale, probabilmente pre-arrostito all'aperto, viene fuso con carbone di legna. La metallina che si ottiene viene poi riscaldata nel forno a sinistra con piombo o un suo composto e il prodotto, un miscuglio di rame e di lega piombo-argento, colato in piccole forme rotonde, in cui si ottengono i pani per la liquazione. Questi pani vengono ammassati con legna nel forno di liquazione, visibile a destra, e il piombo che gocciola da questi pani forma la carica per il forno di coppellazione mostrato nella figura 35. Nella parte sinistra dell'illustrazione si nota il forno di coppellazione o suola d'affinamento per l'argento. Gli oggetti poggiati su di esso sono raschietti per sagomare la suola; sono anche visibili gli attrezzi per pigiare il materiale in posizione. Accanto a questa si nota un'altra suola d'affinamento, probabilmente usata per il rame. In questi forni si vedono sporgere le tuyères dei mantici. In tutti questi disegni l'artista ha tralasciato di illustrare la parte superiore dei forni. Dallo

Igbau assusero a fama di comunità di specialisti, con proprie leggi e una propria economia. Al loro sviluppo diedero impulso i signorotti feudali e i banchieri, e il lavoro degli schiavi non fu più sfruttato.

Sulla scia della nuova metallurgia dell'argento vennero a crearsi nuove risorse di rame. In Cornovaglia l'estrazione dello stagno era stata ripresa nel decimo secolo, e ora la produzione era in costante ascesa. Verso la metà del quattordicesimo secolo il suo ammontare medio era di circa 700 tonnellate annue, ovvero il doppio di quello precedente. Con i nuovi minerali di zinco della valle della Mosa si produceva un certo quantitativo di ottone, ma questa lega non entrò nell'uso comune prima del quindicesimo secolo, non prima cioè che fossero disponibili le nuove risorse di minerali di zinco provenienti dal Tirolo, dalla Carinzia e da Moresnet (presso Aquisgrana), le quali, a loro volta, stimolarono la domanda del rame. La produzione di piombo del Somerset, del Durham, del Cumberland, dello Shropshire e del Derbyshire era certamente uguale a quella dell'Europa centrale.

Il processo di fusione di questi metalli non subì alcun mutamento sostanziale. Ciò appare

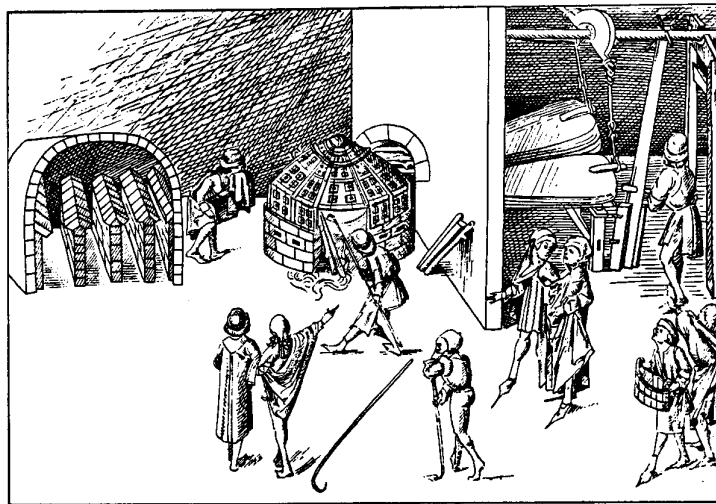


Fig. 35 Al centro è visibile un forno di coppellazione, in cui il piombo argentifero proveniente dalla liquazione viene trasformato, mediante ossidazione, in litargirio, lasciando argento purificato. Nella figura si nota un lavorante nell'atto di estrarre il litargirio eccedente con un'asta uncinata. Come combustibile sono usati dei ceppi di legno e il tiraggio è ottenuto mediante una coppia di mantici azionati a mano. Sulla sinistra si nota una serie di stalli per "asciugare" i pani di liquazione che hanno già subito il procedimento, cioè per rimuovere dal rame il piombo residuo. La sequenza dell'operazione è la seguente: arrostitimento (non rappresentato nella figura), fusione e liquazione (fig. 34), coppellazione dell'argento (fig. 35) e affinamento (fig. 34). Dallo Hausbuch, Germania meridionale, 1480 circa.

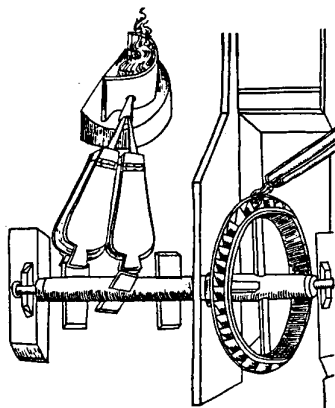
evidente dalla lettura di una descrizione esauriente di un affinatoio per il rame, contenuta nel *Mittelalterliche Hausbuch*, opera magnificamente illustrata che risale approssimativamente al 1480 (figg. 34 e 35).

D'altra parte, anche se la meccanizzazione e l'introduzione dell'energia idraulica apportarono dei mutamenti, la loro influenza fu di gran lunga maggiore sulla metallurgia del ferro. Dal decimo secolo in poi la scarsità del carbone di legna era diventata tanto allarmante che in alcune regioni la sua produzione era stata limitata dalla legge e gli sforzi per utilizzare il carbon fossile per usi metallurgici furono intensificati.

Sembra che inizialmente il carbon fossile fosse estratto per essere usato nelle forge. Vi sono infatti riferimenti del 1190-1230 che indicano l'esistenza di tale attività nei pressi di Liegi.

Anche in Francia, durante il dodicesimo e il tredicesimo secolo, il carbon fossile era estratto per lo stesso scopo; uno statuto di Arles del 1306 ne proibiva l'uso nelle fucine, ma nel 1345 esso veniva estratto per le fucine di Marche-sur-Meuse. In Inghilterra il carbon fossile fu utilizzato anche in epoche anteriori; infatti nel 1234 Enrico III confermava un privilegio di re Giovanni su Newcastle upon Tyne. Durante quel periodo il "carbone di mare" veniva trasportato con chiatte da Newcastle a Londra, ove ben presto (1273) il fumo e l'odore suscitarono le proteste della piccola nobiltà. Durante il tredicesimo secolo i giacimenti carboniferi dell'Inghilterra, della Scozia, della Saar, di Liegi, di Mons, di Aquisgrana e della Franca Contea nell'Impero germanico, e quelli del Lionese, del Forez, di Alès e dell'Angiò in Francia venivano sfruttati per fornire il combustibile per la cottura della calce e per gli usi domestici e per provvedere alle esigenze dei fonditori di ferro e dei fabbri.

In Inghilterra, e anche nei centri industriali del tredicesimo secolo della Toscana e dell'Italia settentrionale, i fabbri facevano largo uso di carbon fossile. Le



sue esalazioni solforose lo rendevano adatto solo per le prime fasi della fusione del ferro, e soltanto alcuni carboni di grado superiore, come l'antracite, erano talvolta impiegati nelle fasi successive, la dove oggi si userebbe del coke, ovvero antracite depurata. Tuttavia è da sottolineare il fatto che fino al diciottesimo secolo il combustibile generalmente usato per la fusione era il carbone di legna.

Un fattore che influì molto più potentemente sull'evoluzione della moderna metallurgia del ferro fu costituito dall'avvento dell'energia idraulica (fig. 36). Secondo Agricola, la prima applicazione dei mantici idraulici risale al 1435, ma certamente essa è da attribuirsi a epoca anteriore. Già nell'undicesimo secolo si fa menzione di mantici e magli idraulici in uso nelle Alpi occidentali e nella Slesia. Nel 1135 il monastero benedettino di Admont, nella Stiria, disponeva a Leoben di un mulino ad acqua, al quale, nel 1175, se ne aggiungeva uno a pestelli; inoltre abbiamo notizie di altri mulini esistenti a Hradish in Moravia. Da queste regioni orientali essi si spostarono nella Germania centrale dove, nelle valli fluviali della regione mineraria dell'Hanz, erano sorte nel tredicesimo secolo delle fonderie per blumi; gli accenni a bacini idrici annessi a tali fonderie sono molto frequenti. Anche in Danimarca troviamo riferimenti ai "mulini per il ferro" di Sorø (1197), costruiti "per estrarne il ferro dal minerale".

Fig.36 Mantici idraulici di un forno. Essi sono azionati dalle camme visibili sull'albero di una ruota idraulica azionata dall'alto (cfr. fig. 582). Da un manoscritto del 15° secolo.

Le prime applicazioni dell'energia idraulica alla metallurgia francese del ferro risalgono anch'esse all'undicesimo e al dodicesimo secolo. Ancora una volta l'iniziativa di introdurla nella metallurgia fu merito degli ordini monastici. Nel Delfinato, ove nel 1084 era stata fondata la Grande Chartreuse, i mulini ad acqua erano già in uso intorno al 1200. L'ingegnere cistercense Villard de Honnecourt, in un suo libro di disegni (1270) tracciò piani relativi a macchinari idraulici di ogni specie, compresa una segheria (fig. 584).

Il primo mulino per il ferro di cui si ha notizia nella Champagne (1203) apparteneva ai Templari. Colà, inoltre, nel 1249 il sovrano ne cedette uno a un suddito; intorno al 1283 vi sono accenni dell'esistenza di altri mulini per il ferro a Narbona, nei Pirenei e nella Montagne Noire (Francia meridionale). Così nel tredicesimo secolo non erano rari, in Francia, i mulini a maglio. I mulini a pestelli seguirono a circa un secolo di distanza, facendo la loro comparsa nella Saar. Un contratto sulla fucina idraulica di Briey (1323) menzionava anche un forno munito di mantici idraulici. Naturalmente vi fu una tendenza delle ferriere ad allontanarsi dai giacimenti minerari e carboniferi per avvicinarsi ai torrenti e ai ruscelli, tendenza invertita alcuni secoli più tardi dall'avvento della macchina a vapore.

IL FERRO E L'ACCIAIO NEL MEDIOEVO

Come abbiamo visto, l'esperienza dei fabbri romani e degli antichi fabbri europei non andò perduta nel disordine che precedette il decimo secolo. La metallurgia del ferro, anzi, trasse profitto dal progredire dell'abilità e dell'ingegnosità derivante dal fatto che ci fu sempre costante richiesta d'armi e attrezzi. I fabbri celtici della Gallia, che già Cesare aveva lodato, avevano costruito cerchioni di ferro per le ruote dei loro carri da guerra e si affermava che fossero stati gli inventori dell'armatura a maglia; ma, nonostante ciò, in battaglia le loro spade s'incurvavano, per cui dovevano essere frequentemente raddrizzate (p. 464). Le armi dei nuovi governanti scandinavi erano già migliorate. Le saghe del primo Medioevo parlano delle "lunghe spade" dei Vichinghi, delle scuri da guerra dei Franchi e dei pugnali e spade dei Sassoni. Il fabbro conservava ancora la sua posizione di membro di una potente corporazione.

In tutti i famosi centri fusori d'epoche anteriori la produzione continuava, per la maggior parte con forni a tiraggio naturale costruiti sui versanti delle colline e con altri di tipo più recente, provvisti di mantici. Le varie tribù che invasero l'Europa disponevano spesso di buoni fabbri e di nuovi tipi di forno, come quello per l'*osmund*,⁹ sembra, infatti, che migliorie del genere siano state introdotte

⁹L'*osmund* era un tipo speciale di ferro svedese, usato per la fabbricazione di piccoli oggetti come ami e punte per frecce. L'origine del nome è sconosciuta. Nel 1281 esso è menzionato col nome di *ferrum normannicum*.

dagli artigiani stranieri provenienti dal nord e dall'est. La maggior parte del ferro e dell'acciaio era ancora prodotta direttamente dal minerale mediante processi alquanto dispendiosi, ma gradualmente si pervenne alla scoperta di nuove tecniche per la produzione del ferro greggio. Il contenuto di carbonio di tale ferro poteva essere ridotto per ottenere del ferro saldato, oppure elevato per ottenere della ghisa.

Nella Stiria e nella Carinzia la produzione del ferro e dell'acciaio andò gradualmente aumentando dall'ottavo secolo in poi, ma non raggiunse mai un livello molto superiore alle 2.000 tonnellate annue. Nella Franconia la produzione del ferro ebbe inizio nel decimo secolo; nella Vestfalia (nella zona di Siegen) il ferro acquistò importanza solo dopo il 1228. La Svezia e l'Ungheria vennero alla ribalta nello stesso periodo. Dal decimo secolo in poi le province basche divennero sempre più importanti, sia come produttrici sia come esportatrici. Il risveglio delle antiche fucine della Lorena, della Borgogna, del Delfinato, delle Cevenne, del Poitou, dell'Angiò e della Normandia risale alla stessa epoca. Nel dodicesimo secolo il numero delle fucine e dei forni di tutta questa zona andò considerevolmente aumentando e sorsero nuovi centri di fusione, come quelli delle Alpi piemontesi e della Côte d'Or francese di cui solo ora si fa menzione. Nella Britannia la produzione dei forni della foresta di Dean, la "Birmingham medioevale", raggiunse, durante il dodicesimo secolo, un più alto livello e fornì a Riccardo I 50.000 ferri da cavallo occorrenti alla sua cavalleria per una Crociata. Il tredicesimo secolo vide un ulteriore sviluppo in molte regioni. Si ebbe così un notevole rifiorire delle attività nella Lorena, nella Champagne e nel Delfinato, e la cittadina di Narbona divenne un importante centro per l'esportazione del ferro e dell'acciaio verso Genova e molte regioni del Vicino Oriente.

La coesistenza di forme antiche e nuove di forni e di tecniche fusorie durante questo periodo genera molta confusione; tale confusione accresciuta dai molti termini locali usati per le suole e per i forni. In generale le tecniche fusorie medioevali erano ancora dispendiose, come si può constatare dall'esame della tabella I.

TABELLA I Confronto delle tecniche medioevali della fusione del ferro secondo O. Johannsen			
Denominazione	Peso del ferro ottenuto per ciascuna fusione, chilogrammi	Rapporto fra il consumo di combustibile e il minerale, per cento	Resa sul minerale per cento
Suola aperta di blumiera	60-70	450 (carbon fossile)	12,5 (su un minerale contenente il 25% di ferro)
Fucina corsa	125	880 (carbon fossile)	38,5
Fucina catalana	150	360 (carbone di legna)	31,0
Stückofen	300-900	250 (carbon fossile)	39,0 (con scoria contenente il 30% di ferro)

I minerali richiedevano la rimozione preliminare della matrice mediante frantumazione e lavaggio. Nel quindicesimo secolo questa operazione era eseguita del tutto meccanicamente. Per la maggior parte i minerali venivano prima arrostiti con legna verde e quindi immersi in acqua (*löschen*) la quale scioglieva una parte dei composti di zolfo e di rame. Talvolta, prima della fusione, i minerali venivano fatti stagionare.

Nel focolare di blumiera, che è il tipo di suola più antico, il minerale veniva mescolato con carbone di legna e quindi ricoperto con altro combustibile che era trattenuto da pietre disposte in cerchio. I mantici venivano diretti verso il centro della suola. Generalmente questo dispendioso processo si applicava soltanto per i minerali più puri. Il blumo che se ne otteneva veniva poi riscaldato su un'altra suola simile alla precedente e liberato dalla scoria a colpi di maglio.

Nella fucina corsa l'estrazione del ferro dal minerale era eseguita in due fasi: a) arrostitimento con parziale riduzione, b) fusione, riduzione e carburazione. Le parti permanenti del forno (fig. 38A) sono costituite da due pareti in muratura disposte ad angolo retto, destinate rispettivamente a proteggere gli operai e i mantici. Attraverso la seconda parete la *tuyère* per la soffiatura raggiunge il centro del forno. Fatta eccezione di queste pareti e di una base, il resto del forno è soltanto temporaneo, essendo costruito con carbone, minerale e ceneri disposti in modo da assumere una speciale forma per ogni operazione di arrostitimento o di fusione. La figura 38A mostra la forma a ferro di cavallo eretta per l'arrostitimento, eseguito con tiraggio insufficiente a causare un'ampia fusione. Il minerale arrostito viene quindi frantumato e, insieme con altro carbone, riammassato in modo da assumere la forma di una V. Dopo il riscaldamento della massa con un forte tiraggio e una continua aggiunta di materiali, il ferro carburizzato si raccoglie sul fondo.

La fucina catalana (fig.38A) era principalmente impiegata per i tipi porosi di limonite (minerale bruno di ferro, approssimativamente $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Tuttavia essa era anche impiegata per l'ematite, il minerale più comune, e per gli altri minerali di massa, che venivano prima stagionati e poi arrostiti in grandi e ampi forni in grado di contenere circa 20-35 tonnellate di minerale. Agglomerati di minerale prearrostito e frantumato venivano poi ammassati contro la parete inclinata opposta alla *tuyère*, mentre contro le altre pareti si ammassava del carbone. Con ciascuna operazione si fondevano circa 500 chilogrammi di minerale. Il minerale frantumato viene ridotto più facilmente, ma anche più facilmente assorbito dalla scoria. Se si fondono dei minerali contenenti manganese, l'assorbimento di impurità da parte della scoria risulta facilitato, ed quindi possibile produrre del ferro contenente circa lo 0,3 per cento di carbonio; tale ferro può essere poi indurito mediante tempera in modo da costituire una varietà di acciaio.



Fig. 37 Un altoforno medioevale della Jugoslavia. Nella parte anteriore sono chiaramente visibili i due condotti per l'aria. Le pareti del forno sono incrostate di quarzo corroso dalla scoria e danno un'idea delle temperature elevate che si ottenevano. Scala 1:50.

In quest'epoca erano in uso diversi tipi di forno a tino. I Romani e gli antichi fabbri europei avevano usato forni a tino con tiraggio naturale e talvolta con l'ausilio di mantici. Essi venivano per lo più impiegati per minerali contenenti manganese o per minerali scadenti di difficile fusione. Alcuni di essi persino nei tempi preistorici raggiungevano un'altezza di circa due metri. In seguito all'aumento della richiesta di ferro — e in particolare di acciaio — e all'introduzione dei mantici idraulici, fu possibile costruire forni più grandi e ottenere temperature più elevate. Veniva così intrapreso il cammino verso l'altoforno, la cui invenzione non doveva comunque perfezionarsi prima del sedicesimo secolo.

Lo *Stückofen*, originario della Stiria e popolare nel Vicino Oriente, era un diretto discendente del forno romano per blumi (fig. 38 D). I primi forni di questo tipo erano alti circa 3 metri, mentre i successivi raggiunsero i 4 metri; nel quindicesimo e nel sedicesimo secolo essi erano ancora considerati i forni migliori.

Allorché i fabbri compresero che il ferro greggio poteva essere efficientemente fuso, il sistema di tiraggio dello *Stückofen* fu modificato in maniera tale da poter ottenere a volontà sia il ferro greggio sia il ferro saldato. Fu osservato che l'altezza ideale era fra i 3 e i 4 metri, e il forno venne munito di un foro speciale per l'estrazione della scoria. Questo *Stückofen* perfezionato fu chiamato *Blasofen* (fig.37). I dati relativi alla zona di Siegen, esposti nella tabella II, danno un'idea di come tale evoluzione e tale meccanizzazione gradualmente andarono manifestandosi, e di come i diversi tipi operarono l'uno

accanto all'altro.

Nel 1430 i pezzi di ferro saldato prodotti dallo *Stückofen* pesavano circa 370 chilogrammi; intorno al 1470 il loro peso era aumentato a 400 chilogrammi e verso la fine del quindicesimo secolo aveva raggiunto i 500-600 chilogrammi. La produzione di questi forni si aggirava sulle 40-50 tonnellate annue, circa il triplo di quella dei forni più antichi.

Nel quattordicesimo secolo l'introduzione dei mantici idraulici (fig. 36) — almeno due per ogni forno — diede inizio alla produzione di grossi blocchi di ferro greggio o "salamandre". Un ulteriore impiego dell'energia idraulica fu necessario per azionare i magli a caduta che trasformavano tali blocchi in ferro saldato (fig.554.) Questi nuovi forni fanno la loro apparizione nel 1340 presso Namur, verso il 1400 presso Liegi e verso il 1474 nella regione di Nassau. A La Perche (Francia nord-occidentale) nel 1486 venne costruito un nuovo forno per la fabbricazione di palle da cannone e di cannoni di ghisa. Nella parte superiore dello *Stückofen*, con un maggior tiraggio e con carbone più duro, si ottenevano temperature più alte e scorie meno ricche di ferro, mentre una parte del ferro conteneva carbonio in quantità sufficiente per la fusione. La tecnica per elevare ulteriormente il tenore di carbonio e produrre così una ghisa di qualità soddisfacente fu scoperta nel tredicesimo secolo, ma fu elaborata soltanto lentamente e non fu adottata su larga scala fino al quindicesimo secolo. In precedenza il ferro saldato veniva liquefatto mediante aggiunta di stibnite, arsenico, antimonio e rame, ma ora si potevano fondere diverse centinaia di

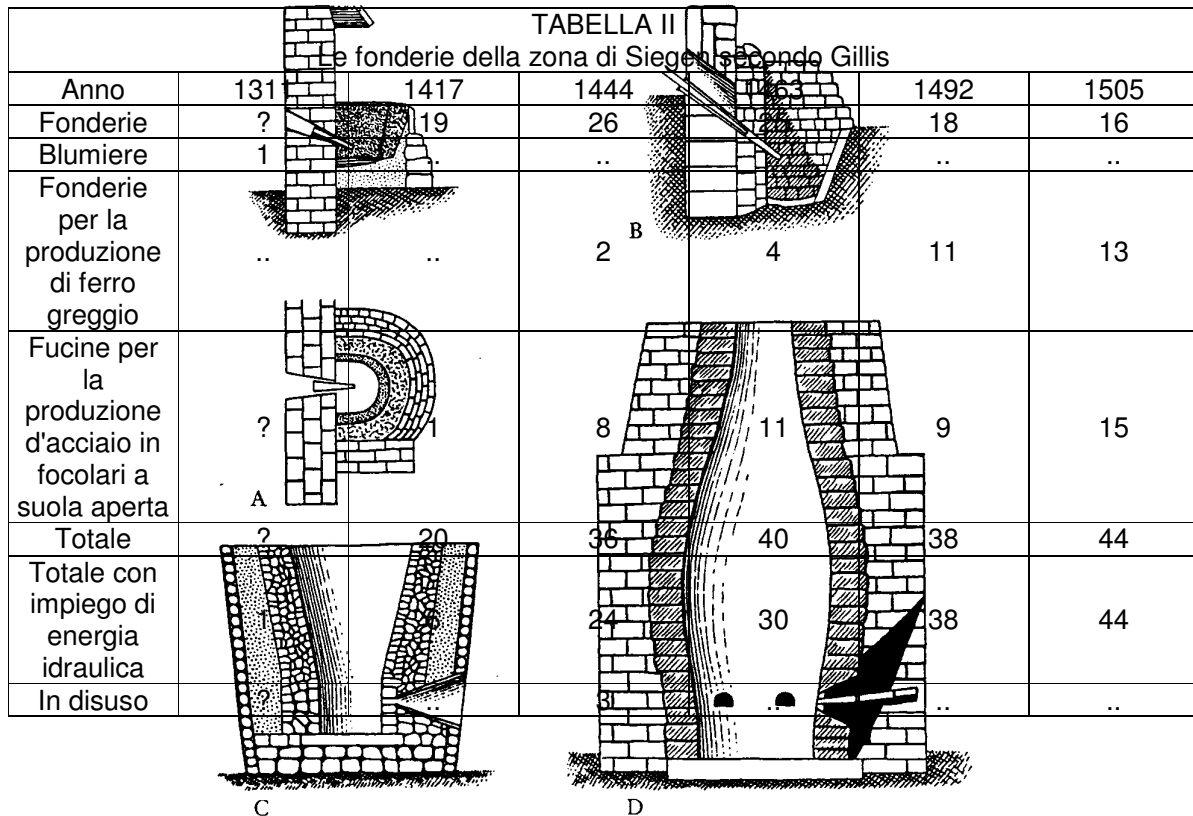


Fig. 38 Evoluzione dei forni fusori del ferro. (A) Sezioni verticale e orizzontale del forno corso. Le uniche parti permanenti erano costituite dalle due pareti in muratura con una tuyère per i mantici. Il minerale, frantumato e mescolato con carbone di legna, veniva ammassato in un semicerchio e sostenuto all'interno da blocchi di minerale più grossi. La cavità centrale veniva poi riempita di carbone ardente e la temperatura mantenuta fino a ottenere un sufficiente arrostitimento del minerale. Il semicerchio veniva poi infranto e la temperatura aumentata fino a ottenere un blumo di ferro saldato, con un certo grado di carburazione, come quello delle primitive blumiere. (B) Il forno catalano, inizialmente usato in Spagna, rappresenta una costruzione di tipo più permanente e fu comune nel Medioevo. (C) Il forno per l'osmund, che rappresenta un tentativo per aumentare l'altezza del forno e isolarne il contenuto. (D) Lo Stückofen, un'innovazione dovuta ai fonditori medioevali della Renania. In esso il minerale, man mano che scende verso il fondo, è sottoposto a una continua riduzione ad opera del carbone di legna. La scoria e il metallo vengono rimossi dalla parte inferiore. La maggiore altezza rende necessario un tiraggio più forte, a cui si provvede con mantici idraulici. In questo tipo di forno la ghisa poteva essere prodotta in favorevoli condizioni. Scala 1:60 circa.

chilogrammi di ferro greggio con un quantitativo doppio di combustibile per ottenere la ghisa. Nella sua *Architettura* Filarete descrive alcuni forni di questo tipo esistenti nelle vicinanze di Brescia intorno al 1450.

Le armi da fuoco furono fabbricate per la prima volta in Germania verso il 1325; esse erano di ferro fucinato, ma intorno al 1350 entrarono in uso le armi di bronzo fuso. A una generazione di distanza fecero la loro comparsa i veri e propri cannoni di ghisa, ma il bronzo rimase ancora in uso finché, nel quindicesimo secolo, non si acquisì un'adeguata padronanza delle tecniche di fusione del ferro. Verso la fine del quattordicesimo secolo un certo Mercklen Gast di Francoforte sul Meno fu il primo a propagandare la sua maestria nel fabbricare armi di ferro fuso, e agli albori del quindicesimo secolo si riusciva a ottenere la colata diretta dal forno alla forma.

La produzione della ghisa si diffuse gradualmente nella Germania occidentale, nella Francia nord-orientale e nell'Italia settentrionale: ciò coincise con la comparsa del termine "fonditore di ferro" e pose fine, per esempio, alla tecnica di fabbricazione delle palle da cannone con il ferro saldato. L'acciaio veniva ancora ottenuto mediante cementazione in focolari a temperatura più elevata, ma esso poteva essere anche prodotto nello *Stückofen* mediante una adeguata decarburazione.

Per la fucinatura dei blumi si usavano magli meccanici del peso di 500-1600 chilogrammi, azionati da ruote idrauliche di 2 metri. Per le successive fasi della lavorazione si usavano magli del peso di 300 chilogrammi, in grado di erogare 60-120 colpi al minuto, e altri più leggeri, di 70-80 chilogrammi, e 200 colpi al minuto. In alcuni centri, come Amberg in Baviera, il ferro in lamiera veniva ottenuto da barre.

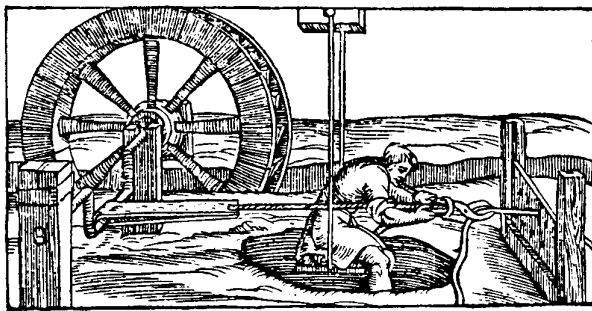


Fig. 39 Trafilatura di filo di ferro di grande sezione. Il lavorante sta seduto su una specie di altalena che si sposta con l'albero a gomito allorché questo è azionato dalla ruota idraulica a trascinamento inferiore. Allo spostarsi in avanti dell'altalena allorché la fune si allenta, egli porta le tenaglie in avanti; per contro, quando la fune torna in tensione, una staffa fa sì che le tenaglie afferrino il filo. Da Biringuccio, *Pirotechnia*. 1540.

dell'energia idraulica alla trafilatura del ferro si verificò agli albori del quattordicesimo secolo; essa era in atto nel 1351 ad Augusta e, poco più tardi, a Norimberga. La ruota idraulica faceva girare un albero a gomito al quale era attaccata una fune, collegata mediante una staffa a un paio di tenaglie (fig. 39). Il fabbro si sospendeva a un dondolo, in modo da poter afferrare con le tenaglie il filo sporgente dalla trafila e da potersi spostare indietro con esso allorché il movimento dell'albero a gomito lo tirava fuori. Naturalmente questi scomodi sistemi non erano necessari per la trafilatura di metalli meno tenaci come l'oro, l'argento e il rame.

I più antichi aghi di ferro avevano, invece della cruna, un uncino chiuso. Essi venivano prodotti dalla corporazione di fabbricanti d'aghi di Norimberga (1370) e da quella di Schwabach. I primi aghi con la cruna furono fabbricati nei Paesi Bassi nel quindicesimo secolo. Gli specialisti di città come Milano, Brescia e Passau producevano spade. L'arte di fucinarle pervenne a Solingen durante il periodo delle

Il filo di ferro fu prodotto mediante fucinatura fino al decimo secolo, e cioè fin quando non fu inventata la trafila. Questa è costituita da una piastra contenente una serie di fori di diametro progressivamente inferiore (fig. 39).

Essa era fabbricata con ghisa fine, prodotta in una specie di forno a crogiuolo in miniatura. L'applicazione



Fig.40 Chiodaio tedesco alla fine del 15° secolo. Forzando con un martello il metallo attraverso una serie graduata di fori, si otteneva un rudimentale tipo di chiodo.

campagne italiane dell'imperatore Barbarossa (1152-90).

Le falci erano fabbricate nella Stiria e, dal 1240 in poi, anche a Cromberg e a Plattenberg. Questi pochi esempi stanno a dimostrare che durante il Medioevo la specializzazione nell'industria del ferro aveva fatto grandi passi (fig. 40). I fabbri si erano già specializzati, per esempio, nella fabbricazione di ancore e di ferri da cavallo (figg.41,42).

Il commercio del ferro e dei vari tipi d'acciaio si diffuse in buona parte dell'Europa: l'Inghilterra produceva il ferro in quantità sufficiente, ma importava su larga scala l'acciaio. La Francia otteneva il ferro dalla Germania, dal Belgio e dalla Spagna: il ferro spagnolo era oggetto di traffico lungo la costa atlantica, mentre fino alla valle del Rodano questo metallo proveniva principalmente dall'Italia. L'acciaio della Stiria e della Carinzia veniva inviato ad Aquileia e a Venezia, e da qui verso l'est, fino alla Turchia; esso raggiungeva anche la Germania occidentale come 'acciaio ungherese' e veniva commerciato lungo il Reno per raggiungere poi l'Inghilterra, ove era noto come 'materiale limbrico', termine derivante dai nomi delle città di Leoben e Brücken. L'acciaio proveniente dal Tirolo veniva venduto a Innsbruck e raggiungeva l'Inghilterra per la stessa via; il ferro in lamiera prodotto nella regione fra il Danubio e il Meno veniva venduto ad Amberg. La Germania centrale riceveva il ferro principalmente dalla regione dello Harz e da Schmalkalden, nella Turingia. La famosa lega anseatica commerciava il ferro spagnolo proveniente dalle province basche, il ferro osmund venduto a Danzica e l'acciaio della Vestfalia venduto a Siegen e a Colonia. Nel Belgio il commercio del ferro era accentrato a Liegi, nelle mani della potente Corporation des Fèbvres.



Fig. 41 Fucina italiana del 1492 circa. Vi è raffigurato S.Eligio nella bottega di un fabbro. Da una pagina di un frontespizio veneziano.

Durante la seconda metà del quattordicesimo secolo ebbe inizio un forte declino della produzione dei metalli. Tale declino fu principalmente causato dalla 'Morte nera' (1348-50) e dalle devastazioni della Guerra dei cent'anni (1338-1453). Passata la prima ondata di pestilenza, la forte penuria di mano d'opera causò un ulteriore declino delle fonderie. Nel solo Cumberland la produzione delle ferriere diminuì del 50 per cento. Con alcuni statuti del 1349 e del 1351 si cercò di controllare la situazione della mano d'opera e di impedire agli operai di abbandonare i loro posti di lavoro. A tutto ciò fece riscontro un generale aumento dei prezzi, che per il ferro e il carbone di legna risultarono raddoppiati. Sembra curioso il fatto che il prezzo dell'acciaio subisse soltanto un aumento del 25 per cento, ma si deve tenere presente che in quel periodo, a causa della trascurabile produzione nazionale, l'Inghilterra importava l'acciaio e lo usava per corazze, per armi e per attrezzi e strumenti di tipo più fine.

Analoga situazione si rileva in altre regioni dell'Europa. Anche in Francia vi fu tendenza della mano d'opera ad abbandonare le fonderie in favore delle fattorie; i prezzi dell'acciaio e del ferro aumentavano rapidamente e molte fucine e miniere furono devastate nelle guerre. La Franconia e la Boemia sfuggirono alla Morte nera; ma anche qui, come nella Slesia, in Ungheria, nel Rammelsberg e in Cornovaglia, l'estrazione mineraria e la metallurgia cominciarono a declinare. Allorché dopo il 1450 l'industria andò riprendendosi, in molti paesi si manifestò una penuria di esperti metallurgici; la presenza di esperti tedeschi in Francia, e più tardi in Inghilterra, è frequentemente menzionata in documenti dell'epoca.

Oltre a ciò, serie difficoltà di natura tecnica intralciarono la rinascita dell'industria mineraria e della metallurgia. Nella regione dello Harz, in Sassonia, in Boemia, in Ungheria, nell'Alsazia, in Svezia e in Cornovaglia, molte miniere erano ormai esaurite, per cui si dovevano sfruttare gli strati più profondi. Ciò determinava un'irruzione di acque sotterranee nelle miniere e comportava, per conseguenza, un impiego di maggiori capitali per il macchinario di drenaggio azionato da ruote idrauliche oppure dai cavalli dei pistrini (figg. 19, 20). Il lavaggio, la rottura e la frantumazione spesso costituivano ancora operazioni manuali eseguite all'aperto; troppe erano inoltre le suole all'aperto e le piccole forge munite di mantici azionati a mano o a pedale il cui funzionamento era poco economico.

Il rimedio consisteva nella concentrazione e nella meccanizzazione. La concentrazione cominciò a manifestarsi con la ripresa dell'industria. In molte località si erigevano ora i *Saigerhütten*, cioè grandi fonderie costituite da una serie di piccole camere, ciascuna contenente forni e soole speciali per ogni fase della lavorazione e tutte costruite contro un lungo e massiccio muro centrale. La forte spesa di capitale necessaria fu resa possibile soltanto grazie all'aiuto dei banchieri. Il giovane capitalismo occidentale fornì anche i mezzi necessari alla meccanizzazione delle miniere e delle fucine. Si preannunciava così un nuovo periodo di grande prosperità che doveva durare dal 1460 al 1530, fin quando cioè l'affluenza dei metalli preziosi dal nuovo mondo e una crisi del credito non interruppero il processo d'adattamento dell'industria ai nuovi rapporti fra capitale e lavoro che scaturivano da questa crescente concentrazione e meccanizzazione.

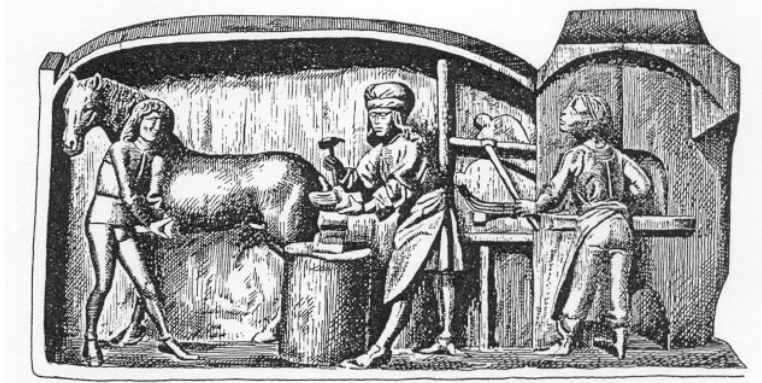


Fig. 42 Un lavoro di intaglio in legno della Germania meridionale del 1500 circa, in cui è rappresentato Sant'Eligio nella bottega da fabbro. Secondo una leggenda, per semplificare l'operazione di ferratura, egli soleva staccare la zampa del cavallo e, fissato il ferro allo zoccolo, la riattaccava all'animale.